

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ДЕТСКИЙ ОРТОПЕДИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ им. Г. И. ТУРНЕРА» МИНИСТЕРСТВА ЗДРАВООХРАНЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

На правах рукописи

КОКУШИН

Дмитрий Николаевич

ПРИНЦИПЫ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМЫ АКТИВНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ
ЗД-КТ НАВИГАЦИИ ПРИ ХИРУРГИЧЕСКОМ ЛЕЧЕНИИ ДЕТЕЙ С
ИДИОПАТИЧЕСКИМ СКОЛИОЗОМ

14.01.15 – Травматология и ортопедия

диссертация на соискание ученой степени
кандидата медицинских наук

Научный руководитель:
д.м.н. С.В.Виссарионов

Санкт-Петербург

2016

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ХИРУРГИЧЕСКОГО ЛЕЧЕНИЯ ДЕТЕЙ С ИДИОПАТИЧЕСКИМ СКОЛИОЗОМ С ПРИМЕНЕНИЕМ СИСТЕМЫ АКТИВНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ 3D-КТ НАВИГАЦИИ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ).....	12
1.1. Развитие дорсальных спинальных систем в хирургии деформаций позвоночника при идиопатическом сколиозе (от истоков к современности).....	12
1.2. Методы установки транспедикулярных винтов.....	17
1.3. Осложнения, связанные с транспедикулярной фиксацией.....	24
1.4. Анатомо-антропометрические особенности строения позвонков при идиопатическом сколиозе.	29
1.5. Вопросы интраоперационной регистрации при использовании систем оптической 3D-КТ навигации.....	32
1.6.Резюме.....	33
ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	35
2.1. Характеристика клинических наблюдений.....	35
2.2. Методы исследования.....	42
2.2.1. Рентгенологический метод исследования.....	42
2.2.2. Мультиспиральная компьютерная томография.....	42
2.2.3. Анатомо-антропометрический метод.....	43
2.2.4. Метод оценки погрешности интраоперационной регистрации в навигационной установке.....	47
2.2.5. Хронометрический метод.....	49
2.2.6. Статистический метод исследования.....	53

ГЛАВА 3. ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМЫ ОПТИЧЕСКОЙ 3D-КТ-НАВИГАЦИИ ПРИ ХИРУРГИЧЕСКОМ ЛЕЧЕНИИ ДЕТЕЙ С ИДИОПАТИЧЕСКИМ СКОЛИОЗОМ	54
3.1. Принципы работы навигационной станции. Навигационный инструментарий.....	54
3.2. Особенности предоперационного обследования.....	58
3.3. Особенности предоперационного планирования в навигационной станции.....	58
3.4. Интраоперационная навигация.....	68
ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ АНАТОМО-АНТРОПОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОЗВОНКОВ У ДЕТЕЙ С ИДИОПАТИЧЕСКИМ СКОЛИОЗОМ С ПРИМЕНЕНИЕМ СИСТЕМЫ АКТИВНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ 3D-КТ НАВИГАЦИИ.....	81
4.1. Анализ анатомо-антропометрических параметров позвонков у детей с идиопатическим сколиозом грудной локализации с применением системы активной оптической 3D-КТ навигации.....	81
4.2. Анализ анатомо-антропометрических параметров позвонков у детей с идиопатическим сколиозом груднопоясничной и поясничной локализации с применением 3D-КТ навигации.....	93
ГЛАВА 5. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ИНТРАОПЕРАЦИОННЫХ ПРОТОКОЛОВ РАБОТЫ СИСТЕМЫ АКТИВНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ 3D-КТ НАВИГАЦИИ.....	109
5.1. Результаты интраоперационной регистрации по анатомическим ориентирам и по поверхности.....	109
5.2. Результаты исследования процедуры формирования костных каналов для ТПФ при помощи системы активной оптической 3D-КТ навигации.....	116
5.3. Результаты хронометрического исследования.....	124
5.3.1. Результаты хронометрического исследования процедуры интраоперационной регистрации.....	125

5.3.2. Результаты хронометрического исследования формирования каналов для транспедикулярных винтов.....	129
5.3.3. Результаты хронометрического исследования при хирургическом лечении детей с идиопатическим сколиозом по трехкомпонентной методике Ю.И.Поздника.....	134
ГЛАВА 6. РЕЗУЛЬТАТЫ ХИРУРГИЧЕСКОГО ЛЕЧЕНИЯ ДЕТЕЙ С ИДИОПАТИЧЕСКИМ СКОЛИОЗОМ ОСНОВНОЙ И КОНТРОЛЬНОЙ ГРУПП.....	138
6.1. Сравнительный анализ результатов хирургического лечения детей с идиопатическим сколиозом с применением 3D-КТ навигации и методом «свободной руки».....	138
6.1.1. Сравнительный анализ основных лучевых параметров сколиотической деформации позвоночника.....	139
6.1.2. Сравнительный анализ распределения транспедикулярных опорных элементов в грудном и поясничном отделе позвоночника.....	142
6.1.3. Сравнительный анализ корректности винтов, установленных в позвонки под навигацией и методом «свободной руки».....	147
6.2. Обоснование алгоритма использования системы активной оптической 3D-КТ навигации при коррекции деформации позвоночника у детей с идиопатическим сколиозом.....	167
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	175
ВЫВОДЫ.....	185
ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ.....	187
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	188
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	190

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Хирургическое лечение детей с идиопатическим сколиозом остается актуальной и важной проблемой до настоящего времени. В последние годы для коррекции деформации позвоночника при идиопатическом сколиозе стали использовать металлоконструкции с транспедикулярными опорными элементами. Применение данного варианта спинальных систем для коррекции искривления позвоночного столба при идиопатическом сколиозе является более предпочтительным по сравнению с гибридными и ламинарными конструкциями (Васюра А.С. с соавт., 2012; Yilmaz G. Et al., 2012). Преимущества эффективности транспедикулярных систем обусловлены достижением значительной величиной коррекции имеющейся деформации во всех трех плоскостях, уменьшения протяженности инструментализации, сохранением достигнутого результата лечения в отдаленном послеоперационном периоде (Кулешов А.А. с соавт., 2012; Губин А.В. с соавт., 2015; Yu B., Zhang J.G. et al., 2009). Одновременно с этим, необходимо отметить, что проведение транспедикулярных винтов у пациентов с идиопатическим сколиозом сопряжено с рядом трудностей, обусловленных выраженными анатомическими изменениями позвонков и пространственными взаимоотношениями костных структур в них в результате сколиотического процесса. Риск возникновения и развития таких осложнений как перфорация и перелом корня дуги, стеноз позвоночного канала опорными элементами, неврологические нарушения, повреждение магистральных сосудов и органов средостения, при установке транспедикулярных опорных элементов, вынуждает многих хирургов использовать для фиксации верхнегрудного и среднегрудного отделов позвоночника ламинарные и педикулярные крюки (Suk S.I. et al., 1999; Liljenqvist U. et al., 2002; Kim Y.J. et al., 2006; Karatoprak O. et al., 2008; Hicks J.M. et al., 2010).

Использование навигационных систем во время хирургической коррекции идиопатического сколиоза у детей является новым и перспективным методом, позволяющим существенно увеличить возможность установки винтов в деформированные позвонки, вовлеченные в дугу искривления, и значительно уменьшить риск осложнений в ходе операции (Виссарионов С.В., 2014). По данным ряда исследователей проведение хирургических вмешательств на позвоночнике при целом ряде его заболеваний (дегенеративные поражения, переломы, опухоли позвоночника, туберкулезный спондилит, ревматоидный артрит, идиопатический сколиоз и др.) с применением навигационной ассистенции позволяет повысить точность установки транспедикулярных винтов в 1,3-1,7 раза (Ishikawa Y. et al., 2010; Tian Nai-Feng, Xu Hua-Zi, 2011).

В настоящее время в ходе хирургического вмешательства у пациентов с патологией позвоночника используется нескольких видов навигационного контроля. Основными из них являются 2D-флюоронавигация, 3D-флюоронавигация, 3D-КТ-навигация с регистрацией по анатомическим ориентирам и интраоперационная 3D-КТ- навигация (Tian Nai-Feng, Huang Qi-Shan et al., 2011). 2D-флюороскопическая навигация является методом, широко используемым в ходе операций при дегенеративных заболеваниях поясничного отдела позвоночника у взрослых, однако она не позволяет визуализировать стенки корней дуг позвонков в процессе формирования костного канала и контролировать процесс проведения винта одновременно во всех трех плоскостях (Gebhard F.T. et al., 2006). 3D-флюороскопическая навигация используется в ходе операции у пациентов с повреждениями и дегенеративными заболеваниями позвоночника. К недостаткам этого метода относятся ограниченная визуализация 3-4 позвоночно-двигательных сегментов, необходимость многократного проведения интраоперационного сканирования позвоночника, что значительно увеличивает лучевую нагрузку на больного. Использование 3D-флюороскопа в качестве навигационного контроля при проведении транспедикулярных опорных элементов дает

невысокое качество изображения, что влияет на точность их установки в тела позвонков (Jarvers J.S. et al., 2011). Анализ литературных данных указывает на то, что интраоперационная 3D-КТ навигация обладает наибольшей точностью и может рассматриваться в качестве оптимального метода при установке транспедикулярных винтов в ходе оперативного вмешательства (Tormenti M.J. et al., 2010; Tian Nai-Feng, Huang Qi-Shan et al., 2011). Однако ее использование ограничено высокой стоимостью применяемого оборудования, малой доступностью, повышенным риском контаминации операционного поля и увеличением лучевой нагрузки для пациента при многоуровневой регистрации.

Данные по использованию системы оптической 3D-КТ навигации при хирургическом лечении детей с идиопатическим сколиозом в настоящее время в отечественной литературе отсутствуют. Аспекты применения данного вида навигации у детей не определены и не изучены.

Таким образом, проблема на сегодняшний день актуальна, требует разработки и решения.

Цель исследования - разработать и обосновать методику применения системы активной оптической 3D-КТ навигации в хирургическом лечении детей с идиопатическим сколиозом.

Задачи исследования

1. Оценить особенности анатомо-антропометрического строения и пространственного взаимоотношения костных структур позвоночника у детей с идиопатическим сколиозом в программе Spine Map 3D навигационной станции.

2. Определить анатомические ориентиры и количество референтных точек для регистрации в грудном и поясничном отделе позвоночника в ходе операции у детей с идиопатическим сколиозом.

3. Определить возможное количество позвонков, в которых могут быть сформированы костные каналы для транспедикулярных опорных элементов, с одного уровня регистрации в грудном и поясничном отделе позвоночника.

4. Оценить временные характеристики использования системы активной оптической 3D-КТ навигации в ходе хирургического вмешательства при идиопатическом сколиозе у детей.

5. Провести сравнительный анализ корректности, правильности и стабильности установки транспедикулярных винтов в позвонки у детей с идиопатическим сколиозом методом «free-hand» и с применением системы активной оптической 3D-КТ навигации.

6. Разработать алгоритм использования 3D-КТ навигации при коррекции деформации позвоночника у детей с идиопатическим сколиозом.

Научная новизна исследования

1. Разработан новый метод измерения пространственных взаимоотношений позвонков у детей с идиопатическим сколиозом: «Способ измерения ротации тел позвонков у детей с идиопатическим сколиозом» (патент РФ №2587035 от 19.05.2016).

2. Установлена неизвестная ранее закономерность: «Закономерность изменения анатомо-антропометрических показателей корней дуг позвонков у детей с правосторонним идиопатическим сколиозом грудной локализации» (свидетельство №490 на открытие от 18.03.2016, выдано Российской Академией естественных наук и Международной академией авторов научных открытий и изобретений).

3. Впервые изучены особенности анатомо-антропометрического строения костных структур позвонков у детей с идиопатическим сколиозом в программе Spine Map 3D навигационной станции.

4. Обоснована новая рациональная последовательность этапов регистрации анатомических ориентиров для используемой программы в грудном и поясничном отделах позвоночника.

5. Впервые проведен сравнительный анализ корректности и стабильности установки транспедикулярных винтов в тела позвонков у детей с идиопатическим сколиозом методом «free-hand» и с применением системы оптической 3D-КТ навигации на основе балльной градации по шкале Gertzbein.

6. В результате проведенных исследований разработан новый методологический подход к использованию системы активной оптической 3D-КТ навигации при хирургическом лечении детей с идиопатическим сколиозом.

Практическая значимость

1. Оценка анатомо-антропометрических особенностей строения костных структур позвонков у детей с идиопатическим сколиозом в навигационной станции позволяет провести рациональное предоперационное планирование возможности и корректности установки транспедикулярных винтов на протяжении сколиотической дуги деформации.

2. Определен оптимальный набор референтных точек, используемых при регистрации по анатомическим ориентирам, в грудном и поясничном отделах позвоночника у детей с идиопатическим сколиозом.

3. Проведение интраоперационной регистрации по анатомическим ориентирам и поверхности костных структур задней опорной колонны позвонков уменьшает величину среднеквадратичной погрешности ошибки.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Оценка анатомо-антропометрических особенностей позвонков в навигационной станции у детей с идиопатическим сколиозом является

определяющим моментом проведения и корректной установки транспедикулярных винтов металлоконструкции.

2. Предложенное количество и последовательность референтных точек при регистрации по анатомическим ориентирам в грудном и поясничном отделе позвоночника у детей с идиопатическим сколиозом позволяет получить минимальную среднеквадратичную погрешность ошибки для корректной установки транспедикулярного винта.

3. Наличие точности совпадения контуров дорсальных костных структур позвонка у пациента с идиопатическим сколиозом в ходе операции с контурами его виртуальной 3D-модели в навигационной станции является обязательным условием перед началом процедуры формирования костных каналов для транспедикулярных винтов.

Апробация и реализация диссертационной работы

Основные результаты исследования доложены на XVI конгрессе педиатров с международным участием «Актуальные проблемы педиатрии» (Москва, 2012); научно-практической конференции, посвященной 180-летию Детской городской клинической больницы №5 им.Н.Ф.Филатова «Современные технологии диагностики и лечения детей и подростков», (Санкт-Петербург 2014); на VI съезде хирургов-вертебрологов России Межрегиональной общественной организации «Ассоциация хирургов-вертебрологов» «Вертебрология в России: перспективы, проблемы и пути решения» (Краснодар, 2015); научно-практической конференции с международным участием для травматологов-ортопедов и нейрохирургов «Деформации позвоночника – динамика на протяжении всей жизни» (Санкт-Петербург, 2015); на конференции «Spinal Surgery in Private Clinic: Challenges and Innovations» (Хельсинки, Финляндия, 2015).

По теме диссертации опубликовано 17 работ, в том числе 5 статей в журналах, входящих в перечень ВАК, получен один патент РФ на изобретение, свидетельство РАЕН на открытие.

Результаты исследования внедрены в клиническую работу отделения патологии позвоночника и нейрохирургии ФГБУ «НИДОИ им. Г.И. Турнера» Минздрава России. Материалы диссертационного исследования используются при чтении лекций и проведении семинаров для специалистов, проходящих усовершенствование по программе дополнительного профессионального образования на кафедре детской травматологии и ортопедии ГБОУ ВПО «СЗГМУ им. И.И. Мечникова» Минздрава России и на базе ФГБУ «НИДОИ им. Г.И. Турнера» Минздрава России.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, выводов, практических рекомендаций, списка литературы. Материал изложен на 209 страницах машинописного текста, иллюстрирован 33 таблицами и 66 рисунками. Библиографический указатель включает 172 источника литературы, в том числе 35 отечественных и 137 зарубежных.

ГЛАВА 1

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ХИРУРГИЧЕСКОГО ЛЕЧЕНИЯ ДЕТЕЙ С ИДИОПАТИЧЕСКИМ СКОЛИОЗОМ С ПРИМЕНЕНИЕМ СИСТЕМЫ АКТИВНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ 3D-КТ НАВИГАЦИИ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)

1.1. Развитие дорсальных спинальных систем в хирургии деформаций позвоночника при идиопатическом сколиозе (от истоков к современности)

Идиопатический сколиоз является сложной многоплоскостной деформацией позвоночника, характеризующейся смещением позвоночника во фронтальной, сагиттальной и горизонтальной плоскостях в целом, и трехмерными структуральными изменения позвонков, образующих сколиотическую дугу (Михайловский М.В., Фомичев Н.Г., 2002).

В настоящее время идиопатические сколиозы в структуре патологии опорно-двигательного аппарата занимают одно из первых мест, по данным ряда исследователей составляя по своей частоте встречаемости от 1,3% до 17,3% (в среднем 4–8%) (Кон И.И., Назарова Р.Д., 1984; Садовой М.А., Фомичев Н.Г., 1994; Алексеева Н.В. с соавт., 1996; Михайловский М.В., Фомичев Н.Г., 2002). Используемые методы консервативного лечения, даже при сколиозе I–II степени, в 2–18,1% наблюдений не всегда предотвращают развитие бурного прогрессирования сколиотической деформации позвоночника, требующего в последующем проведения хирургического лечения (Поздникин Ю.И. с соавт., 1998; Renshaw T.S., 1988).

В эволюции дорсальных спинальных систем в настоящее время принято выделять три поколения эндокорректоров (Михайловский М.В., Фомичев Н.Г., 2002; Виссарионов С.В. с соавт., 2013). Последовательно прослеживая изменение принципов инструментальной коррекции деформации позвоночника при идиопатическом сколиозе, заложенных в данные металлоконструкции, необходимо отметить, что с позиций

биомеханики каждое последующее поколение эндокорректоров обладало большей степенью воздействия на пространственные взаимоотношения («range of motion») позвоночно-двигательных сегментов, входящих в зону инструментального спондилодеза (White A.A., Panjabi M.M., 1990). Хотя инструментарий, предложенный Paul Harrington, являлся не первым металлоимплантатом, используемым для коррекции сколиотической деформации позвоночника, однако именно он прочно и надежно вошёл в практику хирургов всего мира и использовался более 40 лет (Райе Р.Э., 1984; Aaro S., Ohlen G., 1983; Fich R. et al., 1990). Работа по созданию эндокорректора для больных с паралитическим сколиозом была начата Paul Harrington в 1947 году. В 1962 году автор опубликовал работу, в которой обобщив свой 15-летний опыт, предложил оригинальный инструментарий для коррекции сколиотической деформации, определил протяженность и методику исправления основной дуги искривления. Основным принципом коррекции деформации позвоночника, заложенный автором в металлоконструкцию, являлась дистракция, позвоночник рассматривался как двухплоскостная система. Преимущества использования эндокорректора Harrington заключались в простоте, доступности и универсальности. К основным недостаткам металлоконструкции относят коррекцию деформации позвоночника только в одной плоскости, отрицательное влияние на сагиттальный профиль, особенно в поясничном отделе – «flatback syndrome» (Danielsson A.J., Nachemson A.L., 2001); потерю коррекции до 60% (Шевченко С.Д., 1983; Швец В.В., 1997); переломы стержня дистрактора в области проточек; высокий риск неврологических осложнений, развитие стойкого болевого синдрома (Weng X. et al., 1997).

В 1980 году мексиканский ортопед Eduardo R. Luque впервые представил сегментарную стержневую L-образную систему, а в 1982 году доложил первые результаты лечения у 14 больных (Luque E.R., 1982). Автор рассматривал позвоночник как полисегментарную структуру, каждый сегмент которой должен быть зафиксирован, что позволит обеспечить

равномерное распределение корригирующих сила, приложенных к позвоночнику в целом и получить жесткую фиксацию без дополнительной наружной иммобилизации. Основными преимуществами метода являлись получение хорошей коррекции сколиотического компонента деформации, сохранение сагиттального профиля и отсутствие необходимости проведения корсетирования в послеоперационном периоде (Wilber R.G. et al., 1984; McMaster M.J., 1991). К недостаткам относили развитие неврологического дефицита как непосредственно в ходе операции вследствие повреждения содержимого позвоночного канала большим количеством проволочных петель, так и в позднем послеоперационном периоде при нарушении целостности проволоки с ее смещением и развитием остеобластических процессов вокруг имплантата (MacEwen G.D. et al., 1975; Wilber R.G. et al., 1984; McMaster M.J., 1991).

В дальнейшем ряд хирургов-вертебрологов использовали комбинацию методов P.R. Harrington и E.R. Luque с целью улучшения коррекции деформации, однако данные показывают, что особых преимуществ в величине достигнутой коррекции и ее последующей потери получено не было (Поздникин Ю.И. с соавт., 1990; Dove J., 1989; Bentley G. et al., 2001).

Одной из модификаций системы E.R.Luque, появившейся в конце восьмидесятых годов, стала рама Hartschill, разработанная J. Dove (1986). Данная система представляла собой два стержня конструкции Luque, соединенные сверху и снизу двумя жесткими поперечными связями и образующие замкнутый прямоугольник, который фиксировался к позвоночнику двойными субламинарно проведенными проволочными петлями. При проведении анализа результатов хирургической коррекции деформации позвоночника рамой Hartschill был сделан вывод, что рама не дает большей коррекции, чем метод Luque или Harrington-Luque, но обеспечивает большую деротацию позвонков и лучше удерживает коррекцию (Targett J.P.G., Gardner A.D., 1990). Еще одним аналогом метода Harrington-Luque является операция Resina и Ferreira-Alves в модификации

Drummond. Отличие данной методики состоит в том, сегментарная коррекция деформации позвоночника проводится с использованием оснований остистых отростков. Говоря об осложнениях, необходимо отметить, что при 262 выполненных операциях не было ни одного случая появления неврологической симптоматики (Стоков Л., Кожухаров К., 1989; Stirling J., Eisenstein S.M., 1989).

В 1982 году Cotrel и Dubousset предложили дорсальную систему для коррекции и фиксации позвоночника, разработанную на основе концепции трехмерных межсегментарных и пространственных взаимоотношений элементов позвоночного столба. Рассмотрение позвоночника в аспекте трехплоскостного сегментарного строения привело к расширению взглядов на основные принципы приложения корригирующих воздействий к элементам позвонков и, как практической реализации положений теории, к разработке стратегии сегментарной трехплоскостной коррекции деформации позвоночника и спинального инструментария для ее технического осуществления. В 1984 году осуществлена операция J. Dubousset с использованием CDI по классической методике (с изгибом стержня и деротационным маневром). К 1988 году накопились данные, достаточные для формулирования первых выводов и Y. Cotrel с соавторами опубликовали работу, в которой представили новую универсальную сегментарную систему инструментария для хирургии позвоночника, позволяющую путем сегментарной селективной дистракции и компрессии в сочетании с деротационным маневром осуществлять трехплоскостную коррекцию деформации, обеспечивающую жесткую фиксацию, устраняющую необходимость использования внешней иммобилизации в послеоперационном периоде. Во фронтальной плоскости в ходе операции достигалась коррекция деформации с одновременным восстановлением формы позвоночника в сагиттальной плоскости: инструментарий способствовал формированию грудного кифоза с сохранением поясничного

лордоза и предупреждением развития «flatback» синдрома (Cotrel Y. et al., 1988, 1992).

С 90-х годов XX века спинальные хирурги при оперативном лечении пациентов с идиопатическим сколиозом начали использовать транспедикулярные винты сначала в поясничном отделе и грудопоясничном переходе, а затем и в грудном отделе позвоночника (Ветрилэ С.Т. с соавт., 2003, 2004, 2005, 2009; Кулешов А.А., 2007; Виссарионов С.В., Дроздецкий А.П., 2010; Виссарионов С.В., 2013, 2014; Губин А.В. с соавт., 2015; Suk S.I. et al., 1995; Hamill C.L. et al., 1996; Liljenqvist U. et al., 1997; Kim Y.J. et al., 2004).

Применение данного варианта спинальных систем для коррекции искривления позвоночного столба при идиопатическом сколиозе является более предпочтительным по сравнению с гибридными и ламинарными конструкциями (Васюра А.С. с соавт., 2011, 2012; Yilmaz G. Et al., 2012). Преимущества эффективности транспедикулярных систем обусловлены достижением значительной величиной коррекции имеющейся деформации во всех трех плоскостях, уменьшения протяженности инструментализации, сохранением достигнутого результата лечения в отдаленном послеоперационном периоде (Кулешов А.А. с соавт., 2012; Губин А.В. с соавт., 2015; Yu B., Zhang J.G. et al., 2009).

Пациенты с идиопатическим сколиозом, требующие хирургического лечения, представляют собой тяжелую группу больных, имеющих выраженные деформационные и торсионные изменения анатомии позвоночника, сопровождающиеся нарушением размеров основания дуг и тел позвонков. Данные особенности диктуют необходимость в разработке новых хирургических технологий, позволяющих более эффективно коррегировать искривление позвоночника и создающих условия для надежной и стабильной фиксации позвоночника после оперативного вмешательства. Этим требованиям отвечают технологии с использованием металлоконструкции с транспедикулярными опорными элементами

(Виссарионов С.В., 2013). В свою очередь эта методика требует повышенной точности хирургической техники, связанной с установкой винтов, с применением надежного способа контроля действий оператора. Вместе с тем, установка винтовых конструкций, особенно в грудном отделе позвоночника, у пациентов со сколиотическими деформациями существенно затруднена в связи с уменьшением диаметра дуг позвонков, значительными деформационными и торсионными изменениями анатомии позвоночника, склеротическими процессами в ножках позвонков, в первую очередь, на высоте дуги искривления (Виссарионов С.В., 2014). В этих условиях введение транспедикулярных винтов сопряжено с существенными техническими сложностями и ассоциируется со значительным риском отклонения истинной и запланированной траекторий введения опорных элементов металлоконструкции, что, в свою очередь, может привести к тяжелым нежелательным последствиям – повреждению спинного мозга и корешков, к нестабильности спинальной системы.

1.2. Методы установки транспедикулярных винтов

Метод инструментального спондилодеза позвоночника с использованием винтов впервые был описан Н.Н. Boucher (1959). Однако, более широкое применение данный вид фиксации в хирургии позвоночника получил позднее, начиная с работ R. Roy-Camille с соавторами (1986), применивших транспедикулярные винты при травме позвоночника.

Развитие транспедикулярной фиксации тесно связано с разработкой и использованием различных методов, призванных обеспечить безопасное и корректное положение винтов в костных структурах позвонков. Методы установки транспедикулярных винтов можно разделить три основных класса: метод «свободной руки» (free-hand technique), флюороскопическая и стереотаксическая навигационные технологии. Техника «свободной руки» основана на оценке нормальных и измененных дорсальных костных структур позвоночника, при этом хирург полностью зависит от предоперационной

визуализации и интраоперационных анатомических ориентиров. Навигационные технологии позволяют хирургу провести установку транспедикулярных винтов вне зависимости от измененной анатомии позвоночника.

В настоящее время существует несколько классификаций, описывающих корректность положения транспедикулярных винтов и величину их мальпозиции. Все они основаны на оценке данных послеоперационного компьютерно-томографического исследования позвоночника (Schwarzenbach O. Et al., 1997; Mirza S.K. et al., 2003; Fayyazi A.H. et al., 2004; Heary R.F. et al., 2004; Kim Y.J. et al., 2004;).

Наиболее широкое распространение для оценки положения транспедикулярных винтов получили две шкалы. Шкала S.D. Gertzbein (1990), описывает положения винта относительно корня дуги и имеет четыре степени смещения (Grade 0-3) с шагом в 2 мм, расстояние измеряется от медиальной стенки корня дуги. Эта шкала была впервые применена при оценке корректности винтов, установленных на уровне Th8-S1 позвонков. A.S. Youkilis с соавторами (2001) несколько изменили данную классификацию, выделив три степени смещения: Grade 1 - винт полностью расположен в корне дуги, Grade 2 – смещение винта менее 2 мм, Grade 3 – смещение более 2 мм.

S.K. Mirza с соавторами (2003) создали классификацию, включающую в себя шесть возможных направлений смещений транспедикулярного винта относительно кортикала позвонка: переднее, латеральное, медальное, инфрамедальное, инфралатеральное и верхнее. Классификация R.F. Heary с соавторами (2004) включает в себя пять степеней смещения (Grade1-Grade5). Данная классификация разработана с целью уточнить показания для удаления транспедикулярных винтов, расположенных близко к важным анатомическим структурам (Grade 5). Однако, универсальность шкалы Heary ограничена тем, что она не учитывает смещение винтов в различных направлениях.

Метод «свободной руки»

Установка транспедикулярных опорных элементов методом «free hand» основано на точном определении анатомических ориентиров и их взаимоотношений отдельно для каждого позвонка грудного и поясничного отделов позвоночника. На основании анатомических ориентиров определяют точку введения винта. При установке транспедикулярного винта в грудной позвонок используют следующие ориентиры: нижняя граница верхнего суставного отростка, медиальная граница поперечного отростка и *pars interarticularis*, образующие треугольник, центр которого является точкой введения винта (Parker S.L. et al., 2011). Существует еще один вариант введения винта в грудном отделе – вдоль основания верхнего суставного отростка проводят линию и делят ее на три части, точка введения винта при этом расположена на границе между латеральной третью и медиальными двумя третями линии (Chung K.J. et al., 2008). В грудном отделе позвоночника с уровня позвонка Th12 до Th7 точки введения винтов расположены более медиально и краниально. Выше уровня позвонка T7 точки введения винта смещены более латерально и каудально (Xu R. Et al., 1998).

В поясничном отделе позвоночника точка введения винта расположена на пересечении слияния линий *pars interarticularis*, поперечного отростка и сосцевидного отростка инструментируемого позвонка (Parker S.L. et al., 2011). Изогнутая часть искателя при введении в корень дуги на глубину 15-20 мм должна быть ориентирована латерально, чтобы предотвратить повреждение медиальной стенки корня дуги, образующей позвоночный канал. Далее для предотвращения повреждения латеральной поверхности позвонка искатель разворачивают на 180°. Удаляют искатель, оценивая характер отделяемого из сформированного канала на возможное повреждение дурального мешка (истечение ликвора) и повреждения крупных сосудов (чрезмерное, пульсирующее кровотечение). Все костные стенки

сформированного канала тщательно исследуют зондом для исключения медиального или латерального смещения.

Методы навигационной ассистенции

В настоящее время базовым методом для установки транспедикулярных винтовых систем является использование флюороскопического контроля. Данная технология нашла широкое применение вследствие относительной простоты и доступности. Вместе с тем, накопленный опыт применения данной методики указывает на ряд существенных недостатков, характерных для проведения винтов под ЭОП контролем. В первую очередь, это высокая лучевая нагрузка на пациентов и персонал. Кроме того, контроль за введением винтов осуществляется только в одной планарной проекции, что значительно снижает точность и безопасность процедуры. По данным ряда авторов значимые отклонения в траектории винтов при 2D-флюороскопии могут достигать от 7% до 54%, а частота связанных с этим неврологических осложнений от 5% до 7% (Amiot L.P. et al., 2000; Belmont P.J. et al., 2001; Nottemeier E.W. et al., 2003). Перспективным направлением совершенствования хирургической техники введения транспедикулярных винтов является дополнительное использование оптических навигационных систем. Одним из наиболее простых методов навигационной ассистенции может служить 2D-флюоронавигация. Ее принципиальным достоинством является значительное (в 10-12 раз) снижение лучевой нагрузки (Gebhard F.T. et al., 2006), что особенно важно при выполнении хирургических вмешательств у детей и подростков, а также возможность одновременного контроля за проведением винтов в нескольких проекциях, обеспечивающая условия для повышения точности хирургических манипуляций. Принципиальным недостатком 2D-флюоронавигации является двухмерный характер получаемой информации, что существенно снижает возможности пред- и интраоперационного планирования траектории введения транспедикулярных опорных элементов

конструкции, невозможность контроля за их введением в аксиальной и коронарной проекциях.

В последнее время наиболее широкую популярность в клинической практике получили методы 3D-навигации, которые обеспечивают более благоприятные условия для планирования и проведения транспедикулярных винтов. Согласно метанализу, выполненному Nai-Feng Tian в 2011 году, методы 3D-навигации обладают достоверными преимуществами с точки зрения точности проведения транспедикулярных опорных элементов конструкции перед установкой винтов под 2D-флюороскопическим контролем. Выполненный авторами ретроспективный анализ литературы (Nai-Feng Tian, 2011), позволил проанализировать результаты проведения винтов в ножки дуг 7533 поясничных и грудных позвонков. При этом точность установки винтов с 3D-навигационной ассистенцией достигала 96,7% и достоверно превышала возможности стандартных методов введения под 2D-флюороскопическим контролем (Tian Nai-Feng, Xu Hua-Zi., 2011). Преимущества использования 3D-навигации наиболее очевидны при выполнении вмешательств на грудном отделе позвоночника. L.P. Amiot с соавторами (2000) убедительно продемонстрировали более высокую точность 3D-навигации по сравнению с операциями, выполненными под флюороскопическим контролем. Навигационная ассистенция обеспечила возможности для точной установки винтов в 95% наблюдений, в то время как при использовании флюороскопического контроля эта цифра оказалась существенно ниже - 85% (Amiot L.P. et al., 2000). Анализ результатов хирургического вмешательств у 100 пациентов с заболеваниями позвоночника, выполненный T. Laine с соавторами (2000), указывают на то, что проведение 3D-навигационной ассистенции позволяет снизить процент перфорации ножек с 13,4% до 4,6% (Laine T. et al., 2000), а по данным Y. Kotani с соавторами (2003) – с 11% до 1,8%.

Одним из наиболее привлекательных способов 3D-навигации является 3D-флюоронавигация, которая основана на совместном использовании 3D

ЭОПов и сопряженной с ними стандартной оптической навигационной системы. Принципиальным преимуществом этой технологии, в отличие от обычной 2- флюоронавигации, является возможность получения трехмерных интраоперационных изображений позвоночника с последующим контролем за проведением винтов в аксилярной, коронарной и поперечной проекциях. К существенным недостаткам 3D-флюоронавигации относят невысокое качество получаемых интраоперационных изображений, особенно у больных с остеопорозом, большой массой тела и/или выраженными нарушениями анатомии позвоночника (Jarvers J.S., Katscher S., 2011). Кроме того, небольшой диаметр детектора требует многократного сбора информации, особенно при установке больших по протяженности конструкций. У больных со сколиотической деформацией это приводит к увеличению времени операции и значительной лучевой нагрузке, которая сопоставима с нагрузками, получаемыми при введении винтов под флюороскопическим контролем. Следует отметить, что конструктивные особенности 3D ЭОПов существенно затрудняют, а во многих случаях не позволяют, проводить сбор информации в режиме 3D у пациентов с большой массой тела и выраженными (сколиоз и кифоз более 90°) деформациями позвоночника (Rajan V.V. et al., 2010).

По этой причине в качестве своеобразного «золотого стандарта» 3D ассистированной навигации может рассматриваться 3D-навигация на основе данных интраоперационного КТ исследования. При этом хирург получает информацию, имеющую целый ряд существенных преимуществ: изображения высокого (диагностического) качества; возможность автоматической, без участия оператора, регистрации; чрезвычайно высокую точность процедуры, основанную на использовании изображений, полученных непосредственно на операционном столе (Tormenti et al. 2010). Кроме того, 3D-КТ навигация отличается от 3D-флюоронавигации меньшей лучевой нагрузкой, отсутствием серьезных технических ограничений, снижением времени, затрачиваемого на сбор информации. Вместе с тем,

высокая стоимость, ограниченная доступность, жесткие требования к конструктивным особенностям операционных существенно ограничивают возможность широкого использования интраоперационной 3D-КТ навигация.

В качестве ее эффективной альтернативы может рассматриваться 3D-КТ навигация на основе данных предоперационной компьютерной томографии позвоночника (Белецкий А.В. с соавт., 2010; Новокшенов с соавт., 2010). Однако, различия в положении пациента на операционном столе и столе диагностического томографа рассматривается как потенциальный источник значительных погрешностей и, вследствие этого, низкой точности навигационной ассистенции. Применение 3D навигации на основе предоперационной КТ диктует необходимость обязательной регистрации по анатомическим ориентирам, что может существенно увеличить время операции. Вместе с тем, навигационная ассистенция на основе предоперационной КТ обладает рядом принципиальных достоинств: создает условия для ощутимого снижения лучевой нагрузки, в отличие от интраоперационного КТ исследования, не увеличивает риск инфекционных осложнений, связанных с контаминацией операционного поля, отличается чрезвычайно высокой экономичностью по сравнению со всеми остальным видами 3D-навигации .

Применение ЭМГ в качестве контроля при введении винтов признано ненадежным, так как обладает низкой чувствительностью, особенно на уровне Th2–Th9 (Samdani A.F. et al., 2011; De Blas G. Et al., 2012). Однако использование детальной визуализации задних структур и точек имплантации в сочетании с методом freehand под ЭМГ-контролем повышает точность установки винтов до 98 % (Kim Y.W. et al., 2008).

Достаточно надежным способом формирования корректного транспедикулярного канала является развертка «PediGuard» (ECD), принцип действия которой основан на импедансометрии, что существенно снижает риск опасных мальпозиций (Ovadia D. Et al., 2011).

Робот-ассистенция, используемая для проведения транспедикулярных винтов, позволяет достичь высокой точности установки в позвонки, достигая в ряде случаев 99% (Коновалов Н.А., 2010; Асютин Д.С., 2014; Каспарова К.А., 2014; Macke J.J. et al., 2016).

1.3. Осложнения, связанные с транспедикулярной фиксацией

Мальпозиция винтов

Данные литературы, касающиеся оценки корректности положения винтов установленных методом «свободной руки» и при помощи различных навигационных методик неоднозначны и порой противоречивы.

При использовании методики freehand величина мальпозиций винтов в грудном и поясничном отделах при коррекции деформаций позвоночника составляет от 1 до 58 % (Schulze C.J. et al., 1998; Amiot L.P. et al., 2000; Halm H. Et al., 2000; Belmont P.J. et al., 2001; Rampersaud Y.R. et al., 2005; Di Silvestre M. Et al., 2007; Lehman R.A. et al., 2007; Kosmopoulos V., Schizas C., 2007; Kotani Y. Et al., 2007; Bergeson R.K. et al., 2008; Abul-Kasim K. Et al., 2010; Chan C.Y. et al., 2010; Erkan S. Et al., 2010; Hicks J.M. et al., 2010; Li G. Et al., 2010; Samdani A.F. et al., 2010; Verma R. Et al., 2010; Wang V.Y. et al., 2010; Harimaya K. Et al., 2011; De Blas G. Et al., 2012; Gang C. Et al., 2012; Suk S.I. et al., 2012; Ughwanogho E. Et al., 2012; Van der Kelft E. Et al., 2012).

По сообщению Kuklo с соавторами (2005), при коррекции сколиотических деформаций более 90° в 96,3 % наблюдений отмечено корректное положение винтов, установленных методом freehand. По другим данным (Rampersaud Y.R. et al., 2005), количество мальпозиций в грудном отделе достигает 31,6 %, в поясничном – 10,6 %. До 48,0 % мальпозиций в грудном отделе приходится на уровень Th1–Th6, что обусловлено меньшим диаметром ножек позвонков (Chan C.Y. et al., 2010). Около 56 % некорректно установленных винтов располагается на вогнутой стороне деформации (Abul-Kasim K. Et al., 2010), что можно объяснить структурной дисплазией дужек и апикальной торсией. При этом у 81–86 % винтов мальпозиция не достигает 2

мм (Amiot L.P. et al., 2000; Rampersaud Y.R. et al., 2005), у 68 % – не превышает 4 мм (Wang V.Y. et al., 2010). По литературным данным, медиальная мальпозиция до 4 мм не приводит к неврологическим повреждениям, так как соответствует так называемой зоне безопасности (safe zone). Это правило наиболее применимо для грудного отдела, где 2 мм приходится на эпидуральное пространство, 2 мм – на субарахноидальное. Поэтому не возникает непосредственной компрессии спинного мозга (Abul-Kasim K. Et al., 2010). Существуют данные, что интраканальная мальпозиция в грудном отделе с перекрытием канала до 50 % в ряде случаев не сопровождается неврологическими повреждениями. Однако подобное положение винта признается недопустимым и требует перепроведения (Abul-Kasim K. Et al., 2010; Mac-Thiong J.M. et al., 2013). При этом менее чем в 7 % случаев возникают неврологические осложнения (Abul-Kasim K. Et al., 2010; Erkan S. Et al., 2010). Установка винтов при ревизионных операциях сопряжена с более высоким риском мальпозиций. Опыт и мастерство хирурга являются наиболее важными переменными для количества мальпозиций. Так, у молодого хирурга уровень мальпозиций при коррекции деформаций может достигать 50 %, а у опытного не превышает 29 %. При этом количество опасных мальпозиций существенно выше у молодого хирурга, чем у врача с опытом работы 5 лет и более (Samdani A.F. et al., 2010; Gang C. Et al., 2012). Для уменьшения величины мальпозиций требуется опыт введения не менее 60 винтов, при условии, что молодой хирург хорошо владеет методикой введения винтов в позвонки с нормальной анатомией (Samdani A.F. et al., 2010). По другим данным, необходимо установить 80 транспедикулярных винтов, чтобы существенно минимизировать риск мальпозиций (Gonzalvo A. Et al., 2009). Некоторые авторы рекомендуют проводить с молодыми хирургами занятия по введению винтов на трупах, отмечая, что после четырех занятий уровень мальпозиций сокращается до величины, сопоставимой с той, которая бывает у опытных врачей (Bergeson R.K. et al., 2008).

Наибольшую осторожность следует проявлять при введении винтов в грудном отделе позвоночника. В затруднительных случаях следует прибегать к мини-ламинотомии с целью лучшей визуализации ножек позвонков или к проведению через поперечный отросток (Di Silvestre M. Et al., 2007). Наиболее уязвимыми зонами для повреждения винтами в грудном отделе является вогнутая сторона деформации. Проанализировав анатомическое строение ножек позвонков в грудном отделе у 53 пациентов со сколиозом, авторы разделили их на четыре типа, в зависимости от костного канала ножки позвонка. При типе А (61 %) ножка имеет большой канал из губчатой кости, при типе В (29 %) – ножка с малым губчатым каналом, при типе С (7 %) – кортикальный канал, при типе D (3 %) – нет канала. На выпуклой стороне деформации типы А и В обнаружены в 98,2 % случаев, на вогнутой – в 81,5 % (Watanabe K. Et al., 2010).

Точность введения винтов повышается при использовании для предоперационного планирования МСКТ с 3D-моделированием, что позволяет более точно спланировать точки введения винтов. Ее использование при груднопоясничных деформациях 42–78° повышает точность введения винтов до 94,1 % против 84,5 % без использования МСКТ с 3D (Su P. et al., 2012). Навигационная система позволяет избежать мальпозиций даже при ротации до 20° (Tian W., Lang Z., 2010). По сравнению с обычными методиками, применение навигационных систем позволяет снизить величину мальпозиций. При этом использование КТ-навигации предпочтительнее флюоронавигации (Tian N.F. et al., 2011), уровень мальпозиций типов В и С достигает не более 5 %, без необходимости повторных оперативных вмешательств (Amiot L.P. et al., 2000). Применение КТ-навигации повышает точность введения винтов у детей до 96,4 %, у взрослых – до 98,2 % (Larson A.N. et al., 2012).

Выявлено, что при использовании навигации 95,2 % винтов (из 37337 установленных) расположены корректно, без использования навигации – 90,3 % (Kosmopoulos V., Schizas C., 2007). По другим данным, величина

корректно установленных винтов с применением навигационного оборудования составляет 74,0 %, при методе freehand всего 42,0 %. Уровень опасных мальпозиций с использованием навигатора 3,0 %, без навигатора – 9,0 %. Риск возникновения потенциально опасных мальпозиций в 3,8 раза выше при использовании методики freehand, а медиальных – в 7,6 раза (Ughwanogho E. Et al., 2012). По другим данным, основанным на анализе 5992 винтов, применение навигации не показало статистически значимой выгоды с точки зрения профилактики нейрососудистых осложнений. Величина некорректно установленных с навигатором винтов достигает 39,8 % (Verma R. Et al., 2010). Интраоперационное использование дуги «O-arm» увеличивает точность введения винтов до 97,5 %, при этом в 2,5 % отмечалась мальпозиция, в 1,8 % она требовала повторного оперативного вмешательства (Van de Kelft E. Et al., 2012).

Ревизионные операции при мальпозиции винтов

По данным Hicks J.M. (2010) из 1436 пациентов с идиопатическим сколиозом 12 (0,83%) больных были реоперированы в связи с имевшейся мальпозицией транспедикулярных опорных элементов. Уровень реопераций из-за некорректного положения винтов при введении методом свободной руки достигает 7 % (Amiot L.P. et al., 2000). M. Di Silvestre с соавторами (2007) сообщили о проведении реоперации у 5 пациентов (4,3%). У трех пациент пациентов было удалено по одному винту, расположенных в грудном отделе позвоночника с бессимптомной мальпозицией, у 1 пациента был удален винт, вызвавший плеврит, и у 1 пациента удален винт, имевший латеральное смещение. S.I. Suk с соавторами (2001) сообщили об одном случае удаления транспедикулярного винта, вызвавшего явления преходящего парапареза, обусловленные повреждением медиальной стенки корня дуги с образованием эпидуральной гематомы. После удаления винта и эвакуации гематомы путем ламинэктомии неврологический дефицит был ликвидирован. U.R. Liljenqvist с соавторами (1997) провели одну реоперацию, удалив винт, который выходил за переднюю поверхность тела

позвонка на 3 мм, без признаков повреждения сосудов. T.R. Kuklo с соавторами (2005) сообщили об удалении 2-х винтов у 1 пациента без неврологического дефицита, имевших значительное медиальное смещение (более 4 мм). У 1 пациента удаление транспедикулярного винта была связано с давлением его на стенку аорты (Smorgick Y. et al., 2005)

Интраоперационный перелом корня дуги

Ряд авторов сообщают об интраоперационном повреждении корня дуги позвонка при проведении транспедикулярных винтов, отмеченном в 27 наблюдениях, что составило 0,50% от общего количества установленных винтов (Suk S.I. et al. 2001; Di Silvestre M. et al., 2007).

Легочные осложнения

M. Di Silvestre с соавторами (2007) сообщили о экссудативном плеврите, возникшем вследствие мальпозиции винта, потребовавшей его удаления.

Повреждение твердой мозговой оболочки

Ряд авторов отмечает повреждение дурального мешка при проведении транспедикулярных винтов (Suk S.I. et al., 2001; Kim Y.J. et al., Spine 2004; Di Silvestre M. et al., 2007, 2008). Соотношение повреждение твердой мозговой оболочки к общему количеству установленных винтов составило 0,35% (Suk S.I. et al., 2001; Di Silvestre M. et al., 2007, 2008). Во всех наблюдениях повреждения произошло с вогнутой стороны сколиотической дуги.

Неврологические осложнения

Неврологическое осложнение, заключающееся в развитии явлений преходящего парапареза, было отмечено Suk S.I. соавторами (2001) у одного из 1666 пациентов, вошедших в исследуемую группу. Lee S.S. с соавторами (2006) сообщили о развитии параплегии после проведения инструментальной коррекции деформации позвоночника с применением транспедикулярных опорных элементов.

Сосудистые осложнения

Ряд авторов отмечают конфликт между аортой и транспедикулярными винтами в 6 наблюдениях из 8147 (0,07% винтов), оказывающими давление на ее стенку (Liljenqvist U. et al., 1997; Kim Y.J., et al. 2004; Smorgick Y., et al. 2005; Di Silvestre M. et al., 2007, 2008; Lehman R.A. et al., 2007).

Смещение транспедикулярных винтов в ходе коррекции

В 38 наблюдениях (0,54%) из 6972 педикулярных винтов было отмечено смещение транспедикулярных винтов, произошедшее в ходе проведения корригирующих манипуляций при исправлении сколиотической деформации позвоночника (Liljenqvist U. Et al., 1997; Suk S.I. et al., 2001; Kim Y.J. et al., 2005; Smorgick Y. et al., 2005; Kuklo T.R. et al., 2005; Di Silvestre M. et al., 2007, 2008; Geck M.J. et al., 2007; Buchowski J.M. et al., 2009). Большинство смещений винтов происходило на вершине деформации позвоночника.

1.4. Анатомо-антропометрические особенности строения позвонков при идиопатическом сколиозе

Исследования, направленные на изучение анатомо-антропометрического строения позвонков шли параллельно с внедрением в практику ТПФ. После внедрения в практику спинальной хирургии Roy-Camille транспедикулярной фиксации, встал вопрос о возможности проведения транспедикулярных опорных элементов в тела позвонков, обусловленных анатомо-антропометрическими особенностями корней дуг (Roy-Camille R. et al., 1986). Появилось ряд исследований, посвященных нормальной анатомии позвонков, в которых проводилась оценка анатомо-антропометрических параметров позвонков с точки зрения применения транспедикулярной фиксации. Были детально изучены такие структуры как корень дуги позвонка грудного и поясничного отделов позвоночника, определены его вертикальные и горизонтальные размеры, углы ангуляции корней дуг относительно сагиттальной и горизонтальной плоскостей

(Zindrick M.R. et al., 1987; Krag M. et al., 1988). Изучены размеры тел позвонков: высота, ширина, передне-задний размер. Введены понятия: точка введения винта и длина винтового пути. Данные исследования носили прежде всего практический, прикладной характер и позволили разработать типоразмеры транспедикулярных винтов, создав целый ряд с необходимыми заданными размерами диаметра и длины резьбовой части винта, учитывающие анатомические особенности позвонков грудного и поясничного отделов.

Таким образом, изучение данных особенностей позволило обоснованно применить ТПФ у пациентов взрослого возраста с травматическими повреждениями грудного и поясничного отделов позвоночника (Zindrick M.R. et al., 1987; Krag M. et al., 1988; Vaccaro A. et al., 1995; Panjabi M. et al., 1997).

Широкое применение транспедикулярных винтов в качестве опорных элементов дорсальных спинальных систем обусловлено возможностью воздействия на все три колонны позвоночного столба при проведении корригирующих манипуляций во время исправления деформации позвоночника, достижением значительного эффекта от выполненной коррекции и сохранением надежной стабилизации достигнутого результата в отдаленный период наблюдения (Васюра А.С. с соавт., 2011; Михайловский М.В., Фомичев Н.Г., 2011; Suk S. I. et al., 1995). В 90-е годы XX века спинальные хирурги при оперативном лечении пациентов с идиопатическим сколиозом начали более широко использовать транспедикулярную фиксацию грудного отдела позвоночника (Suk S.I. et al., 1995; Liljenqvist U. et al., 1997; Kim Y.J. et al., 2004).

Работы, затрагивающие вопросы анатомо-антропометрических особенностей позвонков при идиопатическом сколиозе немногочисленны (Рубашкин С.А., 2008; Соболев А.В., 2015; Liljenqvist U.R. et al., 2000, 2002). Авторы рассматривают такие параметры позвонков как размеры корней дуг, длину винтового пути, углы ангуляции винтов. В последние годы появились

работы, в которых авторы проводили оценку анатомо-антропометрических параметров деформированных позвонков при идиопатическом сколиозе на кадаверном материале, а также на основании данных компьютерной и магнитно-резонансной томографии позвоночника (Catan H. et al., 2007; Liljenqvist U.R. et al., 2000; Parent S. et al., 2002). Однако, в этих публикациях рассматривались данные, касающиеся основных параметров сколиотически измененных позвонков, при различных типах искривления. В доступной литературе отсутствуют исследования, посвященные анализу анатомо-антропометрических параметров позвонков при одном варианте идиопатического сколиоза и оценке закономерностей этих особенностей в зависимости от типа искривления позвоночного столба.

Необходимо отметить, что в литературе имеются работы, указывающие на более точное определение значений параметров корней дуг позвонков у пациентов с идиопатическим сколиозом при помощи программного обеспечения навигационной станции по сравнению с данными, которые получают при проведении компьютерно-томографического исследования позвоночника. Так, S. Kuraishi с соавторами (2013), изучив морфологию позвонков у детей с идиопатическим сколиозом грудной локализации, выявили отличие значений поперечных диаметров корней дуг позвонков, полученных при стандартном компьютерно-томографическом исследовании позвоночника и при исследовании, выполненном в навигационной станции. Согласно данным проведенного анализа более точные результаты параметров костных структур позвонков были получены при их оценки с использованием навигационной станции. Интересны и неоднозначны выводы, сделанные авторами, изучавшими особенности анатомии позвонков по данным магнитно-резонансной томографии позвоночника. Так, H. Catan с соавторами (2007), изучив морфологию корней дуг у 13 подростков с идиопатическим сколиозом I, III и VI типов по L.Lenke, не обнаружили статистически значимой разницы между поперечными диаметрами корней дуг позвонков на выпуклой и вогнутой стороне при правостороннем типе

деформации в грудном отделе. Учитывая эти факты, важным моментом в достижении точности и достоверности анализа особенностей анатомо-антропометрических параметров структур позвонков в сколиотической дуге деформации является метод получения и оценки цифровых показателей.

Способы определения ротации позвонков

По данным литературы в настоящее время имеется несколько способов, позволяющих определить ротацию позвонка при идиопатическом сколиозе, на основании проведения анализа данных компьютерно-томографического исследования позвоночника (Aaro S., Dahlborn M., 1981; Ho E.K.W. et al., 1993; Gocen S. et al., 1998; Krismer M. et al., 1999).

Однако, необходимо отметить, что данные способы предназначены в основном для оценки ротации апикального позвонка, полностью не учитывают сложные пространственные структуральные изменения костных структур деформированных позвонков, входящих в сколиотическую дугу деформированного позвоночника.

Таким образом, при проведении анализа доступной литературы нами не найдены данные, отражающие закономерности изменения костных структур позвонков и их пространственных взаимоотношений при сколиотическом процессе, особенно при отдельных типах деформации.

1.5. Вопросы интраоперационной регистрации при использовании систем оптической 3D-КТ навигации

В отечественной литературе основная масса исследований, посвященная вопросам использования навигационных систем и ассистивных технологий в спинальной хирургии затрагивает область дегенеративно-дистрофических заболеваний и травматических повреждений позвоночника у взрослых (Белецкий А.В. с соавт., 2010; Новокшенов с соавт., 2010; Коновалов Н.А., 2010; Асютин Д.С., 2014; Каспарова К.А.). Сообщения об использовании системы активной оптической навигации при хирургическом

лечении детей с идиопатическим сколиозе носят единичный характер (Виссарионов С.В., 2014).

В зарубежной литературе основные публикации о использовании навигации для установки транспедикулярных винтов при деформациях позвоночника носят обзорный характер, анализируя эффективность данных методик на больших группах пациентов, разнородной категории по патологии позвоночника (Tian Nai-Feng, Xu Hua-Zi., 2011). Исследований, в которых детально рассматривались вопросы о методике и принципах использования навигации у пациентов детского возраста с идиопатическим сколиозом нам найти не удалось.

Публикации, рассматривающие особенности проведения интраоперационной регистрации по анатомическим ориентирам и регистрации по поверхности немногочисленны. Данные исследования не затрагивают и не раскрывают в полной мере сведения об использовании в качестве референтных точек анатомических ориентиров дорсальных структур позвонков с учетом особенностей грудного и поясничного отделов позвоночника у детей с идиопатическим сколиозом. Не определена целесообразность применения регистрации по поверхности у детей с идиопатическим сколиозом (Tamura Y. Et al., 2005; Wang M., Song Z., 2013). Остаются спорными вопросы выбора проведения одноуровней (single-level registration - для регистрации используется один позвонок) и многоуровневой регистрации (multilevel registration – используются референтные точки, расположенные сразу на нескольких позвонках) по анатомическим ориентирам (Papadopoulos E.C. et al., 2005; Takahashi J. et al., 2010; Shimizu M. et al., 2014).

1.6. Резюме

Проведенный анализ литературы по проблеме хирургического лечения детей с идиопатическим сколиозом показал, что до настоящего времени не проводился детальный анализ особенностей использования системы

активной оптической 3 D-КТ навигации. Отсутствуют данные, описывающие анатомо-антропометрические особенности и пространственные взаимоотношения костных структур позвонков с учетом закономерностей сколиотического процесса, приводящего к развитию асимметрии. До конца не изучены и не раскрыты возможности оптической навигации в плане корректной установки транспедикулярных опорных элементов в деформированные позвонки у пациентов детского возраста с идиопатическим сколиозом.

При проведении анализа специальной литературы не получено точных сведений относительно особенностей использования системы навигации, отсутствует четкий и общепризнанный алгоритма выбора оптимальной методики применения системы активной оптической 3D-КТ навигации при хирургическом лечении детей с идиопатическим сколиозом.

ГЛАВА 2

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Характеристика клинических наблюдений

Работа основана на анализе результатов обследования 96 пациентов (18 (18,8%) пациентов мужского пола и 78 (81,3%) больных женского пола) в возрасте от 14 до 18 лет с идиопатическим сколиозом 3 и 4 степени грудной, грудопоясничной и поясничной локализации. Все дети с идиопатическим сколиозом проходили обследование и лечение в отделении патологии позвоночника и нейрохирургии ФГБУ «НИДОИ им. Г.И. Турнера» Министерства здравоохранения Российской Федерации в период с 2011 по 2015 год.

Основную группу составили 66 пациентов с идиопатическим грудным, грудопоясничным и поясничным сколиозом 3-4 степени. В данной группе больных проводили анализ анатомо-антропометрических параметров и пространственных взаимоотношений костных структур позвонков в программе SpineMap3D системы активной оптической 3D-КТ – навигации фирмы Stryker Leibiniger (Германия). Кроме того, у этих же пациентов оценивали корректность и стабильность транспедикулярных винтов корригирующей металлоконструкции, установленных в ходе хирургического вмешательства с применением навигационной станции у детей с идиопатическим сколиозом. В контрольную группу вошло 30 пациентов с идиопатическим сколиозом аналогичной локализации, которым установку транспедикулярных опорных элементов дорсальной спинальной системы осуществляли методом «свободной руки».

Степень тяжести сколиотической деформации позвоночника определяли на основании классификации идиопатического сколиоза В.Д. Чаклина (1963), согласно которой: I степень – до 10°, II степень – 11–30°, III степень – 31–60°, IV степень – более 60°.

Для определения типа деформации, локализации и структуральности сколиотических дуг ее образующих, использовали классификацию идиопатического сколиоза, разработанную L. Lenke с соавторами (Lenke L.G. et al., 2001).

В основной группе наблюдения 13 (19,7%) пациентов были мужского пола и 53 (80,3%) пациентов – женского пола, средний возраст пациентов составил $15,4 \pm 0,6$ года. В контрольной группе наблюдения 5 (16,7%) пациентов были мужского пола и 25 (83,3%) пациентов – женского пола, средний возраст пациентов - $15,9 \pm 0,8$ года (рис. 1, табл. 1).

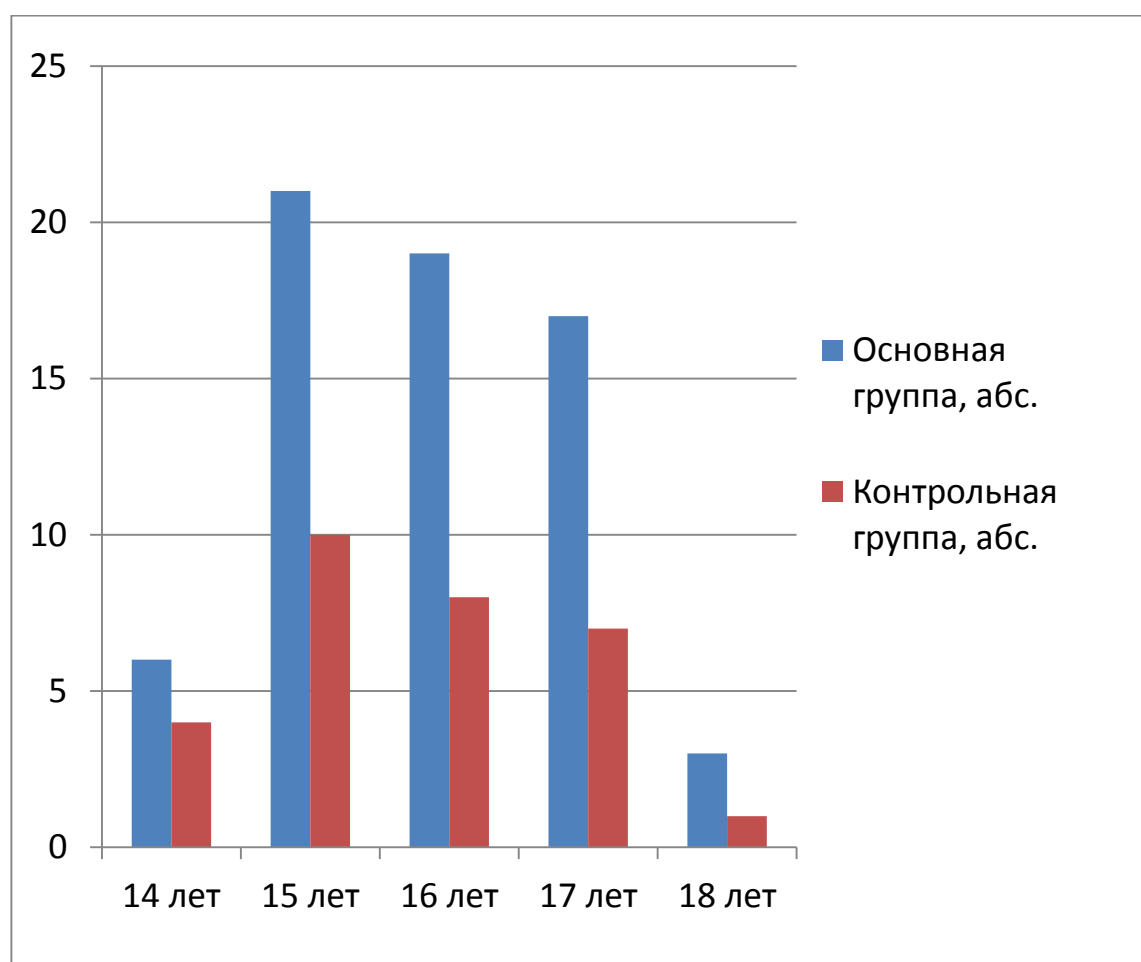


Рис. 1. Распределение пациентов по возрасту в основной и контрольной группах

Таблица 1

Распределение пациентов по возрасту в основной и контрольной группах

Возраст, лет	Основная группа		Контрольная группа	
	абс.	%	абс.	%
14	6	9,1	4	13,4
15	21	31,8	10	33,3
16	19	28,8	8	26,7
17	17	25,8	7	23,3
18	3	4,5	1	3,3
Всего	66	100	30	100

В основной группе наблюдения у 11 (17%) пациентов диагностирована 3 степень и у 55 (83%) - 4 степень сколиотической деформации позвоночника, в контрольную группу наблюдения вошло 6 (20%) пациентов с 3 степенью и 24 (80%) – с 4 степенью сколиотической деформации позвоночника соответственно (рис. 2, 3).

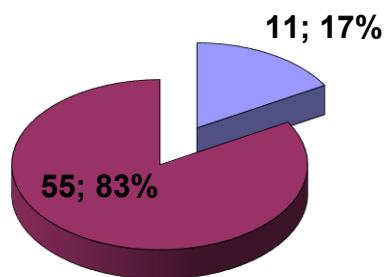


Рис. 2. Распределение пациентов по тяжести деформации в основной группе

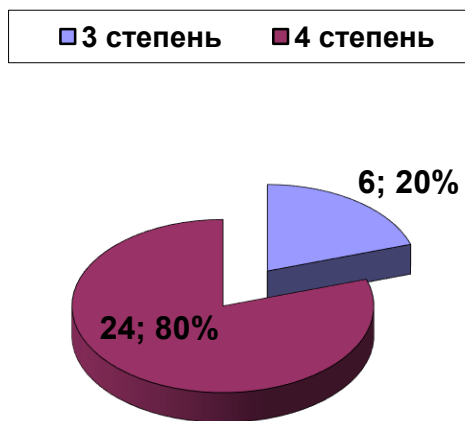


Рис. 3. Распределение пациентов по тяжести деформации в контрольной группе

Согласно классификации L. Lenke, в основной группе наблюдения I тип деформации имели 40 (60,6%) пациентов, V тип деформации - 26 (39,4%) детей. В контрольной группе наблюдения I тип деформации имели 18 (60%) пациентов, V тип деформации - 12 (40%) детей (табл. 2).

Таблица 2

Распределение пациентов по типу сколиотической деформации в основной и контрольной группах (n=96)

Группа	Тип деформации			
	I		V	
	абс.	%	абс.	%
Основная	40	60,6	26	39,4
Контрольная	18	60	12	40

Направленность сколиотических дуг при всех типах деформаций была характерной для идиопатического сколиоза. Все грудные дуги искривления при I типе сколиоза в основной группе наблюдения имели правостороннюю направленность, все грудопоясничные и поясничные сколиотические дуги при V типе являлись левосторонними. В контрольной группе пациентов сколиотические дуги грудной локализации при I типе деформации также все

были правосторонними, сколиотические дуги грудопоясничной и поясничной локализации при V типе идиопатического сколиоза имели левостороннюю направленность.

Коррекцию сколиотической деформации у пациентов основной и контрольной групп в зависимости от величины ведущей сколиотической дуги и мобильности деформации осуществляли по трем стандартным тактическим вариантам, применяемых на отделении патологии позвоночника и нейрохирургии ФГБУ «НИДОИ им. Г.И. Турнера».

Вариант I (мобильная сколиотическая дуга с углом деформации 40—80° по Cobb) - на фоне интраоперационного гало-тибиального вытяжения выполняли коррекцию деформации позвоночника дорсальным CDI в сочетании с задним локальным спондилодезом аутотрансплантатами вдоль металлоконструкции. Вариант II (мобильная сколиотическая дуга с углом деформации 82—100° по Cobb) - операцию выполняли одномоментно из двух доступов. Первым этапом из переднебокового доступа осуществили дискэктомию и межтеловой корпородез на вершине основной дуги искривления, затем на фоне гало-тибиального вытяжения из дорсального подхода осуществляли коррекцию деформации позвоночника многоопорной металлоконструкцией в сочетании с задним локальным спондилодезом аутотрансплантатами вдоль спинального имплантата. При III варианте (ригидная сколиотическая дуга с углом деформации более 100° по Cobb) выполняли трехкомпонентное хирургическое лечение по Ю.И.Позднику. Первый этап — передний релиз на вершине дуги искривления из переднебокового доступа с межтеловым корпородезом и гало-фemorальным вытяжением. Во время второго этапа в течение 14—16-дней проводили курс гало-фemorального вытяжения с постепенным увеличением массы тракционных грузов до 40 % массы тела, с корригирующими укладками. Третий этап включал коррекцию деформации позвоночника многоопорной металлоконструкцией в сочетании с задним локальным спондилодезом аутокостью на фоне продолжающегося гало-фemorального вытяжения на

операционном столе. В основной и контрольной группах распределение пациентов по тактическим вариантам, применяемых для коррекции сколиотической деформации было идентичным (табл. 3).

Таблица 3

Распределение пациентов по характеру и объему выполненных операций в основной и контрольной группах (n=96)

Объем операций	Группа			
	Основная		Контрольная	
	абс.	%	абс.	%
Коррекция деформации позвоночника дорсальным CDI, задний локальный спондилодез.	18	27,3	8	26,7
Дискапофизэктомия, корпородез. Коррекция деформации позвоночника дорсальным CDI, задний локальный спондилодез.	18	27,3	8	26,7
Дискапофизэктомия, корпородез. Курс гало-фemorального вытяжения. Коррекция деформации позвоночника дорсальным CDI, задний локальный спондилодез.	30	45,4	14	46,6
Всего	66	100	30	100

Таким образом, на основании исходных данных (по полу, возрасту, типу и степени деформации), а также направленности основной дуги деформации и вариантах хирургической коррекции сколиотической деформации в основной и контрольной группах достоверных различий выявлено не было. Срок наблюдения в основной группе пациентов составил

от 3 до 5 лет ($3,4 \pm 0,5$ года), а в контрольной группе – от 3 до 5,5 лет ($3,9 \pm 0,9$ лет).

Для отбора пациентов в исследование были разработаны критерии включения и исключения.

Критерии включения:

1. Идиопатические грудные, грудопоясничные и поясничные сколиозы, III–IV степени.
2. Возраст пациентов – от 14 до 18 лет.
3. Время набора материала.
4. Проведение хирургического лечения в отделении патологии позвоночника и нейрохирургии ФГБУ «НИДОИ им.Г.И. Турнера» Минздрава России (г.Санкт-Петербург).
5. Одна оперирующая бригада.
6. Единая методика хирургического лечения.
7. Катамнез не менее трех лет.
8. Клинико-рентгенологическое обследование.
9. Единое послеоперационное ведение пациентов.
10. Согласие на участие в исследовании для основной группы.

Критерии исключения:

1. Возраст пациентов до 14 лет и старше 18 лет.
2. Пациенты с наличием врожденной патологии позвоночника и спинного мозга, а также с системной патологией.
3. Пациенты с наличием неврологической патологии в анамнезе, а также неврологическими нарушениями при клиническом осмотре.
4. Пациенты с соматической патологией на момент осмотра.
5. Отказ от участия в исследовании для основной группы.

Контрольное обследование осуществляли непосредственно после хирургического вмешательства, затем через 6, 12, 18 месяцев и в дальнейшем 1 раз в год на протяжении 3–5 лет (основная группа) и 3–5,5 лет (контрольная группа).

Согласно результатам обследования ни в основной, ни в контрольной группах достоверных различий ни по одному из критериев выявлено не было, что позволяет проводить дальнейшие исследования.

2.2. Методы исследования

В ходе исследования использовали лучевой (рентгенологический и компьютерную томографию), анатомо-антропометрический метод, метод оценки погрешности интраоперационной регистрации в навигационной установке, хронометрический и статистический методы.

2.2.1. Рентгенологический метод исследования

Рентгенографию позвоночника выполняли на рентгеновском аппарате «Philips Digital Diagnost» (Голландия). Рентгенограммы пациенту выполняли стоя и лежа в прямой и боковой проекции, а также в положении максимальных боковых наклонов вправо и влево (bending-test) с целью оценки мобильности деформированного отдела позвоночника. По рентгеновским снимкам оценивали величины ведущей дуги сколиотической деформации, компенсаторных противоискривлений, сагиттальный профиль позвоночника, протяженность дуг. Измерение проводили в градусах по методу Cobb (1948). Тип сколиотической деформации определяли на основании классификации L.Lenke (2001).

2.2.2. Мультиспиральная компьютерная томография

Исследование выполняли на компьютерном томографе «Brilliance CT64» (Philips-США). Всем больным предоперационное обследование осуществляли в положении лежа на животе (prone position) с целью максимального приближения к положению больного на операционном столе. КТ сканирование проводили от уровня Th1 до S1 позвонка включительно. Параметры сканирования были следующие: толщина среза – 1,0 мм, размер матрицы 512*512 пикселей. Пациентам обеих групп исследования в

послеоперационном периоде выполняли КТ-исследование позвоночника с целью оценки корректности установки транспедикулярных винтов корригирующей многоопорной металлоконструкции.

Корректность положения установленных транспедикулярных опорных элементов оценивали на основании шкалы, предложенной S.D. Gertzbein et al. (1990), где Grade 0 (full correct) – транспедикулярный винт полностью находится в корне дуги, не контактируя с прилежащим мягкими тканями, Grade I – смещение транспедикулярного опорного элемента относительно кортикала корня дуги до 2 мм, Grade II – смещение винта находится в пределах от 2 до 4 мм, Grade III – более 4 мм (рис. 4).

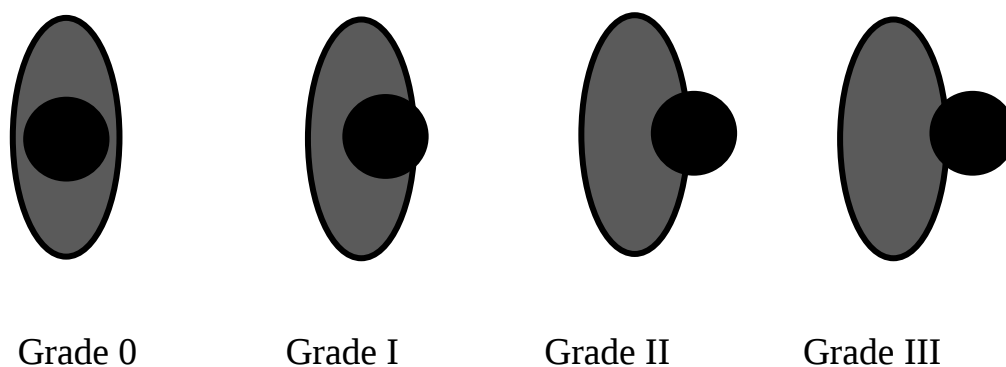


Рис. 4. Оценка корректности положения транспедикулярного винта относительно корня дуги, в мм

2.2.3. Анатомо-антропометрический метод

Для оценки анатомо-антропометрических особенностей костных структур деформированных позвонков, входящих в дугу искривления, КТ-сканы с толщиной среза 1 мм и размером матрицы 512 X 512 пикселей, полученные при проведении компьютерной томографии позвоночника на протяжении от Th1 до S1 позвонка, при помощи носителя импортировали в программную среду SpineMap 3D системы активной оптической 3D-КТ навигации. Из массива слайсов программа SpineMap 3D строила трехмерную модель позвоночника, в которой проводили выбор любой необходимой плоскости сечения в пространстве для проведения оценки структур

позвонков. Таким образом, достигалась возможность точного измерения анатомических параметров костных структур деформированного отдела позвоночника и их пространственных взаимоотношений в режиме просмотра костных структур. На основе трехмерной КТ-реконструкции в планирующей станции в плоскости относительно тела каждого позвонка измеряли внешний поперечный и продольный диаметры правого и левого корней дуг.

Полученные данные измерений фиксировали и с целью предоперационного планирования заносили в разработанную нами таблицу (рис. 5, табл. 4).

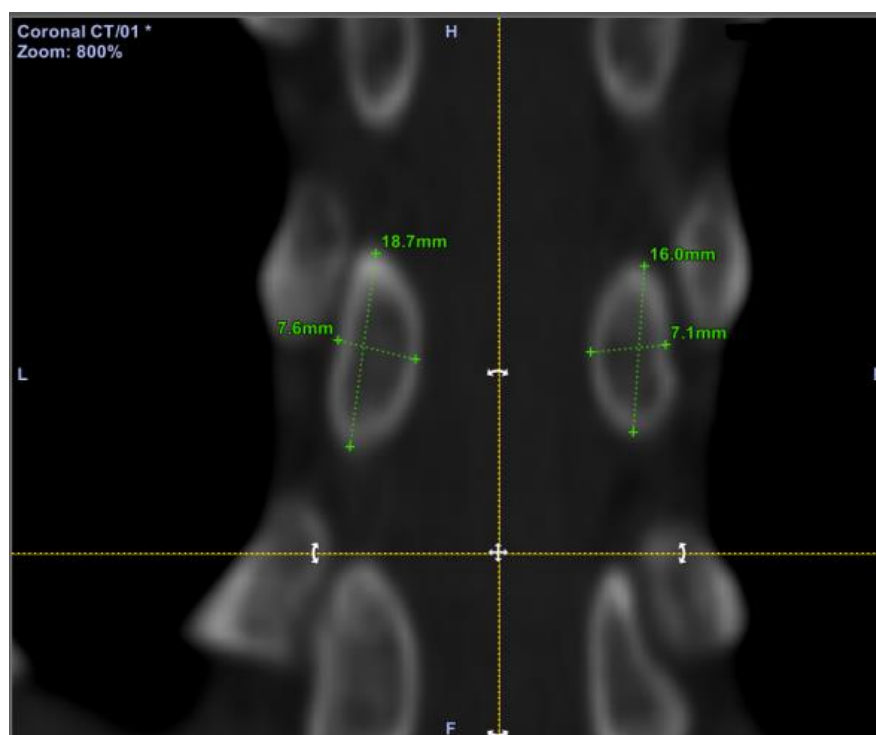


Рис. 5. Оценка анатомических особенностей костных структур позвонков в программной среде SpineMap 3D системы активной оптической 3D-КТ навигации

Таблица 4

Размеры поперечного и продольного внешних диаметров корней дуг
ПОЗВОНКОВ

Позвонок	trdR, мм	lngdR, мм	trdL, мм	lngdL, мм
Th2				
Th3				
Th4				
Th5				
Th6				
Th7				
Th8				
Th9				
Th10				
Th11				
Th12				
L1				
L2				
L3				
L4				
L5				

Примечание: trdR - поперечный диаметр правого корня дуги позвонка, в мм; lngdR - продольный диаметр правого корня дуги, в мм; trdL - поперечный диаметр левого корня дуги позвонка, в мм; lngdL - продольный диаметр левого корня дуги позвонка, в мм.

После получения антропометрических результатов рассчитывали площади правого (SR) и левого корня дуги (SL) как произведение поперечного диаметра корня дуги на его продольный диаметр. С целью выявления закономерностей сколиотического процесса, характеризующегося асимметричным развитием костных структур позвонков, нами были введены следующие коэффициенты: K_{Atrd} - коэффициент асимметрии поперечных диаметров корней дуг позвонка, определяемый как отношение $trdR$ к $trdL$; K_{AIng} - коэффициент асимметрии продольных диаметров корней дуг позвонка, определяемый как отношение $IngdR$ к $IngdL$ и K_{AS} - коэффициент асимметрии площадей корней дуг позвонка, определяемый как отношение SR к SL .

Определяли общий угол сколиоза (angle scoliosis), ротацию апикального позвонка (РАП), ротацию проксимального (РППП) и дистального (РДПП) периапикальных позвонков. Необходимо отметить, что точное числовое определение величины патологической ротации апикального и особенно периапикальных позвонков, образующих вершину дуги сколиотической деформации, выраженное в градусах, затруднительно, что обусловлено выраженными пространственными изменениями соотношений анатомических структур деформированных позвонков у детей с идиопатическим сколиозом, а также невозможностью оценки ротации периапикальных позвонков в одной плоскости с апикальным. С целью повышения точности определения ротации апикального позвонка и позвонков периапикальной зоны сколиотической деформации позвоночника нами разработан способ измерения ротации тел позвонков в навигационной станции у детей с идиопатическим сколиозом, при котором одна из линий проводится через точку на основании остистого отростка позвонка и через точку на переднем крае тела позвонка, максимально удаленную от точки на основании остистого отростка, вторая линия ориентирована перпендикулярно к горизонтальной плоскости стола в навигационной системе до пересечения с первой линией (патент РФ №2587035 от

19.05.2016). Угол, образованный между пересекающимися линиями, является углом ротации позвонка (рис. 6).



Рис 6. Способ измерения ротации тел позвонков у детей с идиопатическим сколиозом в навигационной станции

2.2.4. Метод оценки погрешности интраоперационной регистрации в навигационной установке

В ходе интраоперационной регистрации определяли и фиксировали различные варианты анатомических ориентиров дорсальных костных структур позвонков, составляющих основную сколитическую дугу деформации позвоночника. С этой целью на костных структурах задней опорной колонны позвонков деформированного отдела позвоночника формировали определенный набор референтных точек, используемых в ходе регистрации. Определяли количество референтных точек, собранных при проведении одной процедуры регистрации по анатомическим ориентирам (рис. 7).

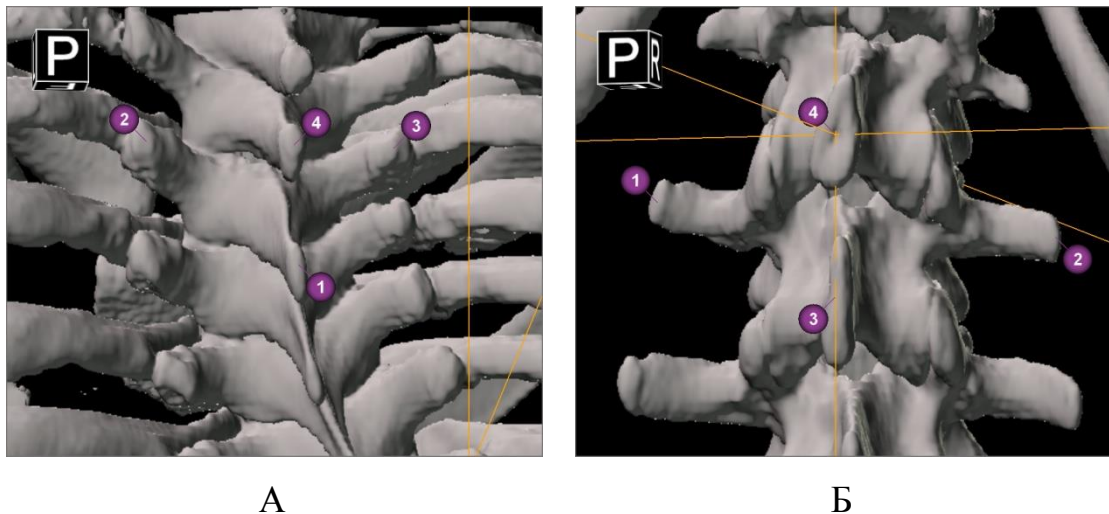


Рис 7. Набор референтных точек для регистрации по анатомическим ориентирам: А - в грудном отделе позвоночника; Б – в поясничном отделе позвоночника

Кроме регистрации по анатомическим ориентирам проводили дополнительную регистрацию по поверхности задних костных структур определенного позвонка. Определяли направление и последовательность сбора массива точек. Оценивали расположение «собранных» точек на дорсальных костных структурах позвонка, на котором была проведена процедура регистрации по поверхности (рис. 8).

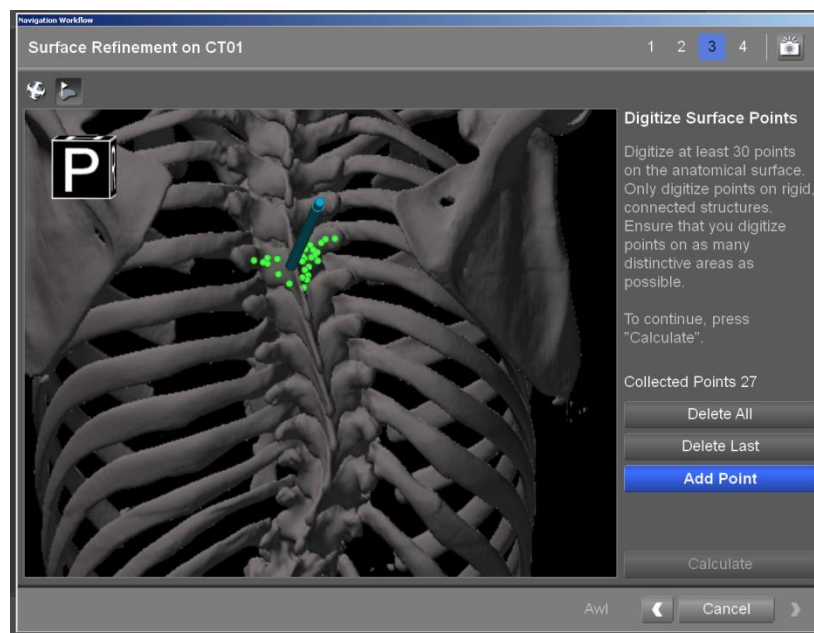


Рис 8. Сбор точек при регистрации по поверхности

Такая последовательность регистрации по анатомическим ориентирам (RegAnMD) и по поверхности задних костных структур позвонков (RegSurMD) позволяла уменьшить среднеквадратичную погрешность измерений с целью дальнейшего максимально точного формирования костных каналов для установки транспедикулярных опорных элементов. (рис. 9 А, Б).

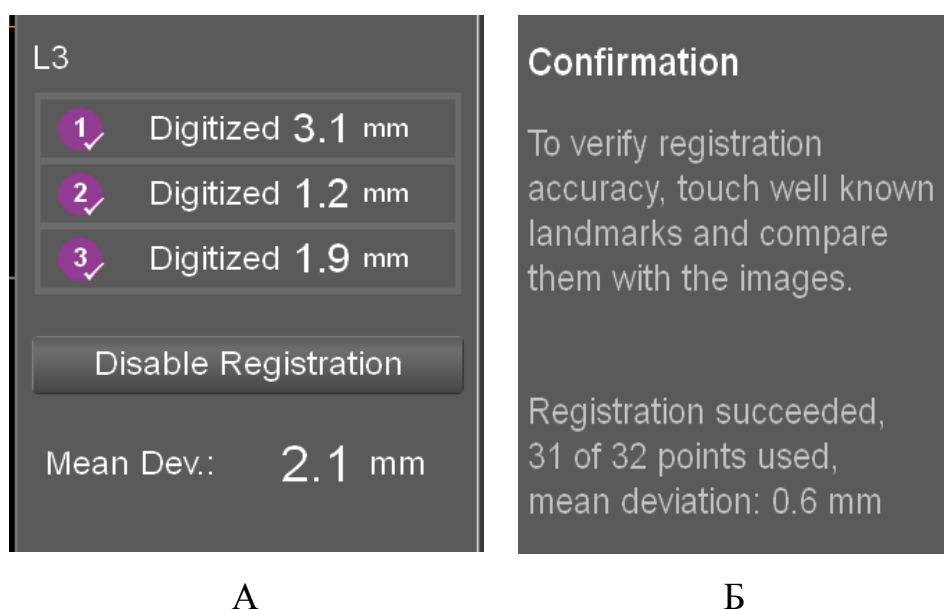


Рис 9. А - оценка среднеквадратичной ошибки при регистрации по анатомическим ориентирам; Б – оценка среднеквадратичной ошибки при регистрации по поверхности

2.2.5. Хронометрический метод

При работе в операционной на этапе навигации проводили мониторинг времени при помощи секундомера. Фиксировали временные характеристики работы с навигационным оборудованием в операционной.

T traker – время, затрачиваемое на установку нулевого трекера. Длительность T traker учитывали от момента установки нулевого трекера за остистый отросток позвонка до его регистрации в навигационной станции.

T regAn – время, затрачиваемое на проведение регистрации по анатомическим ориентирам (anatomical landmarks). Длительность T regAn

учитывали от момента регистрации первой точки до момента окончания верификации точности регистрации по анатомическим ориентирам задних костных структур позвонка.

T regSur – время, затрачиваемое на проведение регистрации по поверхности (surface registration). Длительность T regSur учитывали от момента регистрации первой точки до момента окончания верификации точности регистрации по поверхности задних костных структур позвонка.

T screwCan – время, затрачиваемое на формирование костного канала для установки транспедикулярного винта. Длительность T screwCan определяли от момента установки шила в зону введения транспедикулярного винта до завершения верификации канала пуговчатым зондом. Полученные данные заносили в специально разработанные для этого протоколы исследования (табл. 5, табл. 6).

Таблица 5

Мониторинг времени, затрачиваемого на регистрацию по анатомическим ориентирам и по поверхности

Ф.И.О.:_____Возраст:_____				
Тип деформации:_____Величина деформации:_____				
Объем операции:_____				
Позвонок	T regAn, с	RegAnMD, мм	T regSur, с	RegSurMD, мм
Th2				
Th3				
Th4				
Th5				
Th6				
Th7				
Th8				
Th9				
Th10				
Th11				
Th12				
L1				
L2				
L3				
L4				
L5				

Таблица 6

Мониторинг времени, затрачиваемого на формирование костных каналов для
транспедикулярных винтов

Ф.И.О.: _____ Возраст: _____				
Тип деформации: _____ Величина деформации: _____				
Объем операции: _____				
Позвонок	T screwCanR,с	Примечание	T screwCanL, с	Примечание
Th2				
Th3				
Th4				
Th5				
Th6				
Th7				
Th8				
Th9				
Th10				
Th11				
Th12				
L1				
L2				
L3				
L4				
L5				

*T screwCanR - время, затрачиваемое на формирование костного канала для проведение транспедикулярного винта с правой стороны позвоночника относительно линии остистых отростков; T screwCanL - время, затрачиваемое на формирование костного канала для проведение транспедикулярного винта с левой стороны позвоночника относительно линии остистых отростков.

В графу «Примечание» заносили отметки о возможных проблемах, которые могут возникнуть в ходе формирования костного канала и при проведении транспедикулярного опорного элемента (склероз корня дуги, невозможность корректно сформировать костный канал для транспедикулярного винта, отклонение траектории винта при проведении его в тело позвонка, смещение опорного элемента в ходе проведения коррекции деформации позвоночника).

2.2.6. Статистический метод исследования

Статистическая обработка проведена с использованием пакета программы Statistika 6,0. Количественные показатели обработаны статистически с вычислением средней арифметической (M), ее ошибки (m) и стандартного отклонения по выборке (σ). Достоверность различий между группами наблюдений оценивалась с использованием программы в среде MS EXCEL 2010 по непараметрическому парному критерию Стьюдента с двухсторонним распределением и определением показателя статистической достоверности. Достоверными считались различия показателей при уровне значимости $P < 0,05$. Описательные статистики были вычислены для сопоставления всех исследуемых анатомо-антропометрических характеристик позвонков и различных коэффициентов асимметрии. Для сравнения распределений метрических характеристик позвонков по позвоночнику применялся многомерный дисперсионный анализ, и вычислена T^2 –статистика Хотеллинга. Для проверки нормальности маргинальных распределений применялся критерий Колмогорова-Смирнова. Корреляционный анализ и метод корреляционных плеяд В.П. Терентьева, а также визуальный анализ диаграмм Тьюки были применены для выявления закономерностей связей между характеристиками.

ГЛАВА 3. ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМЫ ОПТИЧЕСКОЙ 3D-КТ-НАВИГАЦИИ ПРИ ХИРУРГИЧЕСКОМ ЛЕЧЕНИИ ДЕТЕЙ С ИДИОПАТИЧЕСКИМ СКОЛИОЗОМ

3.1. Принципы работы навигационной станции. Навигационный инструментарий

В главе изложены основные принципы и особенности работы навигационной станции Cart II фирмы «Stryker» (США) в процессе хирургического лечения детей с идиопатическим сколиозом.

Данное навигационное оборудование по своему принципу работы относится к системам активной оптической 3-D-КТ навигации. Передача сигнала происходит оптическим путем и осуществляется посредством световых волн в инфракрасном диапазоне излучения. Способ излучения оптических волн является активным, что означает передачу сигнала от инфракрасных светодиодов навигационного инструментария к следящей камере навигационной станции при нажатии хирургом на управляющие клавиши в ходе оперативного вмешательства. Предоперационное планирование в этих системах осуществляется на основании данных, полученных при выполнении пациенту мультиспиральной компьютерной томографии позвоночника перед хирургическим вмешательством.

Навигационная станция состоит из трех основных частей: 1 - следящая камера, 2 - компьютер и мониторы, 3 - инструменты с активными излучателями в инфракрасном диапазоне.

Следящая камера с тремя светоприемниками, работающая на основе активной инфракрасной технологии, позволяет обеспечить быстрый обмен данными и отсутствие дрожания виртуального изображения за счет уверенного приема инфракрасного сигнала и большого диаметра рабочей сферы (диаметр сферы - 1,25 м). Физическая погрешность передачи данных путем активной инфракрасной технологии составляет 0,07 мм.

Системный блок навигационной станции оснащен программным обеспечением Spine Map 3D, работающим на основе матричных алгоритмов (рис. 10).



Рис. 10. Навигационная станция

Навигационные инструменты, необходимые для осуществления работы в ходе хирургического вмешательства при установке транспедикулярных опорных элементов у детей с идиопатическим сколиозом, включают в себя: трекер пациента (нулевой трекер), устройство для валидации («ромб»), навигационное шило и педикулярный зонд. Трекер пациента предназначен для фиксации нулевой точки трехмерной системы координат в пространстве, позволяя осуществить «привязку» виртуальной поверхности 3D модели позвоночника к реальной поверхности костных структур позвоночника пациента, находящегося на операционном столе (рис. 11).

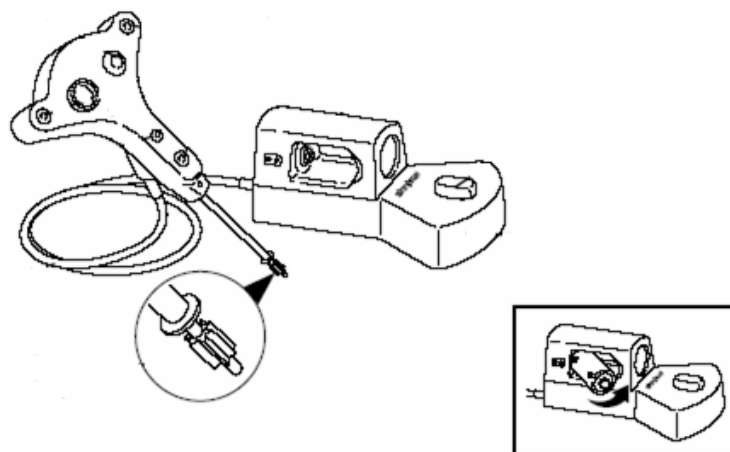


Рис. 11. Схема устройства трекера пациента

Устройство для валидации (калибровки) навигационного шила и педикулярного зонда оснащено: кнопкой включения, предназначенной для активации валидатора и сопряжения его с последними; световыми датчиками, обеспечивающими индикацию включения и индикацию батареи; регистрационным диском, предназначенным для определения положения инструмента в целом и его рабочей части (кончика) в пространстве; держателем батареи - для 3V 2CR батарей; пятью инфракрасными светодиодами (LED) - для слежения и связи с компьютером навигационной станции (рис. 12).



Рис. 12. Калибровочное устройство (навигационный «ромб»)

Навигационные инструменты (шило и педикулярный зонд) оснащены: контрольными кнопками, предназначенными для смены функций инструмента и управления программой Spine Map 3D; индикатором включения и индикатором батареи; держателем батареи - для 3V 2CR батарей, инфракрасными светодиодами - для слежения и связи инструментов с системой навигации (рис. 13).

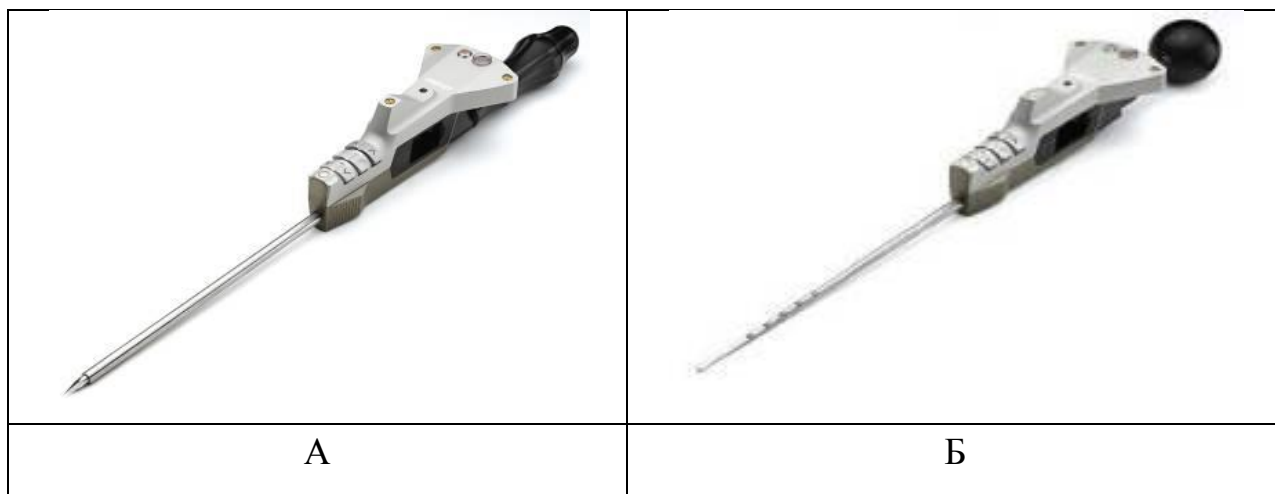


Рис. 13. Навигационные инструменты

А – шило, Б – педикулярный зонд

С позиций методологического подхода в работе с навигационной станцией можно выделить три этапа: 1 этап – предоперационное обследование пациента, 2 этап – предоперационное планирование в навигационной станции, 3 этап – интраоперационная навигация.

Каждый из выше перечисленных этапов работы обладает своими особенностями и спецификой у пациентов детского возраста, которые необходимо учитывать и соблюдать для достижения правильной работы навигационной установки в ходе хирургического вмешательства. Необходимо также отметить, что система помогает хирургу корректно и правильно установить транспедикулярные опорные элементы с учетом анатомо-антропометрических особенностей и пространственного взаимоотношения костных структур деформированных позвонков, входящих в сколиотическую дугу искривления.

3.2. Особенности предоперационного обследования пациента с идиопатическим сколиозом

Всем детям с идиопатическим сколиозом выполняли стандартное предоперационное обследование, включающее в себя мультиспиральную компьютерную томографию (МСКТ) деформированного сегмента позвоночника в положении пациента лежа на животе. Отличительной особенностью проведения МСКТ в таком положении (prone position) необходимо с целью максимального приближения пространственных взаимоотношений структур позвонков, составляющих сколиотическую дугу деформации виртуальной 3D-модели к позиции позвоночника пациента, находящегося на операционном столе в ходе хирургического вмешательства. Это являлось важным моментом, т.к. данный прием обеспечивал уменьшение затрат времени, связанных с процедурой интраоперационной регистрации. Следующей особенностью является проведение МСКТ сканирования от уровня Th1 до S1 позвонков, с соблюдением необходимых параметров сканирования: аксиальная проекция, угол Джентри - 0° , толщина срезов постоянная и равна – 1,0 мм, размер матрицы 512*512 пикселей. Затем, полученные данные МСКТ импортировали при помощи электронного носителя в планирующую систему навигации, оснащенную программным обеспечением SpineMap 3D, где в последующем выполняли обработку данных и предоперационное планирование.

3.3. Особенности предоперационного планирования в навигационной станции

Этап предоперационного планирования, проводимого в компьютере навигационной системы, включал в себя обработку данных полученного трехмерного изображения позвоночника в программной среде SpineMap3D. Интерфейс программы SpineMap3D представлен в виде последовательно организованных вкладок: Home, 1.Image Sets, 2.Patient, 3.Planning, 4.Registration Planning, 5.System Setup, 6.Registration, 7.Navigation

Вкладки с пункта 1 по пункт 4 относятся к этапу предоперационного планирования, вкладки с пункта 5 по пункт 7 – используются в ходе интраоперационного этапа работы с навигационной станцией.

Интерфейс программы представлен в виде области просмотра графических изображений, разделенной на четыре окна, и панели управления с дополнительными настройками, расположенной справа относительно области просмотра. В окнах области просмотра, расположенных в левом и правом верхних квадрантах монитора, отображается графическая информация сечения трехмерной реконструкции позвоночника в аксиальной и сагиттальной плоскостях соответственно. В окнах, расположенных в левом и правом нижних квадрантах монитора, отображается графическая информация сечения трехмерной реконструкции позвоночника во фронтальной плоскости и объемная 3D-модель позвоночника. Панель управления с дополнительными настройками содержит вкладки, предназначенные для проведения различных процедур в ходе предоперационного планирования (рис. 14).

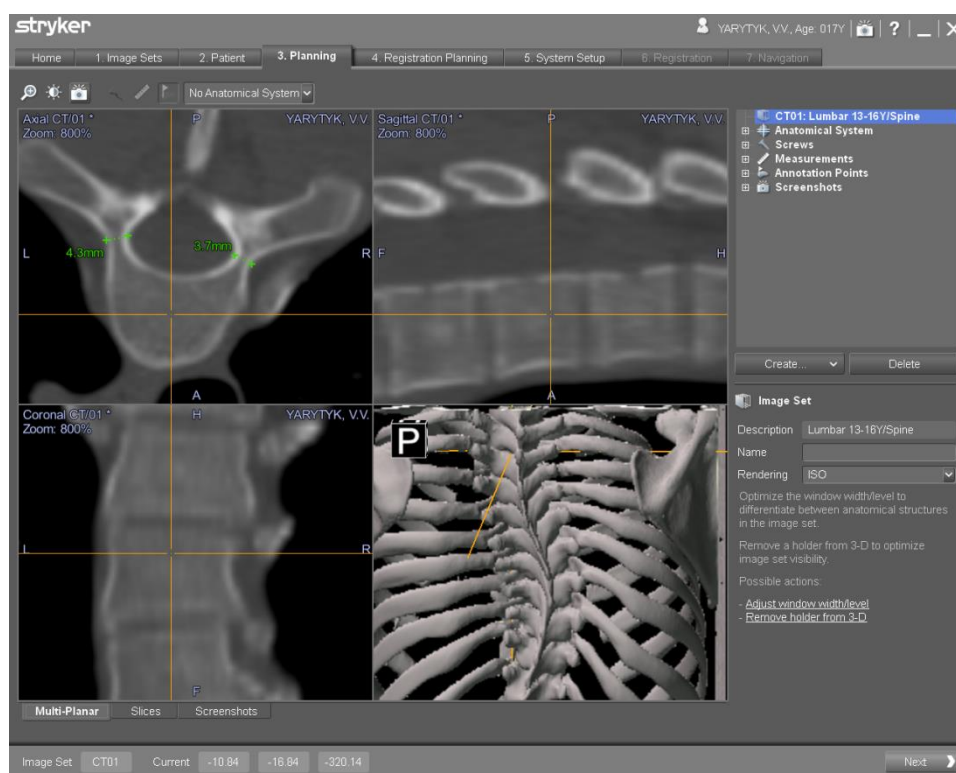


Рис. 14. Интерфейс программы SpineMap3D

При осуществлении предоперационного этапа работы в навигационной станции с 3D-реконструкцией позвоночника нами была создана определенная последовательность действий, позволяющая оптимизировать и повысить эффективность использования программной среды SpineMap3D при хирургическом лечении детей с идиопатическим сколиозом. Особенность проведения этапа планирования (вкладка №3 «Planning») у детей с идиопатическим сколиозом на трехмерной реконструкции деформированного позвоночника заключалась в оценке комплектности позвонков, составляющих грудной и поясничный отделы (рис. 15).

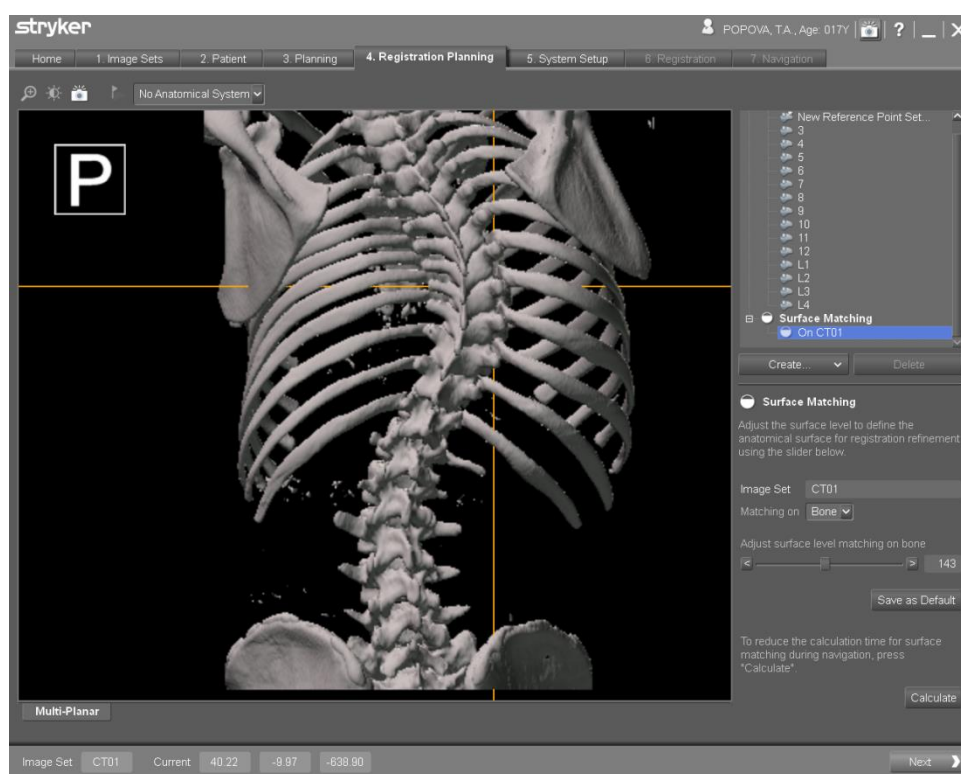


Рис. 15. 3D-реконструкция позвоночника пациента П., 17 лет с правосторонним идиопатическим сколиозом грудной локализации

Очередным важным моментом предоперационного планирования являлась трансформация 3D-реконструкции деформированного позвоночника из режима твердотельной модели в режим «X-ray». После

этого осуществляли измерение основной сколиотической дуги искривления (рис. 16).

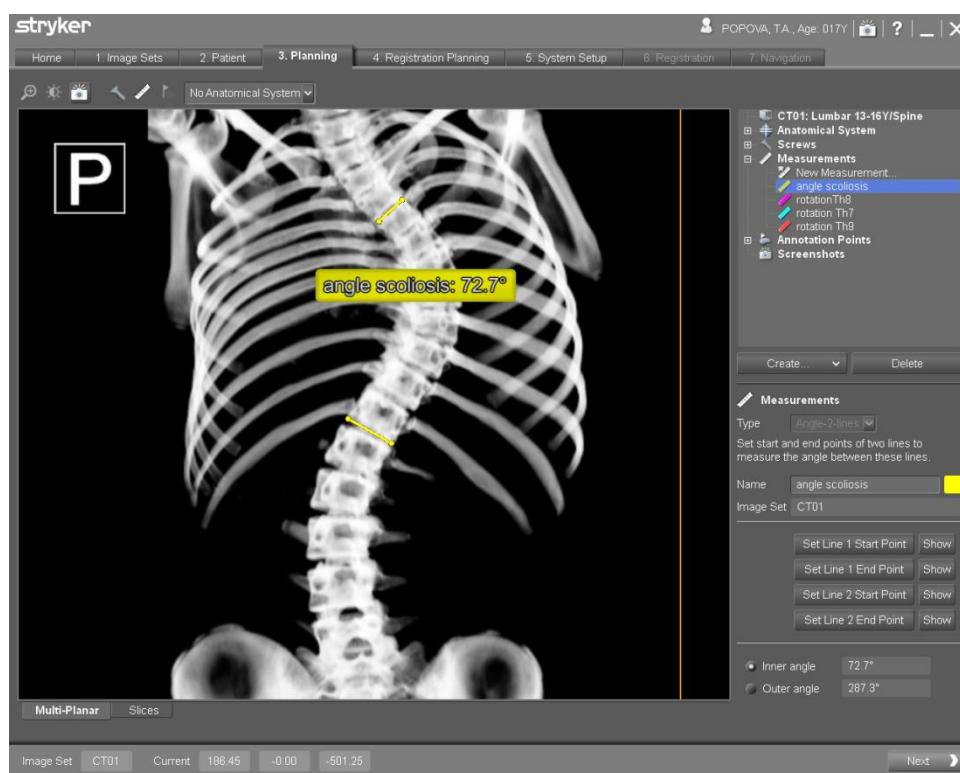


Рис. 16. 3D-реконструкция позвоночника пациента П., 17 лет с правосторонним идиопатическим сколиозом грудной локализации в режиме X-ray

Затем в панели управления с дополнительными настройками активизировали вкладку «Anatomical System». Этот этап осуществляли для оценки анатомо-антропометрических параметров и пространственных взаимоотношений костных структур деформированных позвонков с целью определения возможности корректной установки транспедикулярных опорных элементов в них. Проводили измерение поперечных и продольных диаметров корней дуг отдельно для каждого позвонка, начиная с уровня Th2 до уровня L5 включительно, а также оценивали пространственное взаимоотношение корня дуги позвонка к телу (рис. 17 и 18).

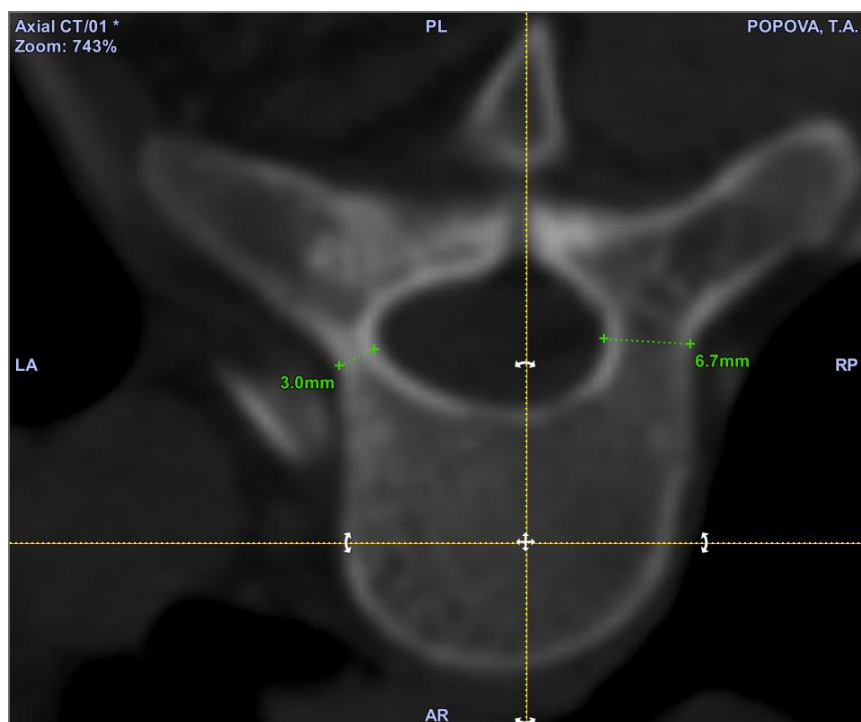


Рис. 17. Измерение поперечных диаметров корней дуг позвонка

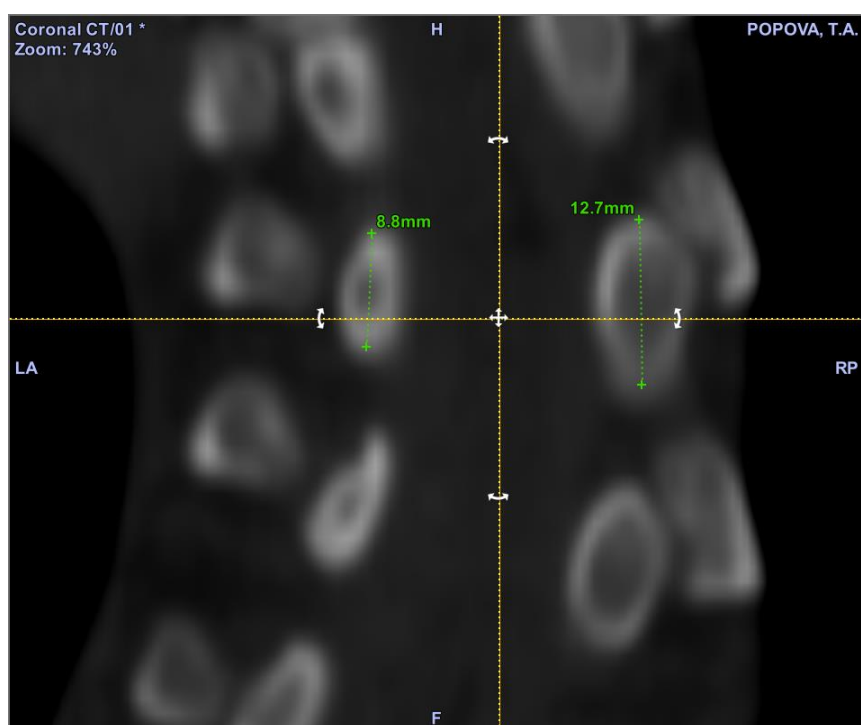


Рис. 18. Измерение продольных диаметров корней дуг позвонка

После этого проводили предоперационное планирование положения транспедикулярных винтов в позвонках на протяжении дуги сколиотической деформации в зоне предполагаемого спондилодеза. Для этого в рабочей области с дополнительными настройками активизировали вкладку «Screws», где осуществляли процедуру проведения виртуальных транспедикулярных опорных элементов, с определением оптимальной длины и диаметра рабочей резьбовой части винта по отношению к костным структурам позвонка (рис. 19 и 20).

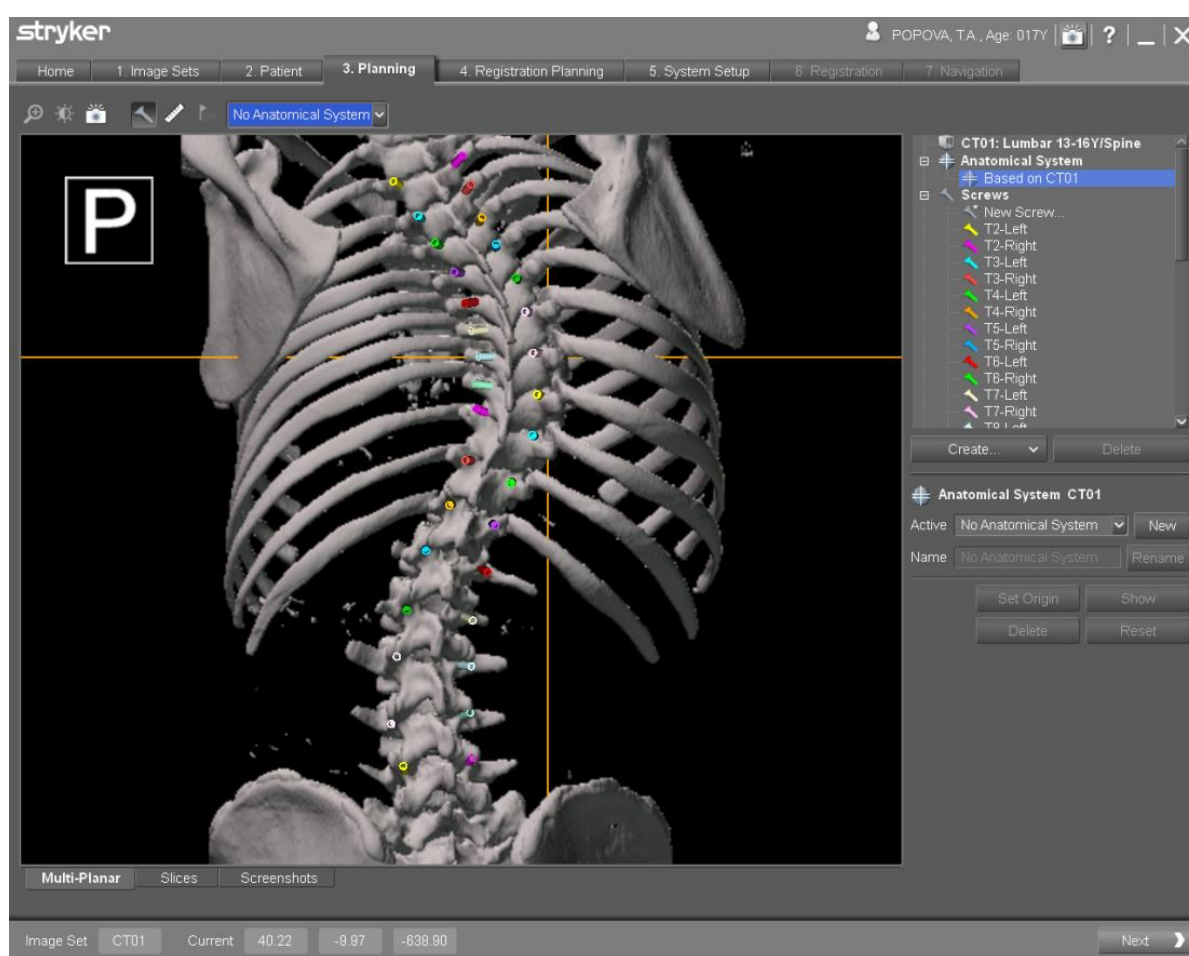


Рис. 19. 3D-реконструкция позвоночника пациента П., 17 лет с правосторонним идиопатическим сколиозом грудной локализации с виртуальными транспедикулярными винтами

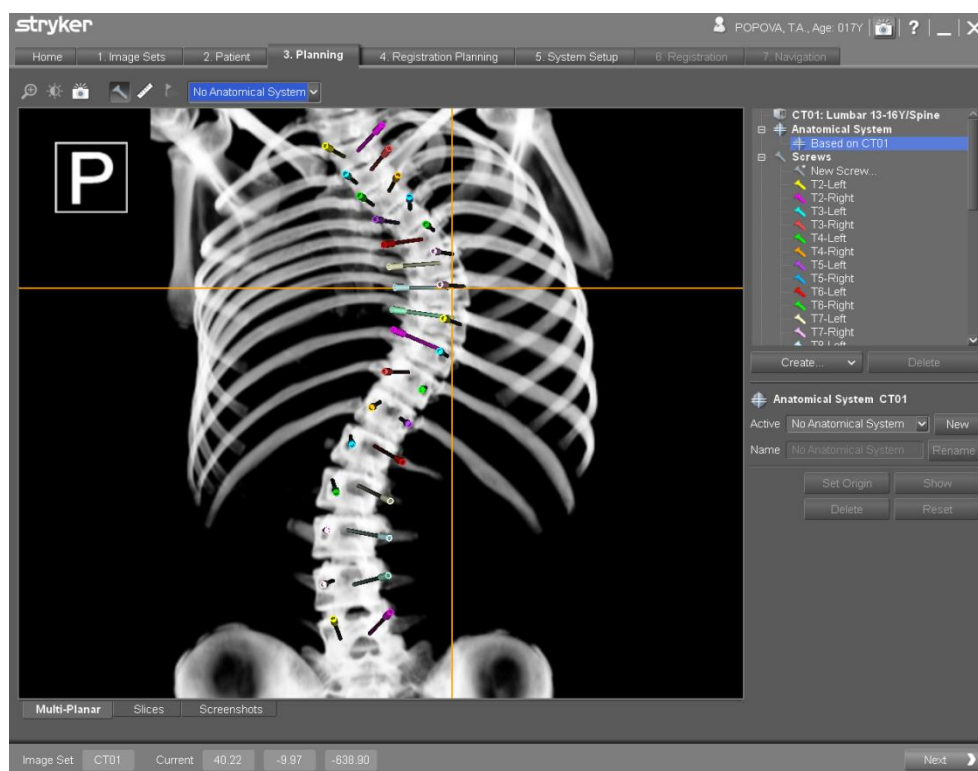


Рис. 20. 3D-реконструкция позвоночника пациента П., 17 лет с правосторонним идиопатическим сколиозом грудной локализации в режиме X-ray с виртуальными транспедикулярными винтами

Необходимо отметить, что осуществление данной процедуры в ходе предоперационного планирования при использовании навигации в хирургическом лечении детей с идиопатическим сколиозом является очередной особенностью, так как позволяет заранее оценить возможность корректной установки транспедикулярных опорных элементов в тела деформированного отдела позвоночника. Эта процедура особенно важна и актуальна у детей с тяжелыми и ригидными формами идиопатического сколиоза, которые сопровождаются выраженными структуральными изменениями позвонков и взаимоотношениями дорсальных костных структур деформированного позвоночника.

После этого осуществляли переход к вкладке №4 - «Registration Planning», где в панели управления с дополнительными настройками

проводили создание массива референтных точек, используемых для регистрации по анатомическим ориентирам.

Особенностью проведения предоперационного планирования регистрации по анатомическим ориентирам (anatomical landmarks) в грудном отделе позвоночника (с уровня Th1 по Th11) у детей с идиопатическим сколиозом являлось использование следующего набора референтных точек: середина вершины остистого отростка и середина вершин поперечных отростков регистрируемого позвонка (рис. 21).

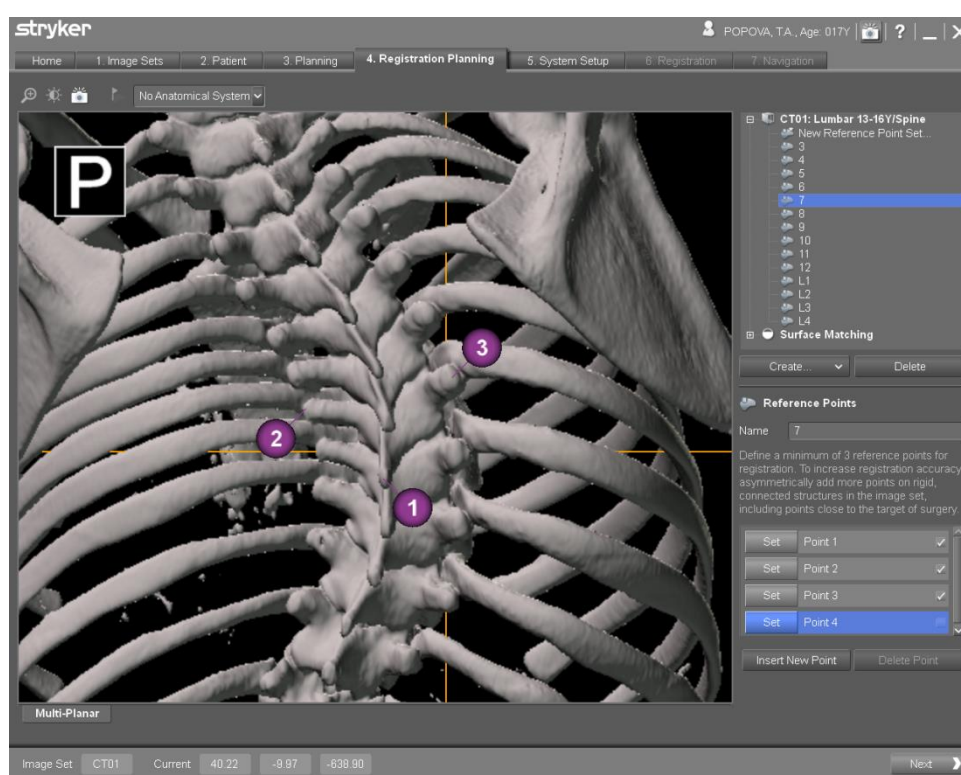


Рис. 21. Предоперационное планирование референтных точек для регистрации по анатомическим ориентирам в грудном отделе позвоночника (для уровня Th1-Th11 позвонков)

Особенностью проведения предоперационного планирования регистрации по анатомическим ориентирам для позвонка Th12 являлось то, что в качестве референтных точек использовали середину вершины остистого отростка и середину вершин сосцевидных отростков

регистрируемого позвонка (рис. 22). Такой выбор референтных точек был связан с анатомическими особенностями строения позвонка на этом уровне.

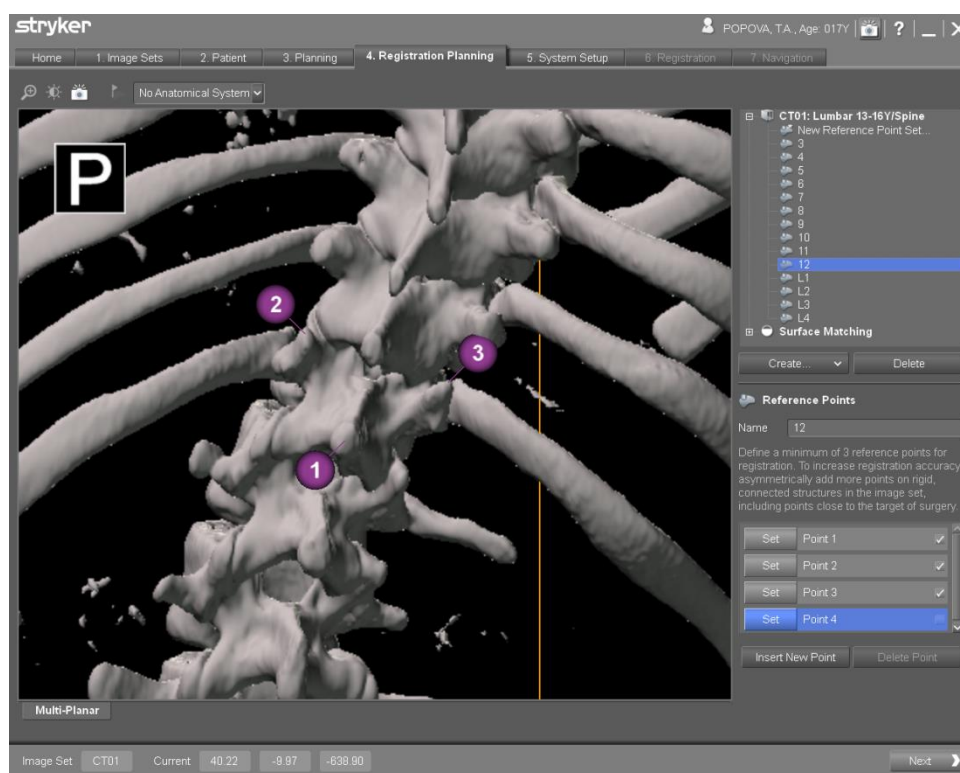


Рис. 22. Предоперационное планирование референтных точек для регистрации по анатомическим ориентирам для позвонка Th12

В поясничном отделе позвоночника в качестве точек для регистрации использовали середину вершины остистого отростка регистрируемого позвонка и середину дугоотростчатого сустава между регистрируемым и вышележащим позвонком с обеих сторон относительно линии остистых отростков (рис. 23).

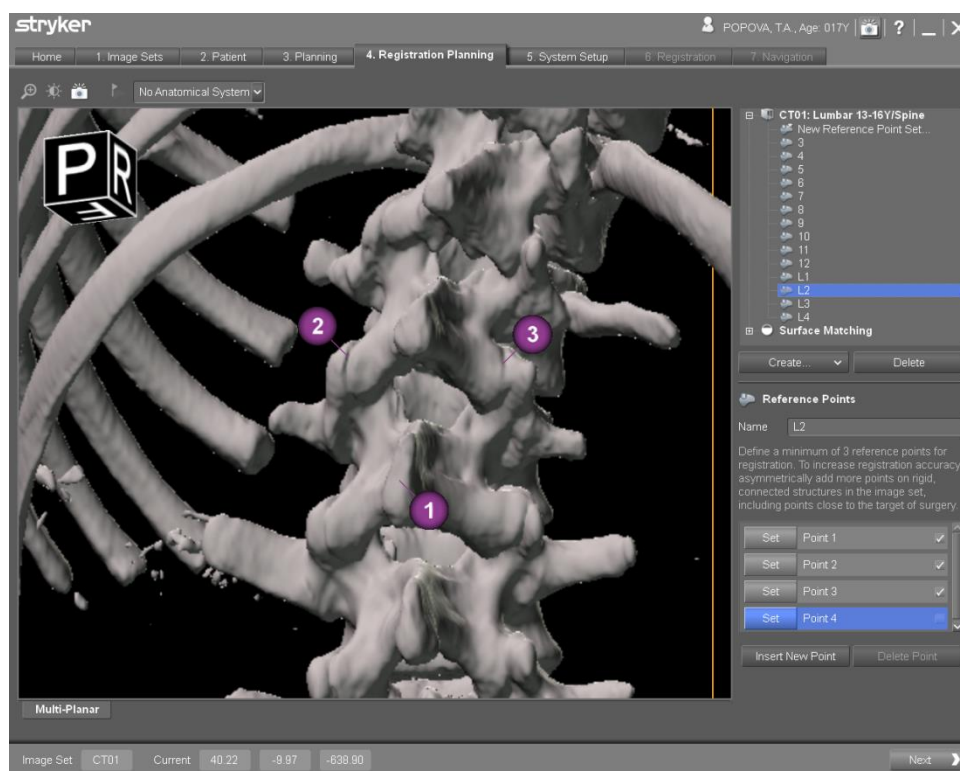


Рис. 23. Предоперационное планирование референтных точек для регистрации по анатомическим ориентирам в поясничном отделе позвоночника

Предоперационное планирование в грудном и поясничном отделе позвоночника проводили на всех позвонках, подлежащих инструментализации.

После создания массива референтных точек в панели управления с дополнительными настройками выбирали вкладку «Surface Matching» и активизировали кнопку «Calculate» для подсчета поверхности трехмерной реконструкции позвоночника на заданном уровне (surface level). Данная процедура позволяет сократить время, затрачиваемое на проведение регистрации по поверхности (surface registration) в ходе работы в операционной на этапе навигирования (рис. 24).

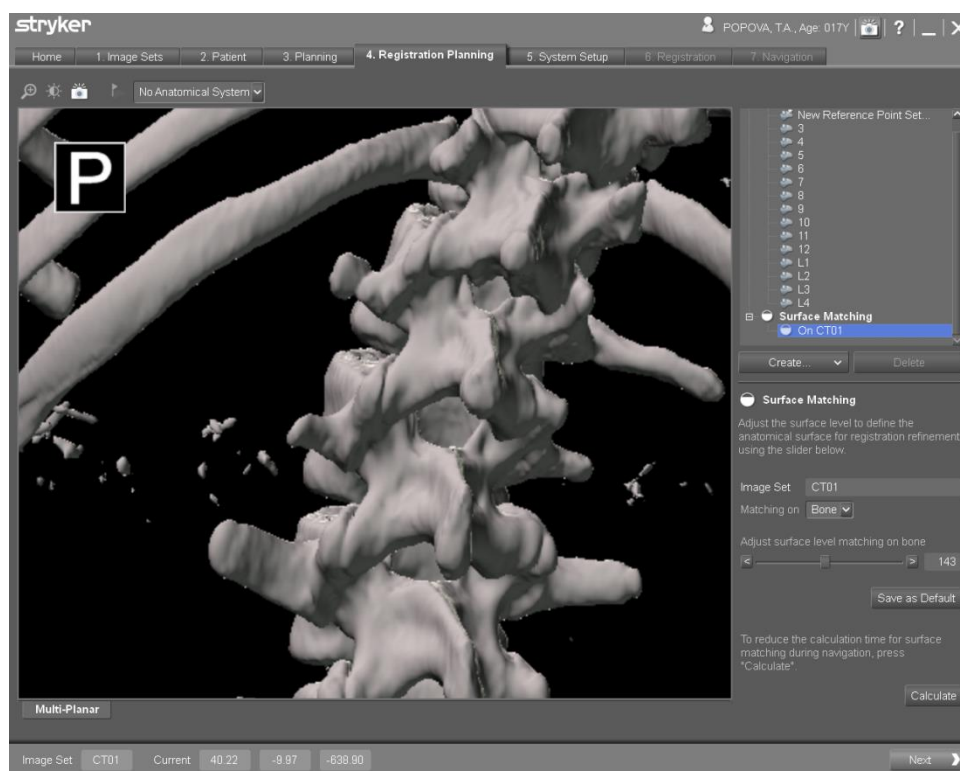


Рис. 24 Подсчет поверхности трехмерной реконструкции позвоночника на заданном уровне

3.4. Интраоперационная навигация

Особенностью положения пациента на операционном столе являлось то, что после фиксации черепа в скобе Мэйфильда и нижних конечностей в ортопедической приставке тракцию позвоночника не проводили до момента окончания формирования костных каналов в тела позвонков для транспедикулярных опорных элементов под контролем навигации. Данный прием позволял максимально приблизить пространственные взаимоотношения структур позвонков, составляющих сколиотическую дугу деформации виртуальной 3D-модели к позиции позвоночника пациента, находящегося на операционном столе. Навигационную систему устанавливали у ножного конца операционного стола. Для обеспечения уверенного приема инфракрасного сигнала от навигационного инструментария следящую камеру располагали на уровне пяточных областей

пациента на расстоянии 1,5 метров от поверхности операционного стола (рис. 25).



Рис. 25. Положение пациента на операционном столе относительно навигационной станции

В ходе хирургического вмешательства на этапе доступа к дорсальным костным структурам позвоночника проводили доскональное скелетирование задних отделов позвонков до обнажения костных структур, подлежащих инструментализации. По завершении скелетирования дорсальных костных структур позвоночника на протяжении сколиотической дуги деформации в обязательном порядке проводили идентификацию двенадцатого грудного позвонка с определением порядкового номера всех позвонков, входящих в предполагаемую зону инструментального спондилодеза.

Затем приступали к регистрации и валидации навигационного инструментария. Данный этап работы проводили во вкладке №5 «System Setup». При помощи кнопки включения активизировали калибровочное устройство (навигационный «ромб»), оценивали его отображение на мониторе навигационной станции. Далее последовательно активизировали и

проводили валидацию шила и педикулярного зонда на навигационном «ромбе». Проверяли прием сигнала от навигационных инструментов следящей камерой в зоне хирургического вмешательства, корректируя положение последней при необходимости (рис. 26).



Рис. 26. Процедура валидации навигационного инструмента

Устанавливали нулевой трекер (трекер пациента), фиксируя его при помощи зажима к остистому отростку позвонка, расположенного дистальнее относительно зоны предполагаемого инструментального спондилодеза и проводили его активацию (рис. 27, 28, 29).

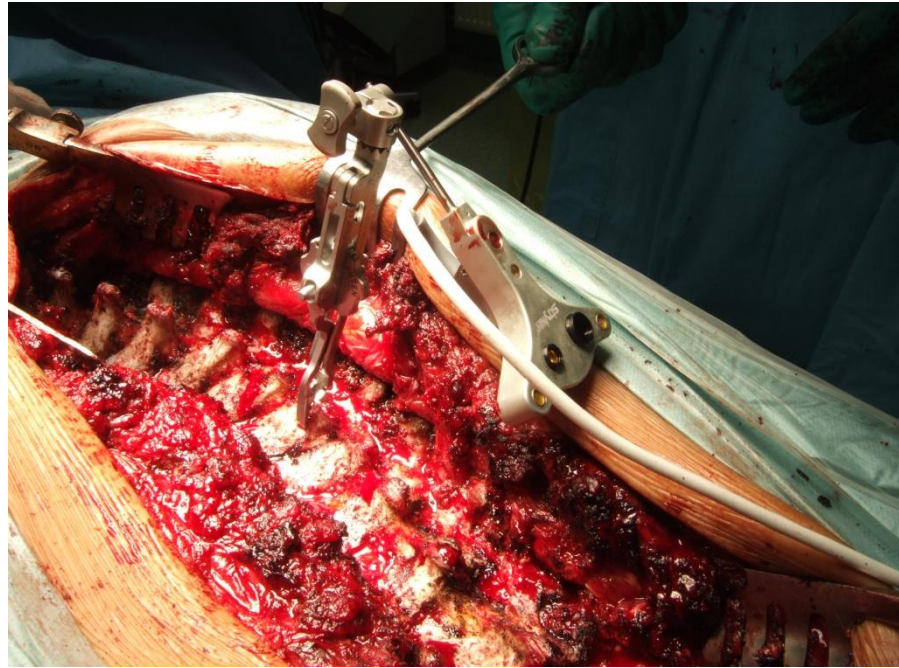


Рис. 27. Трекер пациента, установленный на остистый отросток позвонка

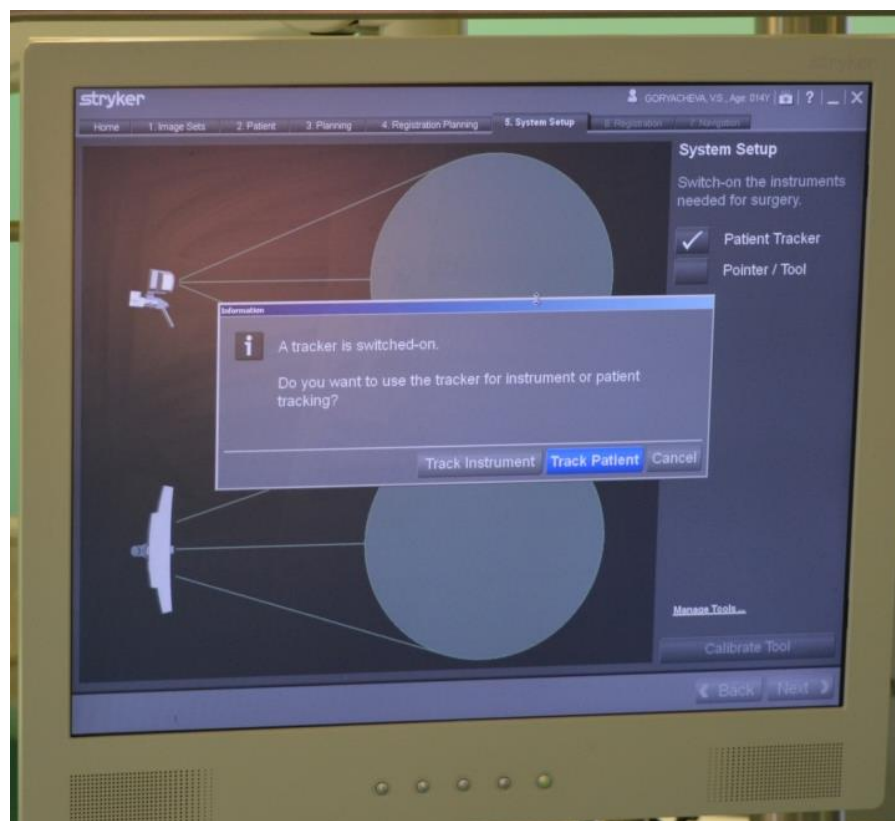


Рис. 28. Регистрация трекера пациента

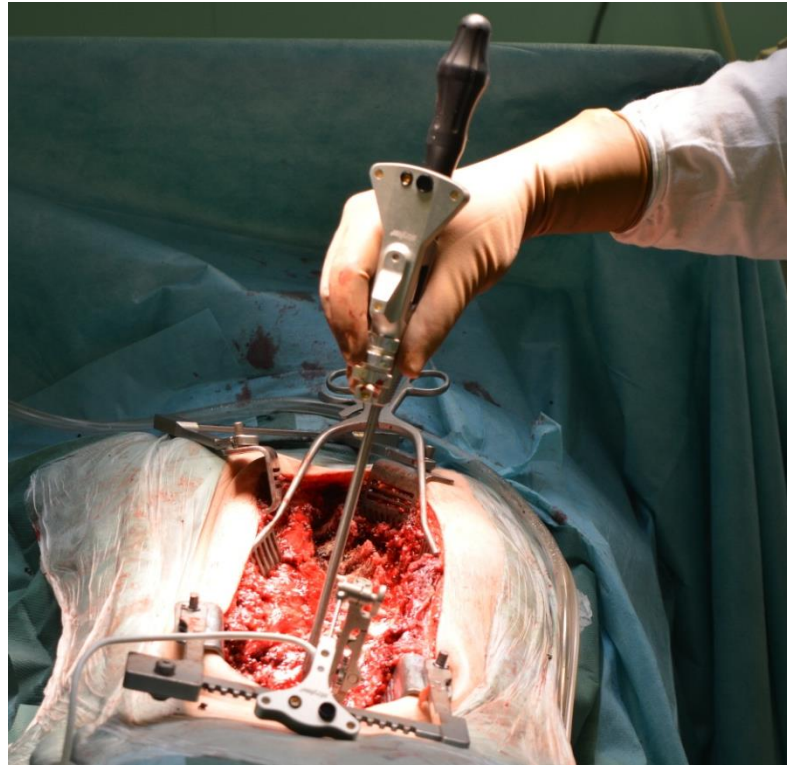


Рис. 29. Правильное положение трекера пациента относительно операционного поля и навигационного инструмента

После завершения процедуры регистрации и валидации при помощи управляющих клавиш навигационных инструментов переходили к вкладке №6 «Registration», предназначенной для проведения интраоперационной регистрации по анатомическим ориентирам и регистрации по поверхности. Последняя процедура проводится только в ходе вмешательства.

Для осуществления регистрации позвонка использовали навигируемое шило. При помощи кнопок управления в программе SpineMap3D в панели управления с дополнительными настройками, расположенной справа относительно области просмотра, выбирали необходимый виртуальный позвонок с заранее запланированными референтными точками. В соответствии с последовательностью нумерации референтных точек шило поочередно устанавливали на каждый запланированный анатомический ориентир и фиксировали его положение при помощи нажатия на среднюю клавишу управления навигируемого шила (рис. 30).

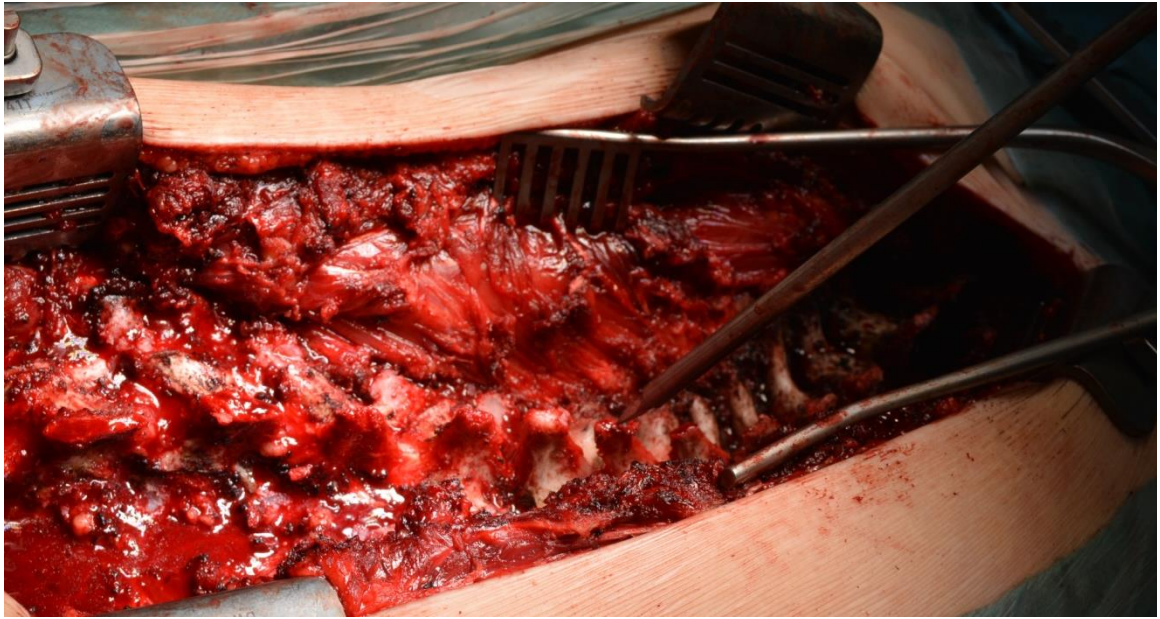


Рис. 30. Процедура регистрации по анатомическим ориентирам (сбор референтных точек при помощи навигируемого шила)

После проведения сбора референтных точек оценивали полученную среднеквадратичную погрешность регистрации (рис. 31, 32).

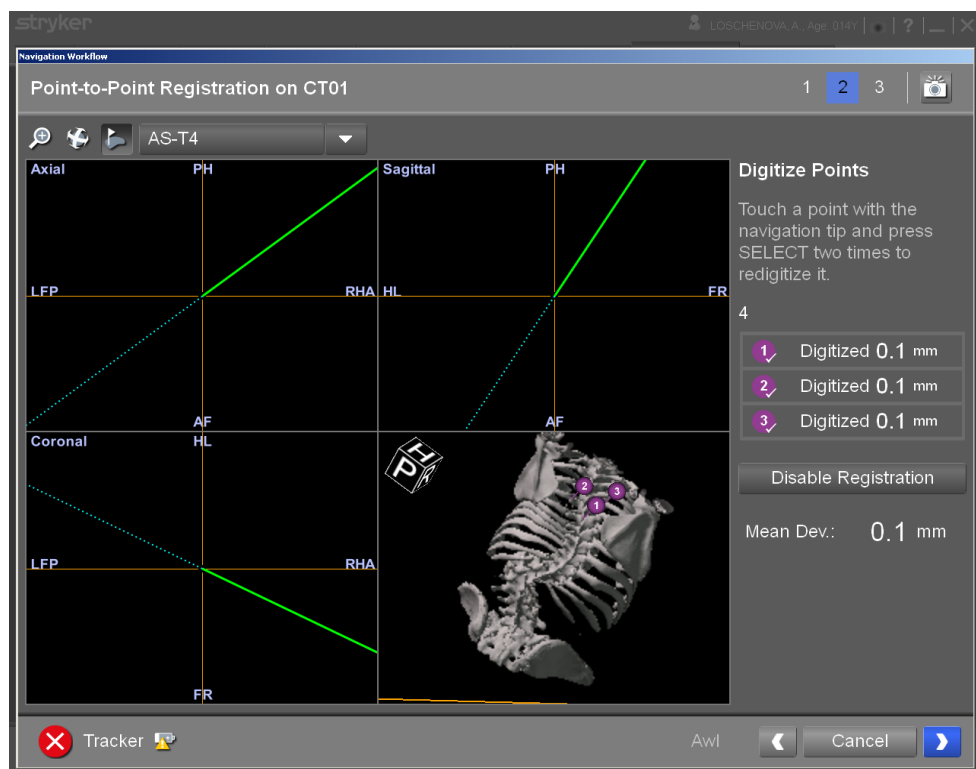


Рис. 31. Регистрация по анатомическим ориентирам для позвонка Th4, погрешность регистрации составила 0,1 мм

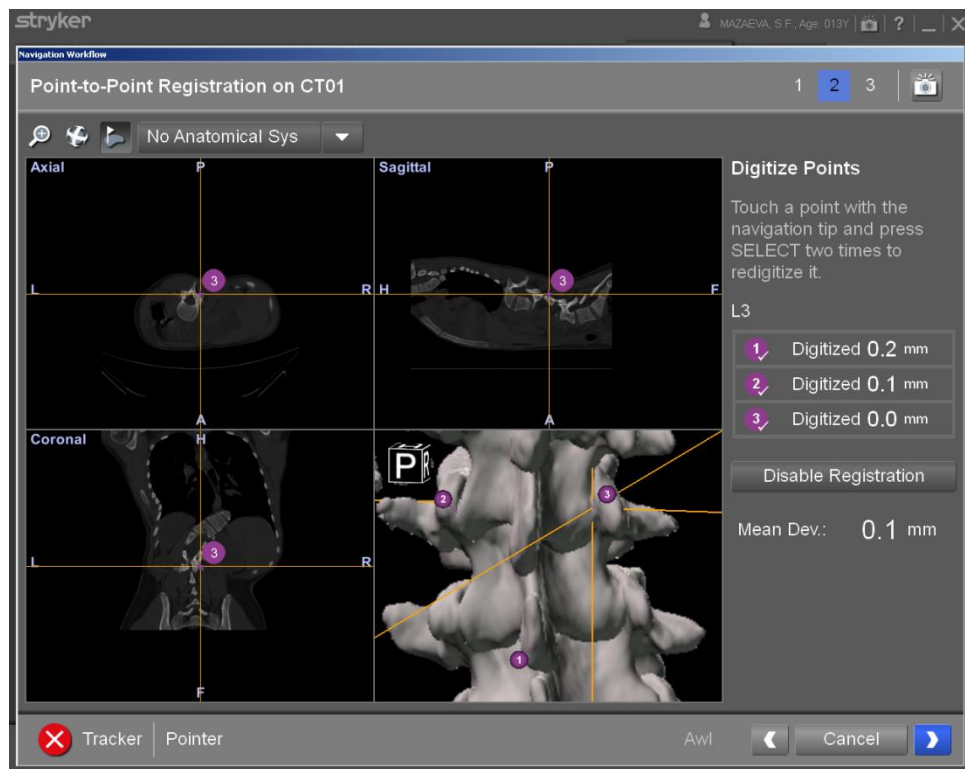


Рис. 32. Регистрация по анатомическим ориентирам для позвонка L3, погрешность регистрации составила 0,1 мм

При получении погрешности более 1,0 мм проводили дополнительную регистрацию по поверхности (surface registration) (рис. 33).

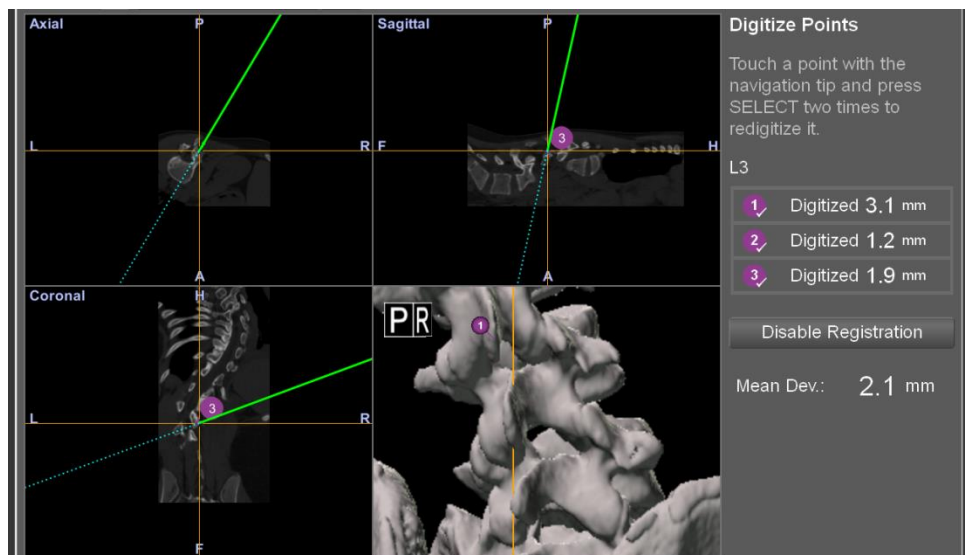


Рис. 33. Регистрация по анатомическим ориентирам для позвонка L3, погрешность регистрации составила 2,1 мм, что требует проведения регистрации по поверхности

Особенностью проведения регистрации по поверхности является осуществление сбора массива точек в количестве не менее 30, при помощи наведируемого шила с дорсальных костных структур максимально возможной бошьей площадью (поверхность остистого и поперечных отростков, поверхность дуги позвонка) только одного регистрируемого позвонка, без перехода на смежные позвоночно-двигательные сегменты (рис. 34, 35). Такая последовательность действий позволяет улучшить точность совмещения контуров позвонка виртуальной 3D-модели позвоночника, воссозданной в программе Spine Map 3D навигационной станции, с поверхностью дорсальных костных структур регистрируемого позвонка.

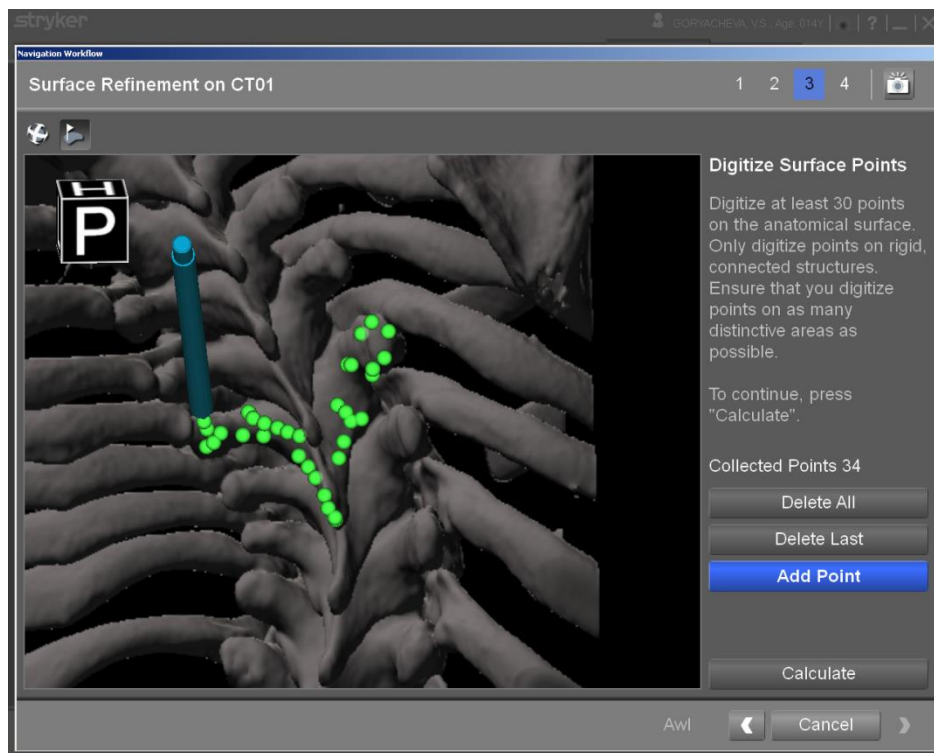


Рис. 34. Процедура регистрации по поверхности в грудном отделе позвоночника

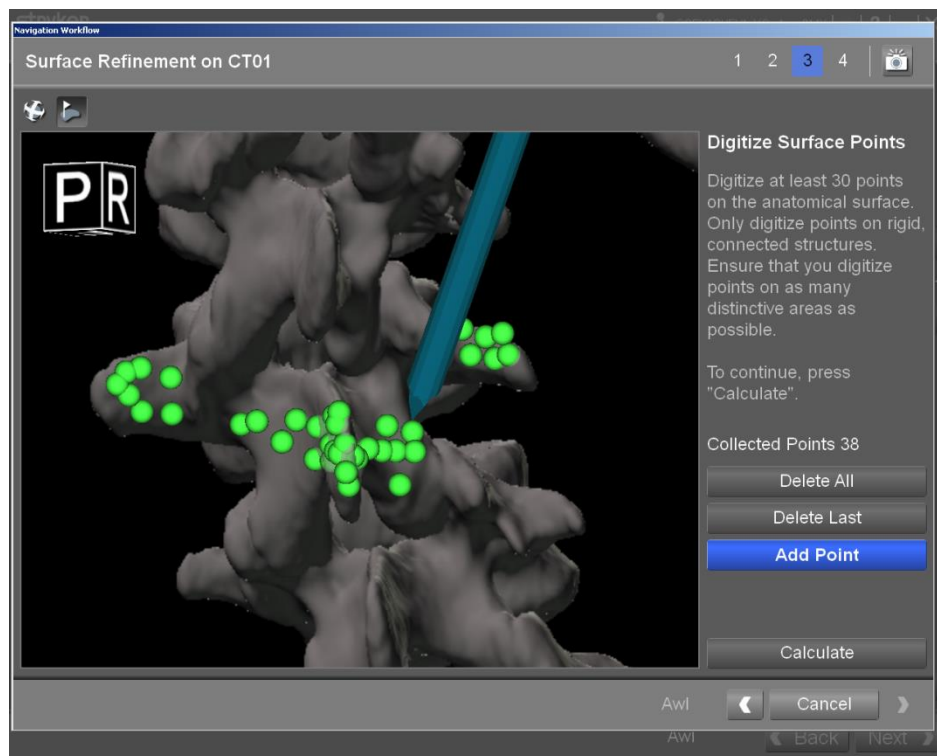


Рис. 35. Процедура регистрации по поверхности в поясничном отделе позвоночника

После завершения процедуры интраоперационной регистрации по анатомическим ориентирам и по поверхности при помощи управляющих клавиш навигационного шила переходили к вкладке №7 «Navigation». Очередной особенностью интраоперационной навигации у детей с идиопатическим сколиозом перед процедурой формирования костных каналов в телах позвонков являлась дополнительная оценка контроля точности регистрации по дорсальным костным анатомическим ориентирам. С этой целью шило последовательно устанавливали на анатомические ориентиры дорсальных структур зарегистрированного позвонка и проводили кончиком шила по поверхности правой и левой половин дуги позвонка, проверяя таким образом точность и правильность сопряжения контуров костной ткани кортикального слоя позвонка с контурами виртуальной 3D-модели позвоночника, воссозданной в навигационной станции (рис. 36).

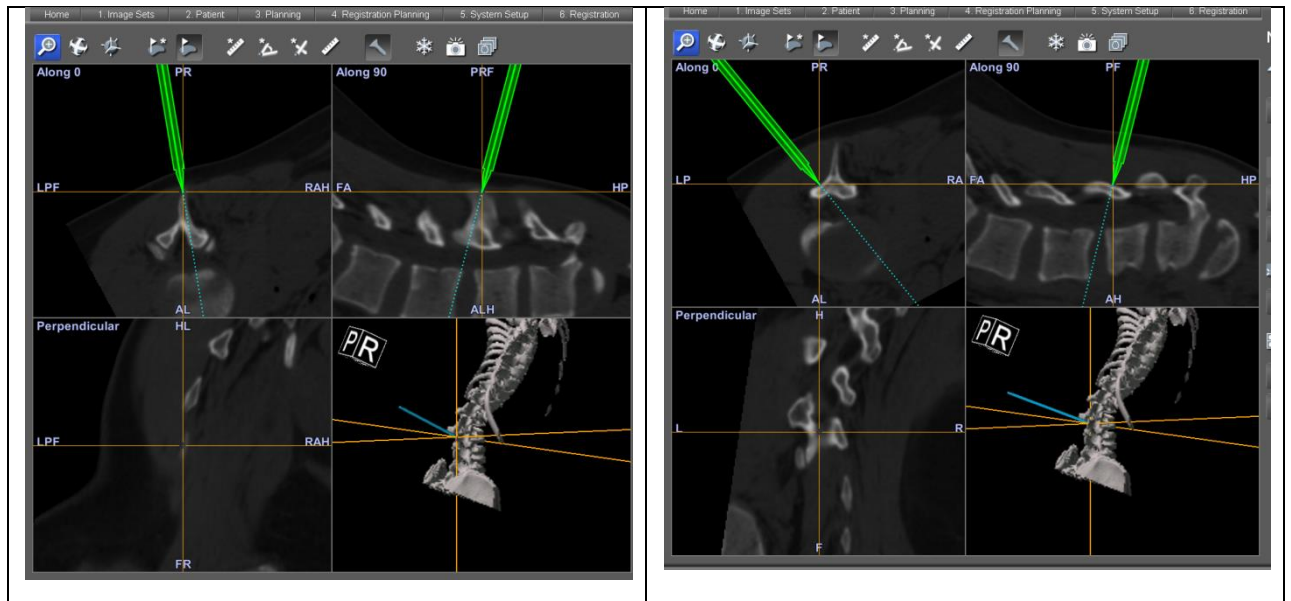


Рис. 36. Процедура проверки точности совмещения задних костных структур поверхности позвонка с его виртуальной моделью в навигационной установке по анатомическим ориентирам и по поверхности в поясничном отделе позвоночника

Если по результатам тестирования анатомических ориентиров и дорсальной поверхности позвонка отмечались значимые пространственные отклонения, которые могли внести искажения при навигации, проводили перерегистрацию по анатомическим ориентирам и поверхности костных структур на прилежащем позвонке.

Затем в панели управления с дополнительными настройками, расположенной справа относительно области просмотра, выбирали необходимую запланированную анатомическую плоскость для данного позвонка. После подготовки при помощи костных кусачек Люэра точки для введения винта навигационным инструментарием (шило и педикулярный зонд) осуществляли формирование каналов для винтов на инструментируемом позвонке. При этом контролировали правильное направление хода формируемого канала в костной ткани относительно корня дуги и тела позвонка, определяли корректную длину имплантируемого транспедикулярного опорного элемента (рис. 37, рис. 38 А, Б).

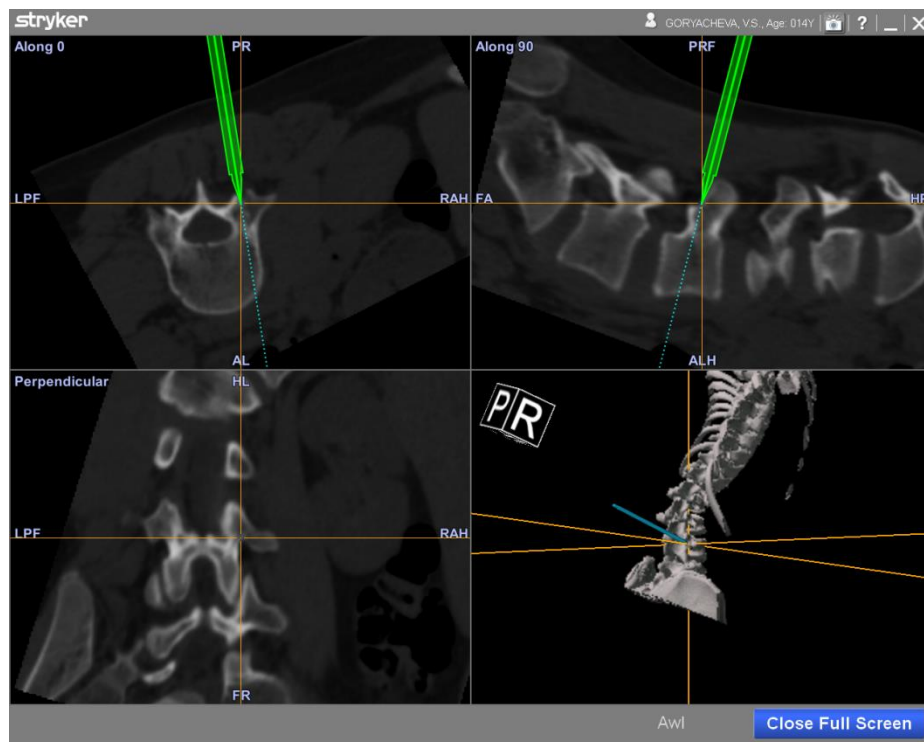
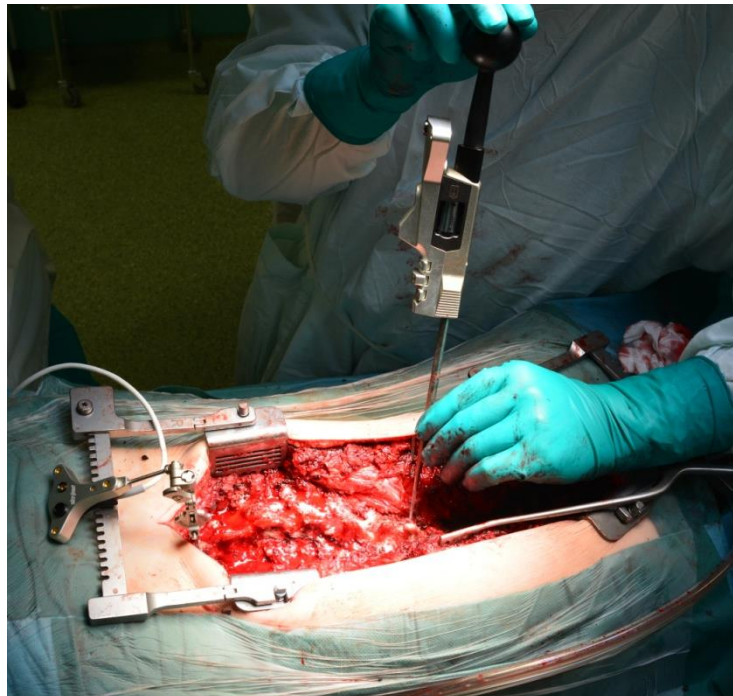
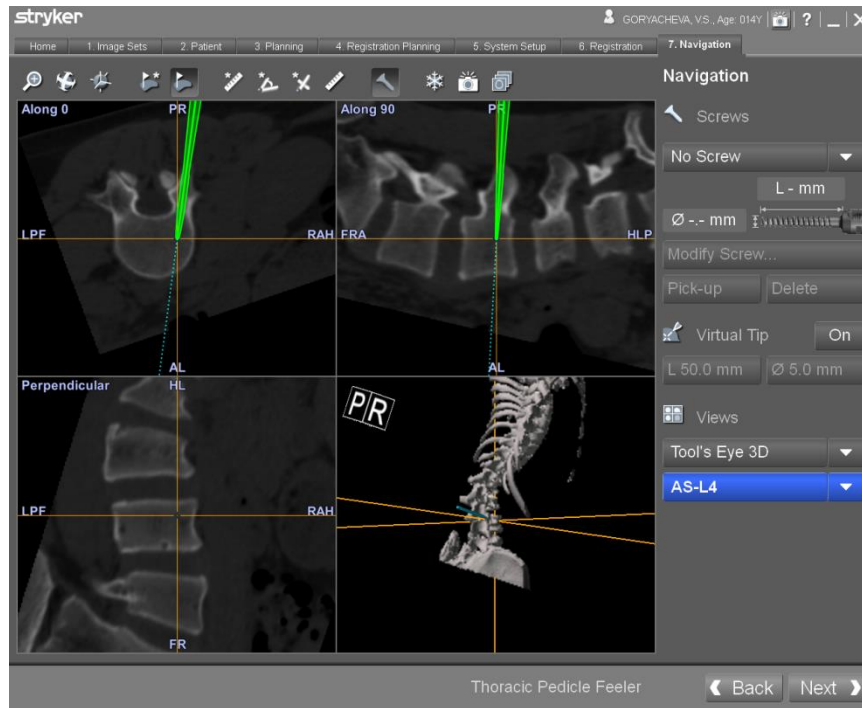


Рис. 37. Процедура начала формирования канала для транспедикулярного винта при помощи навигационного шила в поясничном отделе позвоночника



A



Б

Рис. 38. Процедура окончательного формирования канала для транспедикулярного винта при помощи навигационного педикулярного зонда в поясничном отделе позвоночника А – в ходе операции, Б – в навигационной станции

После этого при помощи пуговчатого зонда проводили верификацию костных стенок канала для транспедикулярного винта, сформированного в позвонке (рис. 39).

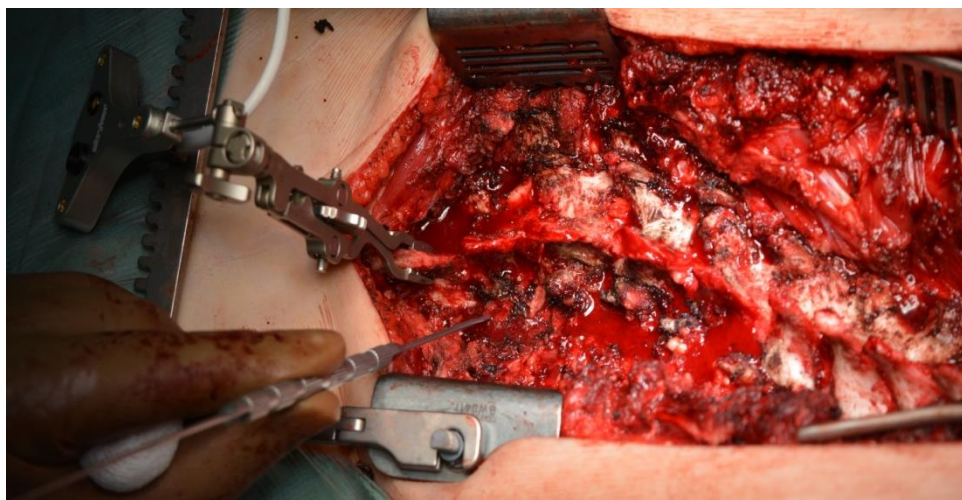


Рис. 39. Верификация костных стенок канала для транспедикулярного винта пуговчатым зондом

Необходимо отметить, что важной особенностью в порядке формирования костных каналов в телах позвонков у детей с идиопатическим сколиозом являлось его направление от каудальной границы зоны инструментального спондилодеза к краниальной.

На начальных этапах нашей работы после формирования костных каналов для опорных элементов конструкции, с целью дополнительного контроля правильности их формирования, в тела позвонков на всех уровнях устанавливали Rg-метками и осуществляли Rg-контроль в прямой и боковой проекциях позвоночника. Затем проводили транспедикулярные винты, фиксировали в них стержни и осуществляли коррекцию деформации по разработанным технологиям.

Таким образом, в данной главе рассмотрены особенности применения системы оптической 3D-КТ-навигации при хирургическом лечении детей с идиопатическим сколиозом на этапах предоперационного обследования, проведения предоперационного планирования в программе SpineMap3D, а также на этапе интраоперационной навигации. Необходимо отметить, что данные особенности в порядке построения последовательности действий при работе с навигационной станцией и технические нюансы, выработанные нами в процессе освоения навигационной техники, явились в настоящем диссертационном исследовании предпосылкой к разработке алгоритма использования 3D-КТ навигации при коррекции деформации позвоночника у детей с идиопатическим сколиозом.

ГЛАВА 4

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ АНАТОМО-АНТРОПОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОЗВОНКОВ У ДЕТЕЙ С ИДИОПАТИЧЕСКИМ СКОЛИОЗОМ С ПРИМЕНЕНИЕМ СИСТЕМЫ АКТИВНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ 3D-КТ НАВИГАЦИИ

4.1. Анализ анатомо-антропометрических параметров позвонков у детей с идиопатическим сколиозом грудной локализации с применением системы активной оптической 3D-КТ навигации

Исследование проведено у 40 пациентов в возрасте от 14 до 18 лет с идиопатическим сколиозом грудной локализации 3 и 4 степени по В.Д.Чаклину. Распределение по половому признаку было характерным для деформаций позвоночника при идиопатическом сколиозе: 8 пациентов мужского пола, 32 – женского пола. Во всех наблюдениях направленность грудной сколиотической дуги была правосторонней.

Согласно данным исследования угол сколиотической деформации, определенный по вышеописанной методике в главе №2, составил от $33,7^{\circ}$ до 136° (среднее – $61,4^{\circ}$). Угол РАП колебался от $9,3^{\circ}$ до $40,2^{\circ}$ (среднее – $21,09^{\circ}$), угол РППП - от $2,1^{\circ}$ до $36,6^{\circ}$ (среднее – $17,69^{\circ}$), угол РДПП находился в пределах от $6,3^{\circ}$ до $30,0^{\circ}$ (среднее – $17,13^{\circ}$).

Абсолютные значения поперечных и продольных диаметров корней дуг позвонков грудного и поясничного отделов позвоночника, площадей корней дуг и их коэффициентов асимметрии представлены ниже в таблицах 7, 8 и 9.

Размеры поперечных диаметров корней дуг и коэффициент их асимметрии

Позвонок	trdR, мм	trdL, мм	KAtrd
Th2	$5,3 \pm 0,9$	$6,5 \pm 0,9$	0,82 (0,54 - 0,98)
Th3	$3,3 \pm 1,0$	$5,3 \pm 1,1$	0,63 (0,25 - 1,00)
Th4	$2,9 \pm 0,8$	$4,6 \pm 0,8$	0,60 (0,30 - 1,30)
Th5	$3,5 \pm 1,0$	$4,5 \pm 1,1$	0,76 (0,33 - 2,55)
Th6	$4,4 \pm 1,1$	$4,2 \pm 1,2$	0,98 (0,57 - 2,22)
Th7	$4,8 \pm 1,0$	$3,6 \pm 1,2$	1,31 (0,72 - 3,11)
Th8	$5,1 \pm 0,7$	$3,6 \pm 1,0$	1,38 (0,93 - 2,45)
Th9	$5,6 \pm 0,9$	$4,3 \pm 1,2$	1,33 (0,86 - 2,30)
Th10	$6,4 \pm 1,3$	$5,1 \pm 1,3$	1,27 (0,84 - 1,69)
Th11	$7,3 \pm 1,2$	$6,8 \pm 1,4$	1,06 (0,82 - 1,97)
Th12	$7,0 \pm 1,0$	$7,4 \pm 1,0$	0,91 (0,79 - 1,27)
L1	$6,1 \pm 1,6$	$6,2 \pm 1,4$	0,96 (0,59 - 1,50)
L2	$6,2 \pm 1,7$	$6,3 \pm 1,2$	0,95 (0,59 - 1,41)
L3	$8,5 \pm 1,7$	$7,9 \pm 1,2$	1,11 (0,79 - 1,33)
L4	$10,4 \pm 1,9$	$10,3 \pm 1,5$	0,97 (0,76 - 1,73)
L5	$14,5 \pm 2,0$	$15,6 \pm 2,1$	0,93 (0,74 - 1,38)

Таблица 8

Размеры продольных диаметров корней дуг и коэффициент их асимметрии

Позвонок	lngdR, мм	lngdL, мм	KAlngd
Th2	10,6 ± 1,6	11,5 ± 1,6	0,91 (0,80 - 1,04)
Th3	10,7 ± 1,3	12,0 ± 1,7	0,90 (0,66 - 1,17)
Th4	10,9 ± 1,3	10,8 ± 1,5	0,98 (0,85 - 1,31)
Th5	11,6 ± 1,2	10,1 ± 1,3	1,11 (0,95 - 1,59)
Th6	12,6 ± 1,5	9,7 ± 1,3	1,30 (1,03 - 1,58)
Th7	12,7 ± 1,5	9,7 ± 1,8	1,31 (1,01 - 1,90)
Th8	13,3 ± 1,6	10,2 ± 1,4	1,32 (1,04 - 1,67)
Th9	13,8 ± 1,7	11,8 ± 1,6	1,12 (0,74 - 1,66)
Th10	15,6 ± 1,7	14,8 ± 1,9	1,02 (0,90 - 1,50)
Th11	16,7 ± 2,4	17,3 ± 1,7	0,96 (0,73 - 1,24)
Th12	15,7 ± 1,9	16,8 ± 2,1	0,92 (0,87 - 1,04)
L1	14,3 ± 1,3	14,8 ± 2,0	0,96 (0,84 - 1,38)
L2	13,5 ± 1,1	14,6 ± 1,0	0,94 (0,79 - 1,04)
L3	13,9 ± 1,0	14,3 ± 1,0	0,97 (0,91 - 1,15)
L4	13,3 ± 0,9	13,3 ± 1,2	1,00 (0,86 - 1,16)
L5	12,9 ± 2,4	12,7 ± 2,1	1,02 (0,90 - 1,25)

Таблица 9

Произведение поперечных и продольных диаметров корней дуг и
коэффициент их асимметрии

Позвонок	SR, мм ²	SL, мм ²	KAS
Th2	56,2 ± 15,2	75,6 ± 17,0	0,76 (0,44 - 1,02)
Th3	36,4 ± 12,9	64,7 ± 18,5	0,57 (0,21 - 1,07)
Th4	31,8 ± 10,5	50,5 ± 13,2	0,59 (0,29 - 1,70)
Th5	41,1 ± 13,1	46,2 ± 14,4	0,77 (0,32 - 3,92)
Th6	55,1 ± 15,7	41,3 ± 15,8	1,29 (0,67 - 3,08)
Th7	60,7 ± 15,9	36,6 ± 16,9	1,76 (0,80 - 4,73)
Th8	68,0 ± 13,7	37,1 ± 12,8	1,94 (1,15 - 3,88)
Th9	78,0 ± 17,0	51,8 ± 19,0	1,55 (0,73 - 3,09)
Th10	100,0 ± 26,2	76,3 ± 29,0	1,28 (0,78 - 2,53)
Th11	121,3 ± 27,8	118,1 ± 31,0	0,97 (0,68 - 2,21)
Th12	110,2 ± 26,9	125,3 ± 27,9	0,88 (0,73 - 1,18)
L1	87,0 ± 27,5	93,0 ± 28,2	0,93 (0,50 - 2,06)
L2	83,8 ± 25,1	92,0 ± 20,8	0,87 (0,61 - 1,36)
L3	118,6 ± 24,9	112,9 ± 21,7	1,08 (0,76 - 1,29)
L4	138,9 ± 27,6	136,8 ± 23,7	0,99 (0,72 - 1,48)
L5	187,8 ± 46,3	199,2 ± 41,4	0,94 (0,67 - 1,27)

Для значений поперечных и продольных диаметров корней дуг, их площадей данные в таблицах представлены в виде - среднее ± стандартное отклонение; для значений коэффициентов асимметрии данные представлены в виде – медиана, минимум – максимум.

Из методов многомерного дисперсионного анализа к показателям продольного и поперечного диаметров корней дуг, а также к их площадям был применен T²-критерий Хотеллинга для связанных выборок для сравнения показателя величин правых и левых корней дуг позвонков в совокупности. В таблице 10 приведены результаты этого теста. Для проверки

однородности выборок по каждому позвонку для всех трех характеристик был проведен тест Колмогорова-Смирнова. Ни в одном наблюдении указанный критерий не отверг гипотезу о нормальном распределении показателя на уровне значимости $P < 0,05$.

Таблица 10

Сравнение правых и левых поперечных и продольных диаметров и площадей корней дуг позвонков (средний показатель)

Корни дуг позвонков	Статистика T^2	Значение нецентрального F-распределения с 16 и 4 степенями свободы	Уровень значимости критерия, P
Поперечные диаметры	482,5	6,4	0,043
Продольные диаметры	1225,4	16,5	0,0075
Площади	436,2	5,7	0,052

Результаты применения критерия Хотеллинга позволяют говорить об однозначном и контрастном различии совокупностей продольных диаметров правых и левых корней дуг позвонков.

Для выявления анатомо-антропометрических особенностей позвонков в основной дуге деформации были построены диаграммы Тьюки «ящички с усами» (рис.41-45). Визуальный анализ диаграмм позволяет более детально рассмотреть различия между диаметрами правых и левых корней дуг позвонков, установленных ранее с помощью статистики Хотеллинга.

В результате исследования отмечены особенности, заключающиеся в том, что верхнегрудном отделе позвоночника значения $trdR$ уменьшались с уровня Th2 позвонка ($5,3 \pm 0,9$ мм), достигая минимальных значений на уровне Th4 позвонка ($2,9 \pm 0,8$ мм). Затем наблюдалось увеличение размеров в кранио-каудальном направлении, достигавшее своего максимума на уровне

Th11 позвонка ($16,7 \pm 2,4$ мм). После этого отмечалось небольшое уменьшение значения до уровня L1 позвонка ($6,1 \pm 1,6$ мм).

Для значений trdL закономерность полученных изменений на диаграмме была иной. Особенность изменений этих показателей заключалась в том, что отмечалось более пологое и плавное уменьшение размеров с уровня Th2 позвонка ($6,5 \pm 0,9$ мм) с достижением минимальных значений на уровне Th7 позвонка ($3,6 \pm 1,2$ мм) с последующим увеличением по направлению к Th12 позвонку, достигая значения $7,4 \pm 1,0$ мм.

Необходимо отметить, что направленность изменений размеров trdR и trdL для позвонков поясничного отдела позвоночника у пациентов с идиопатическим сколиозом грудной локализации была схожей и характеризовалась нарастанием размеров поперечных диаметров корней дуг в кранио-каудальном направлении с достижением максимальных значений на уровне L5 позвонка (рис. 40).

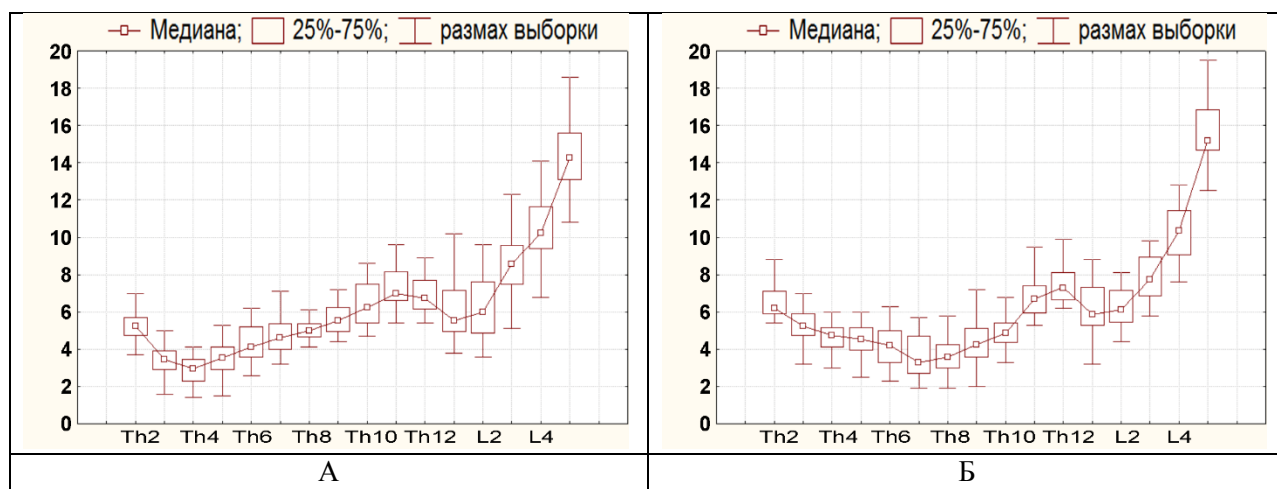


Рис. 40. Совместная диаграмма Тьюки «ящики с усами» для значений поперечных диаметров правых (А) и левых (Б) корней дуг позвонков грудного и поясничного отделов позвоночника

При проведении визуального анализа характера изменений размеров продольных диаметров корней дуг выявлены существенные различия в грудном отделе позвоночника. Особенностью изменения анализируемых

показателей заключались в плавном увеличении значения lngdR в кранио-каудальном направлении с уровня Th2 позвонка ($10,6 \pm 1,6$ мм), достигая своего максимума на уровне Th11 позвонка ($16,7 \pm 2,4$ мм). Затем наблюдалось небольшое уменьшение значения на уровне Th12 позвонка ($15,7 \pm 1,9$ мм). Распределение значений признака lngdL в грудном отделе позвоночника было иным. Отмечалось уменьшение размеров lngdL с уровня Th2 позвонка ($11,5 \pm 1,6$ мм) с достижением минимальных значений на уровне Th7 позвонка ($9,7 \pm 1,8$ мм), затем наблюдалось увеличение этого показателя в кранио-каудальном направлении, достигая своего максимального значения на уровне Th11 позвонка ($17,3 \pm 1,7$ мм).

Зависимости продольных диаметров правых и левых корней дуг от локализации позвонка в поясничном отделе позвоночника были схожими и характеризовались уменьшением своих значений в кранио-каудальном направлении с достижением минимальных значений на уровне L5 позвонка (рис. 41).

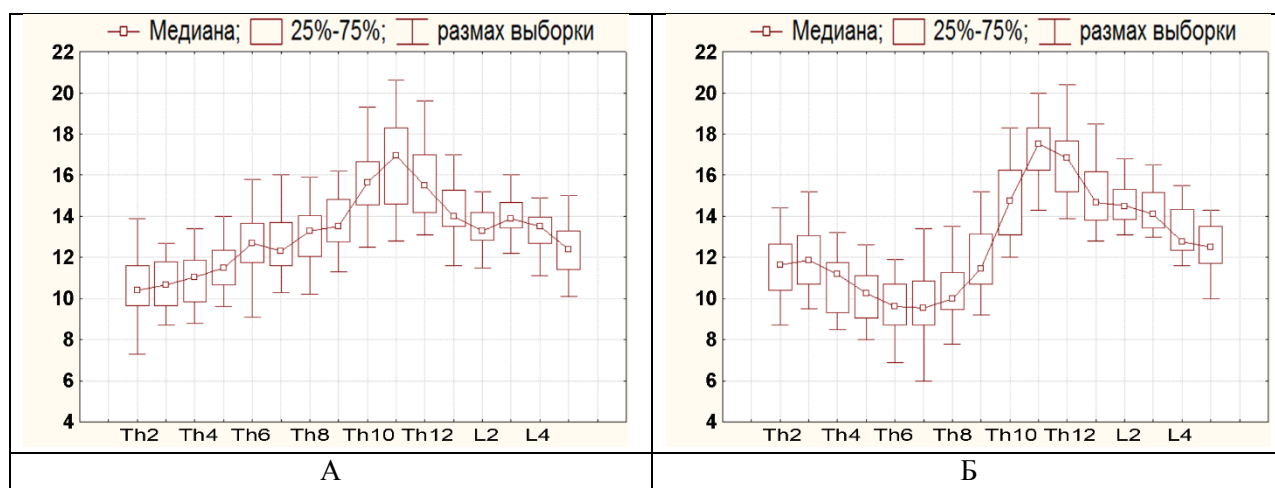


Рис. 41. Совместная диаграмма Тьюки «ящики с усами» для значений продольных диаметров правых (А) и левых (Б) корней дуг позвонков грудного и поясничного отделов позвоночника

При оценке коэффициентов асимметрии поперечных и продольных диаметров корней дуг в грудном отделе позвоночника были выявлены

следующие закономерности. Особенность изменения показателей этого параметра отмечалось максимальное отклонение KA_{trd} от единицы на уровне Th4 позвонка – 0,60 (0,30-1,30) и Th8 – 1,38 (0,93-2,45). KA_{lngd} , напротив, в верхнегрудном отделе позвоночника имел значения близкие к единице, постепенно увеличиваясь и достигая максимального значения (максимальной асимметрии) на уровне Th7-Th8 позвонков – 1,31-1,32, с последующим уменьшением в каудальном направлении. В поясничном отделе значения KA_{trd} и KA_{lngd} приближались к единице, характеризуя тем самым отсутствие выраженных структуральных изменений (рис. 42).

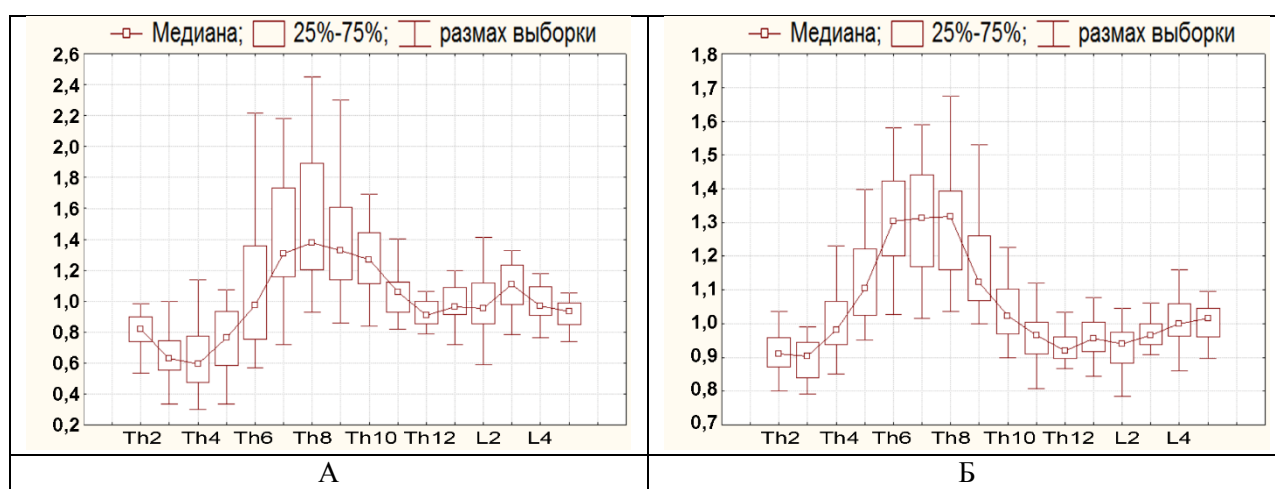


Рис. 42. Совместная диаграмма Тьюки «ящики с усами» для значений коэффициентов асимметрии поперечных (А) и продольных (Б) диаметров корней дуг позвонков грудного и поясничного отделов позвоночника

При оценке показателей площадей корней дуг, отражающих их физические характеристики, были выявлены следующие особенности у пациентов с идиопатическим сколиозом грудной локализации. Отмечалось уменьшение значения SR с уровня Th2 позвонка ($56,2 \pm 15,2 \text{ мм}^2$), достигая минимума на уровне Th4 позвонка ($31,8 \pm 10,5 \text{ мм}^2$), затем наблюдалось его увеличение в кранио-каудальном направлении, достигавшее своего максимума на уровне Th11 позвонка ($121,3 \pm 27,8 \text{ мм}^2$). После этого отмечалось уменьшение значения SR до уровня L2 позвонка ($83,8 \pm 25,1$

мм²), с последующим увеличением в каудальных сегментах поясничного отдела позвоночника.

Значение SL плавно уменьшалось с уровня Th2 позвонка ($75,6 \pm 17,0$ мм²), достигая минимального на уровне Th7 позвонка ($36,6 \pm 16,9$ мм²), затем наблюдалось его увеличение в кранио-каудальном направлении, достигавшее своего максимума на уровне Th12 позвонка ($125,3 \pm 27,9$ мм²). После этого отмечалось уменьшение значения SL до уровня L2 позвонка ($92,0 \pm 20,2$ мм²), с последующим увеличением в каудальных сегментах поясничного отдела позвоночника (рис. 43).

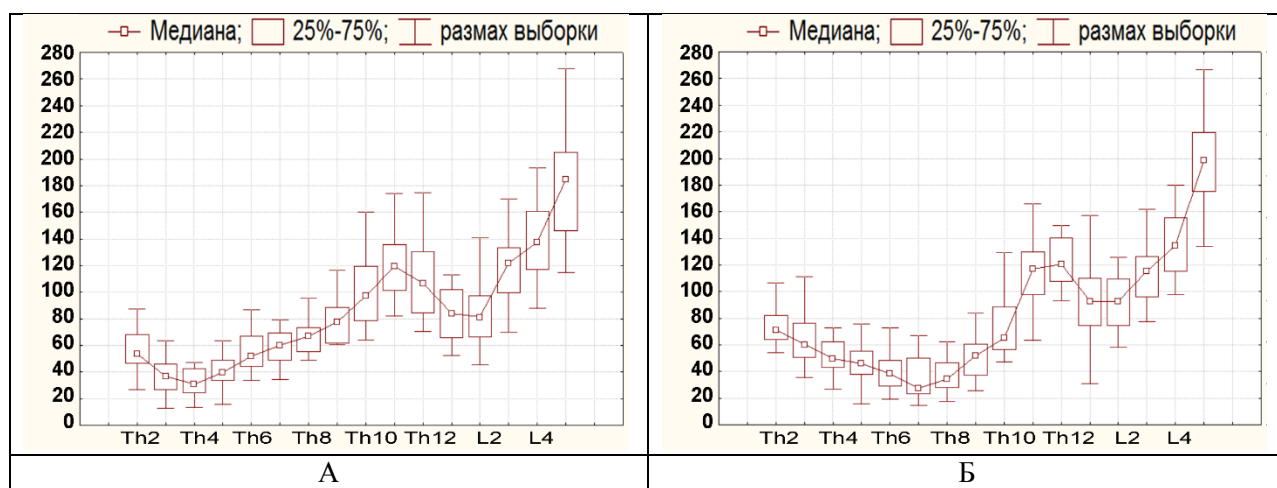


Рис. 43. Совместная диаграмма Тьюки «ящики с усами» для значений площадей диаметров правых (А) и левых (Б) корней дуг позвонков грудного и поясничного отделов позвоночника

Существенные особенности зависимости коэффициент асимметрии площадей корней дуг в грудном отделе позвоночника у детей с идиопатическим сколиозом иллюстрирует диаграмма на рис.45. Значения KAS имели максимальные отклонения от единицы на уровне Th4 позвонка – 0,59 (0,29-1,70) и Th8 позвонка – 1,94 (1,15-3,88), с последующим приближением к единице в каудальном направлении. В поясничном отделе позвоночника значения KAS приближались к единице, характеризуя тем самым отсутствие выраженных структуральных изменений (рис. 44).

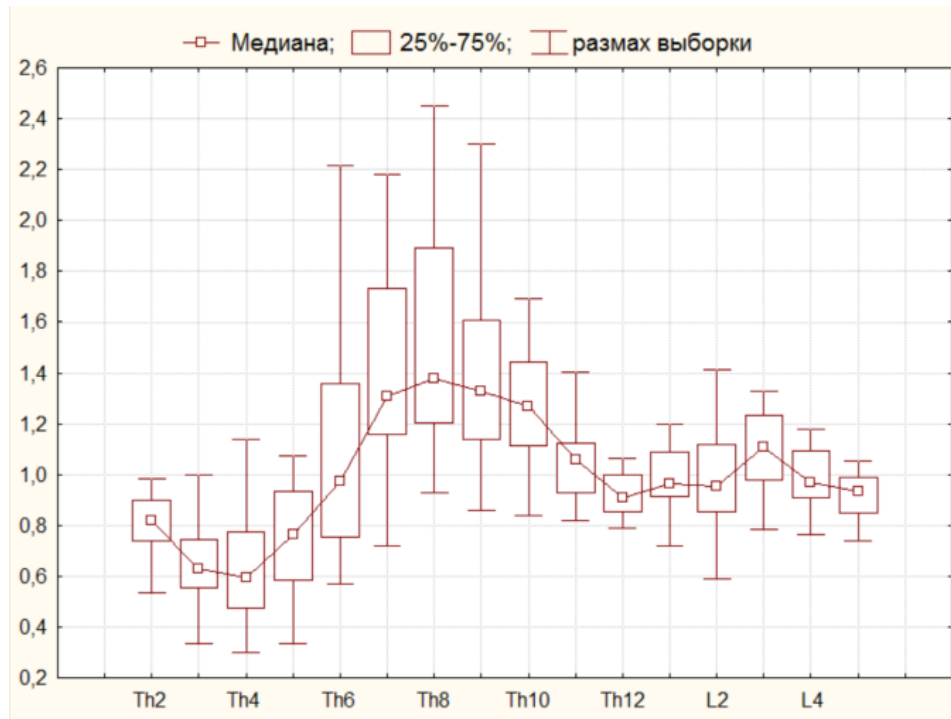


Рис. 44. Совместная диаграмма Тьюки «ящики с усами» для значений коэффициентов асимметрии площадей корней дуг позвонков грудного и поясничного отделов

Корреляционный анализ методом корреляционных плеяд В.П.Терентьева был проведен для десяти признаков: угла сколиоза и еще девяти анатомо-антропометрических характеристик апикального позвонка (рис. 45).

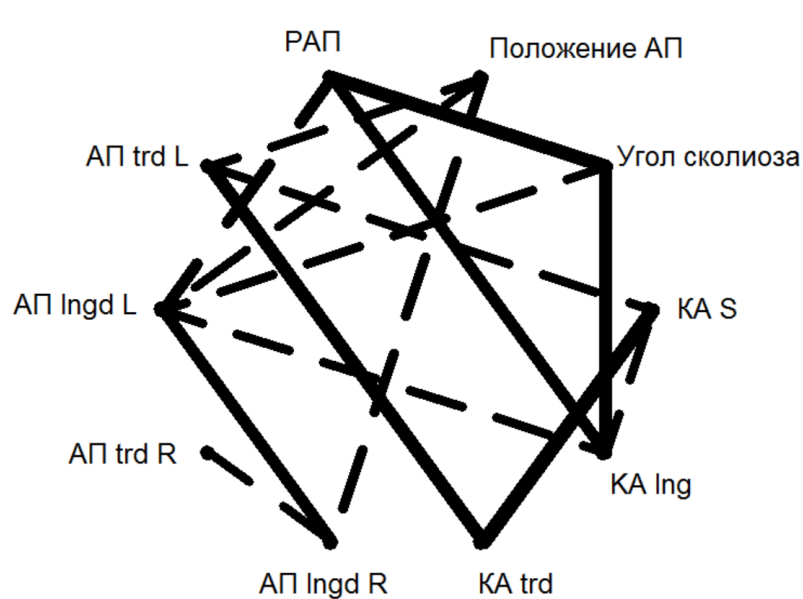


Рис. 45. Диаграмма корреляционных плеяд по Терентьеву

Сплошная линия соответствует значениям коэффициента корреляции Пирсона r , по модулю превышающим 0,7: $|r| > 0,7$. Пунктир соответствует диапазону: $0,5 < |r| < 0,7$. Толщина линий пропорциональна соответствующим значениям модуля r .

На диаграмме отмечены связи признаков, коэффициент корреляции r которых значимо отличается от нуля на уровне значимости $P < 0,05$. Выделяется плеяда уровня $|r| > 0,7$ (сплошная линия на рис. 45), состоящая из признаков РАП, угла сколиотической деформации и KAlng. Это подчеркивает клиническую значимость связи между ротацией АП как локальной характеристикой пространственного положения позвонка, величиной угла сколиоза по Cobb как глобальной характеристикой и соотношением продольных диаметров корней дуг АП как отражением структуральной деформации самого АП. Спускаясь до уровня плеяд $|r| > 0,5$ (пунктир на рис. 45), к указанной плеяде прибавляется признак АП lngd L. Выделяются сильные корреляционные связи между коэффициентом асимметрии площадей корней дуг и коэффициентом асимметрии поперечных диаметров корней дуг и поперечным диаметром левого корня дуги апикального позвонка, которые на уровне $|r| > 0,5$ образуют плеяду.

Необходимо подчеркнуть впервые выявленную нами закономерность, заключающуюся в выраженной асимметрии правых и левых поперечных диаметров корней дуг позвонков верхнегрудного отдела позвоночника на уровне Th3-Th4 у пациентов с правосторонним идиопатическим сколиозом грудной локализации, несмотря на отсутствие структуральной компенсаторной противодуги и торсионных изменений этих позвонков. У всех пациентов, вошедших в группу данного исследования, отмечалось преобладание размеров поперечных диаметров левых корней дуг позвонков над правыми, подтверждавшееся их коэффициентом асимметрии, медиана которого для уровня Th3 и Th4 позвонков составила 0,60-0,63 («Закономерность изменения анатомо-антропометрических показателей корней дуг позвонков у детей с правосторонним идиопатическим сколиозом

грудной локализации» - свидетельство №490 на открытие от 18.03.2016, выдано Российской Академией естественных наук и Международной академией авторов научных открытий и изобретений).

Очень важно отметить тот факт, что при анализе выраженности сколиотических изменений на вершине основной дуги искривления у детей с правосторонним грудным идиопатическим сколиозом отмечалась сильная корреляционная связь (коэффициент Пирсона $|r| > 0,7$) между величиной угла сколиотической деформации и ротацией апикального позвонка, а также предложенным нами коэффициентом асимметрии продольных диаметров корней дуг на уровне апикального позвонка. Согласно полученным результатам выявлена особенность, заключающаяся в том, что чем больше величина угла сколиотической дуги деформации, тем больше величина ротации и более выраженный коэффициент асимметрии продольных диаметров корней дуг апикального позвонка. Одновременно с этим необходимо обратить внимание на отсутствие корреляционной связи величины угла сколиотического искривления и РАП с размером поперечного диаметра левого корня дуги и коэффициентом асимметрии поперечных диаметров апикального позвонка.

Таким образом, можно утверждать, что выявленная сильная корреляционная связь между величиной основной дуги деформации, ротацией апикального позвонка и коэффициентом асимметрии продольных диаметров корней дуг на его уровне у детей с правосторонним идиопатическим сколиозом грудной локализации отражает закономерности формирования и развития структуральных изменений, происходящих в позвонках, в результате онтогенеза сколиотического процесса.

Таким образом, выявленные особенности параметров костных структур позвоночника у детей с правосторонним идиопатическим сколиозом грудной локализации позволили доказать структуральные изменения, которые происходят в телах позвонков в результате онтогенеза сколиотического процесса. Знание закономерностей изменения анатомо-антропометрических

параметров костных структур тел позвонков позволили осуществить рациональное предоперационное планирование и точно определить уровни и возможности корректной установки транспедикулярных опорных элементов металлоконструкции во время хирургического вмешательства.

4.2. Анализ анатомо-антропометрических параметров позвонков у детей с идиопатическим сколиозом грудопоясничной и поясничной локализации с применением 3D-КТ навигации

Исследование проведено у 26 пациентов в возрасте от 14 до 18 лет с идиопатическим сколиозом грудопоясничной/поясничной локализации 3 и 4 степени по В.Д.Чаклину. Распределение по половому признаку было характерным для деформаций позвоночника при идиопатическом сколиозе: 5 пациентов мужского пола, 21 – женского пола. Во всех наблюдениях направленность грудопоясничной/поясничной сколиотической дуги была левосторонней.

Согласно данным исследования угол сколиотической деформации, определенный по вышеописанной методике, составил от $39,8^{\circ}$ до $84,3^{\circ}$ (среднее – $59,5^{\circ}$). Угол РАП колебался от $17,7^{\circ}$ до $50,5^{\circ}$ (среднее – $34,6^{\circ}$), угол РППП - от $15,3^{\circ}$ до $42,8^{\circ}$ (среднее – $28,3^{\circ}$), угол РДПП находился в пределах от $16,2^{\circ}$ до $35,7^{\circ}$ (среднее – $25,2^{\circ}$).

Абсолютные значения поперечных и продольных диаметров корней дуг позвонков грудного и поясничного отделов позвоночника, площадей корней дуг и их коэффициентов асимметрии представлены в таблицах 11, 12 и 13.

Размеры поперечных диаметров корней дуг и коэффициент их асимметрии

Позвонок	trdR, мм	trdL, мм	KAtrd
Th2	5,8±0,7	5,8±0,7	1,00 (0,89-1,23)
Th3	4,4±0,8	4,3±0,7	1,02 (0,80-1,50)
Th4	3,7±0,9	4,0±0,7	0,93 (0,53-1,56)
Th5	3,8±1,0	3,8±0,8	1,03 (0,61-1,34)
Th6	4,1±1,0	3,6±0,7	1,20 (0,62-1,66)
Th7	4,0±1,2	3,5±0,5	1,24 (0,58-1,50)
Th8	4,2±1,0	3,6±0,6	1,15 (0,72-1,46)
Th9	4,7±0,9	4,0±0,7	1,23 (0,84-1,38)
Th10	5,3±1,1	5,3±1,1	1,02 (0,82-1,30)
Th11	6,4±1,5	7,1±1,6	0,93 (0,64-1,37)
Th12	5,6±2,0	6,8±1,7	0,82 (0,52-1,11)
L1	4,7±1,7	5,6±1,2	0,81 (0,59-1,29)
L2	5,7±1,0	6,0±1,1	0,92 (0,59-1,33)
L3	7,3±1,9	7,6±1,4	0,97 (0,78-1,09)
L4	9,0±1,2	10,2±1,9	0,90 (0,73-1,05)
L5	13,3±1,6	15,1±2,7	0,90 (0,77-1,05)

Таблица 12

Размеры продольных диаметров корней дуг и коэффициент их асимметрии

Позвонок	l _{ngdR} , мм	l _{ngdL} , мм	K _A l _{ngd}
Th2	11,3±1,3	11,3±1,8	0,99 (0,88-1,21)
Th3	11,8±1,6	11,5±2,3	1,04 (0,82-1,22)
Th4	10,6±1,3	11,1±1,6	0,95 (0,80-1,08)
Th5	11,0±1,1	10,9±1,5	0,99 (0,85-1,20)
Th6	11,4±1,2	11,1±1,5	1,03 (0,88-1,23)
Th7	11,9±1,2	11,5±1,5	1,02 (0,89-1,19)
Th8	11,5±1,2	12,0±1,6	0,96 (0,75-1,11)
Th9	12,6±1,2	13,3±1,9	0,94 (0,85-1,18)
Th10	14,2±1,3	16,1±1,6	0,91 (0,75-0,99)
Th11	15,0±1,5	18,8±2,3	0,82 (0,69-0,90)
Th12	14,1±1,8	16,3±1,8	0,87 (0,73-0,96)
L1	13,3±1,3	15,1±1,4	0,92 (0,72-1,00)
L2	13,4±1,5	14,8±1,6	0,94 (0,74-1,02)
L3	14,2±1,1	13,8±1,5	1,02 (0,92-1,19)
L4	13,5±1,9	12,0±1,2	1,08 (0,98-1,42)
L5	12,8±1,9	11,7±2,0	1,05 (0,89-1,57)

Произведение поперечных и продольных диаметров корней дуг и
коэффициент их асимметрии

Позвонок	SR, мм ²	SL, мм ²	KAS
Th2	66,0±12,1	65,8±14,2	0,98 (0,83-1,21)
Th3	51,6±12,8	49,7±17,3	1,02 (0,66-1,82)
Th4	39,3±11,6	44,7±11,5	0,88 (0,43-1,59)
Th5	41,3±11,1	41,0±10,9	1,02 (0,52-1,58)
Th6	47,1±12,3	40,6±11,5	1,28 (0,54-1,88)
Th7	46,9±14,8	40,4±6,3	1,41 (0,56-1,75)
Th8	48,5±14,8	43,2±10,2	1,06 (0,75-1,61)
Th9	59,6±12,8	53,5±10,4	1,17 (0,78-1,29)
Th10	76,7±21,4	85,6±22,2	0,97 (0,67-1,15)
Th11	96,4±28,3	134,5±37,4	0,76 (0,48-1,19)
Th12	78,3±28,3	111,6±31,0	0,68 (0,48-1,06)
L1	63,3±24,8	85,1±20,9	0,67 (0,45-1,19)
L2	76,8±18,4	89,0±20,9	0,90 (0,52-1,25)
L3	104,2±32,3	104,7±24,6	1,00 (0,72-1,24)
L4	120,8±27,0	122,0±25,7	0,99 (0,79-1,24)
L5	170,4±36,0	174,5±31,1	0,96 (0,75-1,39)

Для значений поперечных и продольных диаметров корней дуг, их площадей данные в таблицах представлены в виде - среднее ± стандартное отклонение; для значений коэффициентов асимметрии данные представлены в виде – медиана, минимум – максимум.

Для более детального рассмотрения различий между диаметрами правых и левых корней дуг позвонков и определения закономерностей изменений их размеров, а также коэффициентов асимметрии, в зависимости от отдела позвоночника, нами был применен визуальный анализ диаграмм Тьюки.

При проведении анализа изменения значений trdR были установлены определенные особенности для этих типов деформаций, заключающиеся в том, что верхнегрудном отделе позвоночника значения trdR уменьшались с уровня Th2 позвонка ($5,8 \pm 0,7$ мм), достигая минимальных значений на уровне Th4 позвонка ($3,7 \pm 0,9$ мм). После этого отмечалось увеличение размеров в кранио-каудальном направлении, достигавшее своего максимума на уровне Th11 позвонка ($6,4 \pm 1,5$ мм). Затем наблюдалось уменьшение значения до уровня L1 позвонка ($4,7 \pm 1,7$ мм). В каудальных сегментах поясничного отдела позвоночника отмечено увеличение значения trdR с уровня L2 позвонка ($5,7 \pm 1,0$ мм) до L5 позвонка ($13,3 \pm 1,6$ мм).

Для значений trdL закономерность полученных изменений на диаграмме была следующей. Отмечалось плавное уменьшение размеров с уровня Th2 позвонка ($5,8 \pm 0,7$ мм) с достижением минимальных значений на уровне Th7 позвонка ($3,5 \pm 0,5$ мм). Очередной особенностью параметров trdL заключалась в увеличении по направлению к Th11 позвонку, достигая значения $7,1 \pm 1,6$ мм. Затем наблюдалось уменьшение значения до уровня L1 позвонка ($5,6 \pm 1,2$ мм) с последующим нарастанием размеров поперечных диаметров корней дуг в кранио-каудальном направлении с уровня L2 позвонка ($6,0 \pm 1,1$ мм) с достижением максимальных значений на уровне L5 позвонка ($15,1 \pm 2,7$ мм) (рис. 46).

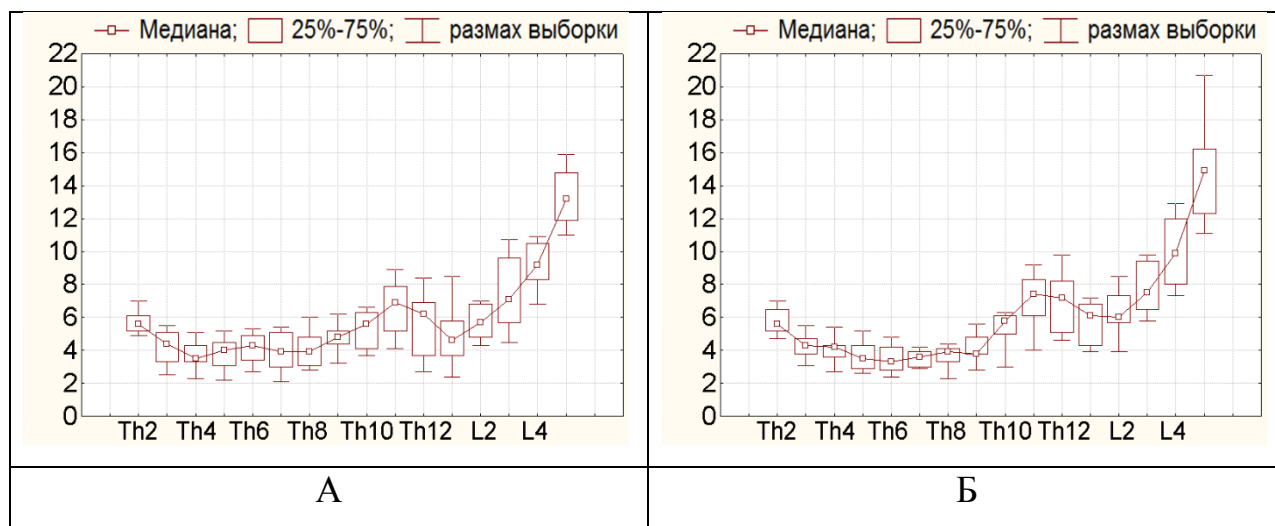


Рис. 46. Совместная диаграмма Тьюки «ящики с усами» для значений поперечных диаметров правых (А) и левых (Б) корней дуг позвонков грудного и поясничного отделов позвоночника

При проведении визуального анализа характера изменений размеров продольных диаметров корней дуг были отмечены схожие закономерности для значений lngdR и lngdL для грудного и поясничного отделов позвоночника. Особенностью этих параметров заключались в том, что значение lngdR незначительно увеличивалось с уровня Th2 позвонка ($11,3 \pm 1,3$ мм) до уровня Th3 позвонка ($11,8 \pm 1,6$ мм), с последующим уменьшением показателей до $10,6 \pm 1,3$ мм на уровне Th4 позвонка. Затем с уровня Th5 позвонка отмечалось плавное увеличение значения lngdR с $11,0 \pm 1,1$ мм, достигая своего максимума на уровне Th11 позвонка ($15,0 \pm 1,5$ мм). После этого наблюдалось уменьшение значения этого параметра на уровне L1 позвонка ($13,3 \pm 1,3$ мм) с последующим увеличением значения lngdR и достижением своего максимума на уровне L3 позвонка ($14,2 \pm 1,1$ мм) и последующим уменьшением в кранио-каудальном направлении, характеризуясь минимальными значениями на уровне L5 позвонка ($12,8 \pm 1,9$ мм).

При анализе распределения значений признака lngdL в грудном отделе позвоночника у пациентов с идиопатическим сколиозом грудопоясничной/поясничной локализации выявлены следующие

особенности. Отмечено незначительное увеличение показателей с уровня Th2 позвонка ($11,3 \pm 1,8$ мм) до уровня Th3 позвонка ($11,5 \pm 2,3$ мм), с последующим уменьшением до $10,9 \pm 1,5$ мм на уровне Th5 позвонка. Затем наблюдалось увеличение значения lngdL с $11,1 \pm 1,5$ мм с уровня Th6 позвонка, достигавшее своего максимума на уровне Th11 позвонка ($18,8 \pm 2,3$ мм). В последующем с уровня Th12 позвонка вновь отмечено уменьшение значения lngdL с $16,3 \pm 1,8$ мм в кранио-каудальном направлении с достижением минимальных значений ($11,7 \pm 2,0$ мм) на уровне L5 позвонка (рис. 47).

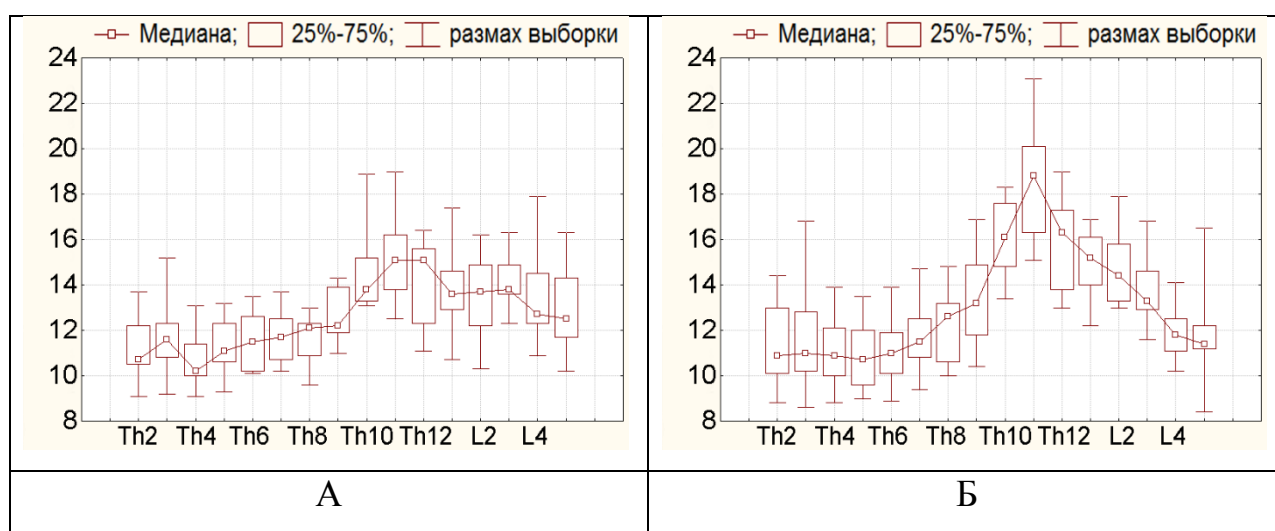


Рис. 47. Совместная диаграмма Тьюки «ящики с усами» для значений продольных диаметров правых (А) и левых (Б) корней дуг позвонков грудного и поясничного отделов позвоночника

При оценке коэффициентов асимметрии поперечных и продольных диаметров корней дуг в грудном и поясничном отделах позвоночника были выявлены следующие закономерности.

Особенностью параметров KAtrd в верхнегрудном отделе позвоночника и до уровня Th5 позвонка включительно имел значения близкие к единице. На уровне Th6-Th9 позвонков отмечалось значимое отклонение KAtrd в пределах от 1,15 (0,72-1,46) до 1,24 (0,58-1,50). Такие изменения характеризовали преобладание размеров правых поперечных

диаметров корней дуг на левыми на данном уровне. На уровне Th10 и Th11 позвонков KAtrd вновь характеризовался значениями близкими к единице. В зоне расположения апикальных позвонков на уровне Th12-L1 максимальное отклонение KAtrd от единицы составило – 0,81 (0,59-1,29), что показывало преобладание размеров trdL над размерами trdR. Далее в поясничном отделе позвоночника показатели KAtrd с уровня L2 до L5 позвонка включительно приближались к единице.

Для KAlngd выявленные закономерности асимметрии были несколько иными. Так, параметры KAlngd с уровня Th2 позвонка до Th10 позвонка включительно имели значения близкие к единице. Зона максимального отклонения значений KAlngd от единицы была расположена на уровне Th11-Th12 позвонков, составив 0,82 и 0,87, соответственно. Значения KAlngd в поясничном отделе позвоночника находились близко к единице, характеризуя тем самым отсутствие выраженных структуральных изменений (рис. 48).

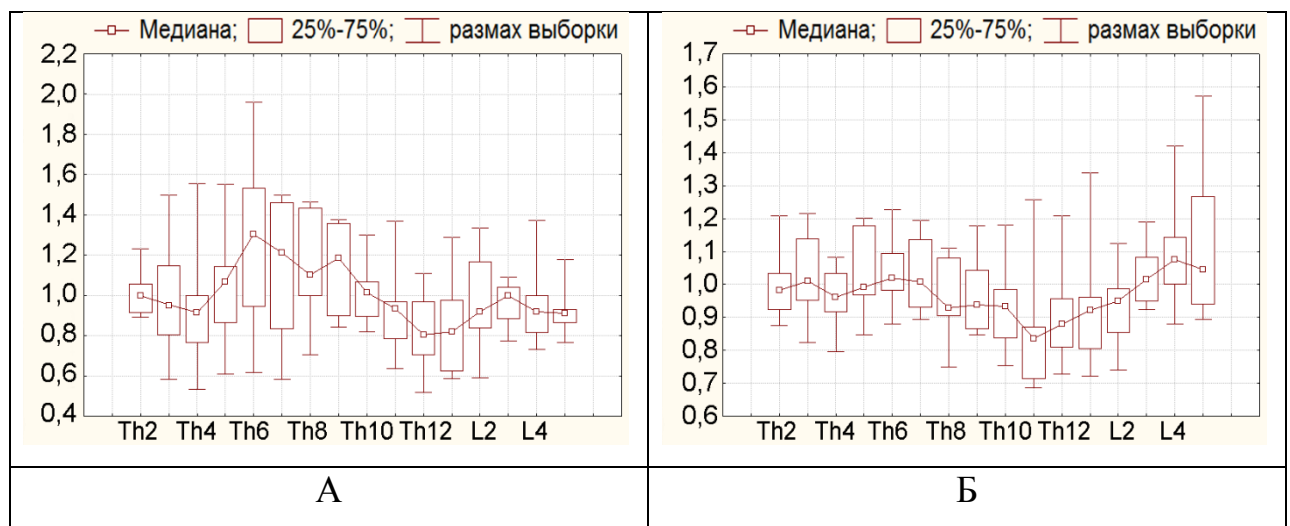


Рис. 48. Совместная диаграмма Тьюки «ящики с усами» для значений коэффициентов асимметрии поперечных (А) и продольных (Б) диаметров корней дуг позвонков грудного и поясничного отделов позвоночника

При оценке показателей площадей корней дуг были выявлены следующие закономерности их изменений. Особенностью изменений этих

параметров у детей с деформацией позвоночника заключались у уменьшении значения SR с уровня Th2 позвонка ($66,0 \pm 12,1 \text{ мм}^2$), достигая минимума на уровне Th4 позвонка ($39,3 \pm 11,6 \text{ мм}^2$), в последующем отмечалось его увеличение в кранио-каудальном направлении, достигавшее своего максимума на уровне Th11 позвонка ($96,4 \pm 28,3 \text{ мм}^2$). Затем наблюдалось уменьшение значения SR до уровня L1 позвонка ($63,3 \pm 24,8 \text{ мм}^2$), с последующим его увеличением в кранио-каудальном направлении с достижением максимальных значений ($174,5 \pm 31,1 \text{ мм}^2$) на уровне L5 позвонка (рис. 49).

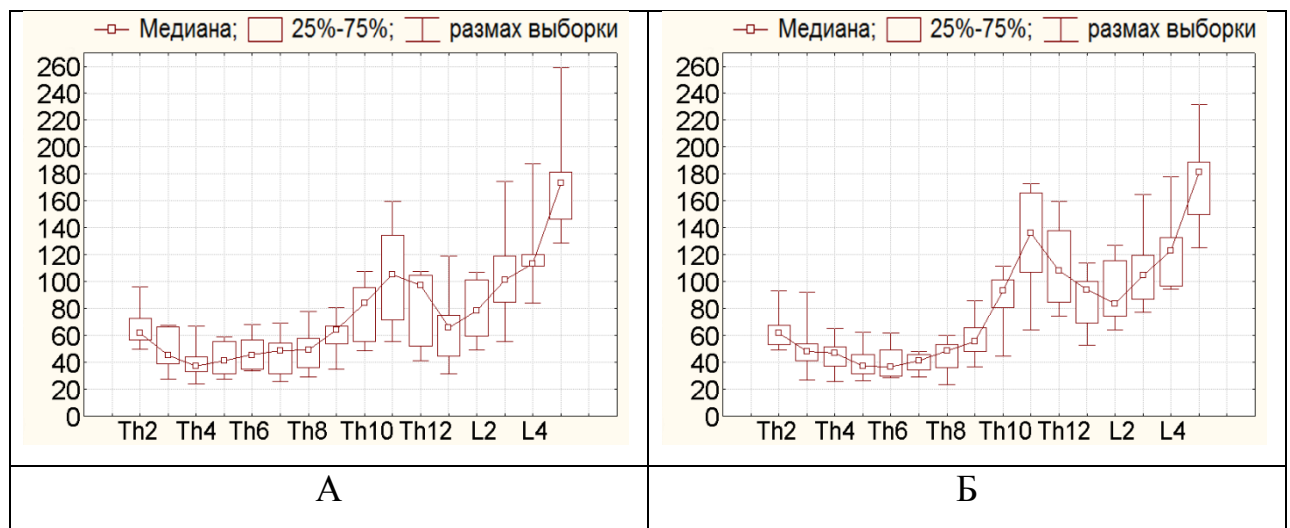


Рис. 49. Совместная диаграмма Тьюки «ящики с усами» для значений площадей диаметров правых (А) и левых (Б) корней дуг позвонков грудного и поясничного отделов позвоночника

При проведении анализа показателей коэффициента асимметрии площадей корней дуг были выявлены особенности, заключающиеся в его отклонении от единицы на нескольких уровнях позвонков в грудном отделе позвоночника, имеющие разнонаправленный характер изменений. Так, значения KAS имели максимальные отклонения от единицы на уровне Th4 позвонка – 0,88 (0,43-1,59), Th6 – 1,28 (0,54-1,88) и Th7 – 1,41 (0,56-1,75). Далее с уровня Th8 до Th10 позвонка включительно значения KAS были приближены к единице. Затем вновь отмечалась выраженная асимметрия

площадей корней дуг с уровня Th11 позвонка - 0,76 (0,48-1,19) с достижением максимального отклонения значений KAS от единицы на уровне L1 позвонка - 0,67 (0,45-1,19). Очередной особенностью изменения этих значений заключалась в приближении значения KAS к единице с уровня L2 позвонка, характеризуя тем самым отсутствие выраженных структуральных изменений в этом сегменте позвоночника (рис. 50).

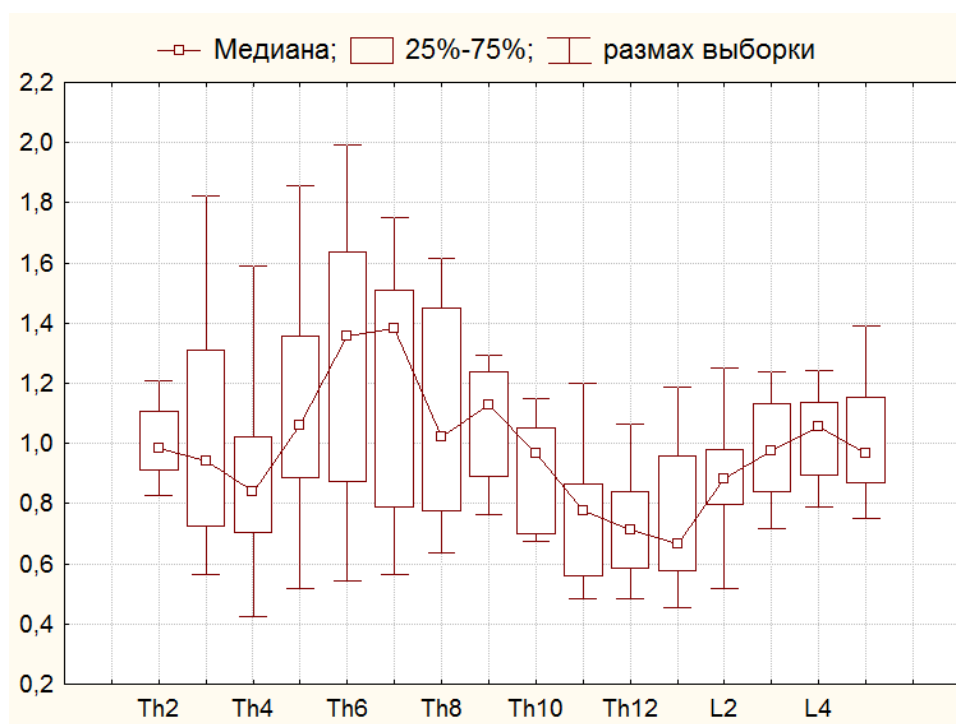


Рис. 50. Совместная диаграмма Тьюки «ящики с усами» для значений коэффициентов асимметрии площадей корней дуг позвонков грудного и поясничного отделов

Корреляционный анализ методом корреляционных плеяд В.П.Терентьева был проведен для десяти признаков: угла сколиотической деформации и еще девяти анатомо-антропометрических характеристик апикального позвонка (рис. 51).

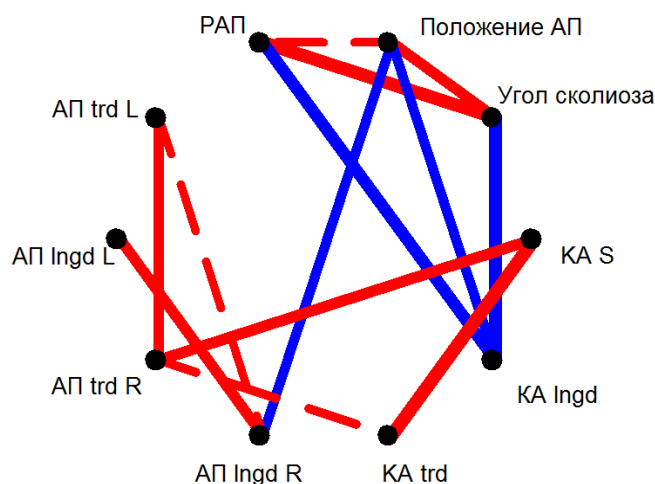


Рис. 51. Диаграмма корреляционных связей анализируемых признаков больных группы LenkeV

Сплошные линии соответствуют уровню значимости $|r| > 0,8$, пунктир – $|r| > 0,6$. Толщина линии пропорциональна величине $|r|$. Положительные значения r соответствуют красным линиям, отрицательные – синим

На диаграмме рисунка 51 отметим две плеяды признаков. Первая плеяда уровня $|r| > 0,8$, объединяет признаки РАП, величину угла сколиоза и KA_{Ingd} . Она иллюстрирует клиническую значимость связи между ротацией АП как локальной характеристикой пространственного положения позвонка, величиной угла сколиоза по Cobb как глобальной характеристикой и соотношением продольных диаметров корней дуг АП как отражением структуральной деформации самого АП. На уровне $|r| > 0,6$ к ней присоединяется еще и положение АП. Другую плеяду на уровне $|r| > 0,6$ плеяду образуют признаки AP_{trdR} , KA_{trd} и KA_S .

Проведенный анализ особенностей анатомо-антропометрических параметров позвонков у детей с идиопатическим левосторонним сколиозом грудопоясничной/поясничной локализации при помощи 3D-КТ навигации позволил выявить определенные закономерности и установить корреляционные связи между абсолютными и относительными значениями параметров позвонков при V типе идиопатического сколиоза по Lenke.

Выявлена разная степень асимметрии костных структур апикальных позвонков при локализации основной дуги сколиотической деформации в грудном и груднопоясничном/поясничном отделах позвоночника.

Анатомические размеры поперечных и продольных диаметров корней дуг с вогнутой и выпуклой стороны на вершине основной дуги деформации превышали 4,0 мм, что позволяет у данной категории пациентов осуществить тотальную транспедикулярную фиксацию на протяжении дуги искривления с обеих сторон.

С целью выявления выраженности структуральных изменений на уровне апикального позвонка в качестве группы сравнения были включены данные по коэффициентам асимметрии апикального позвонка у 20 пациентов с идиопатическим правосторонним грудным сколиозом, рассмотренных выше. При проведении сравнительного анализа коэффициентов асимметрии апикального позвонка у пациентов с первым и пятым типом идиопатического сколиоза по классификации L.Lenke были определенные особенности и получены статистически значимые отличия. Эти отличия свидетельствуют о принципиально разной степени асимметрии костных структур апикальных позвонков при локализации основной дуги сколиотической деформации в грудном и груднопоясничном/поясничном отделах позвоночника (табл. 14).

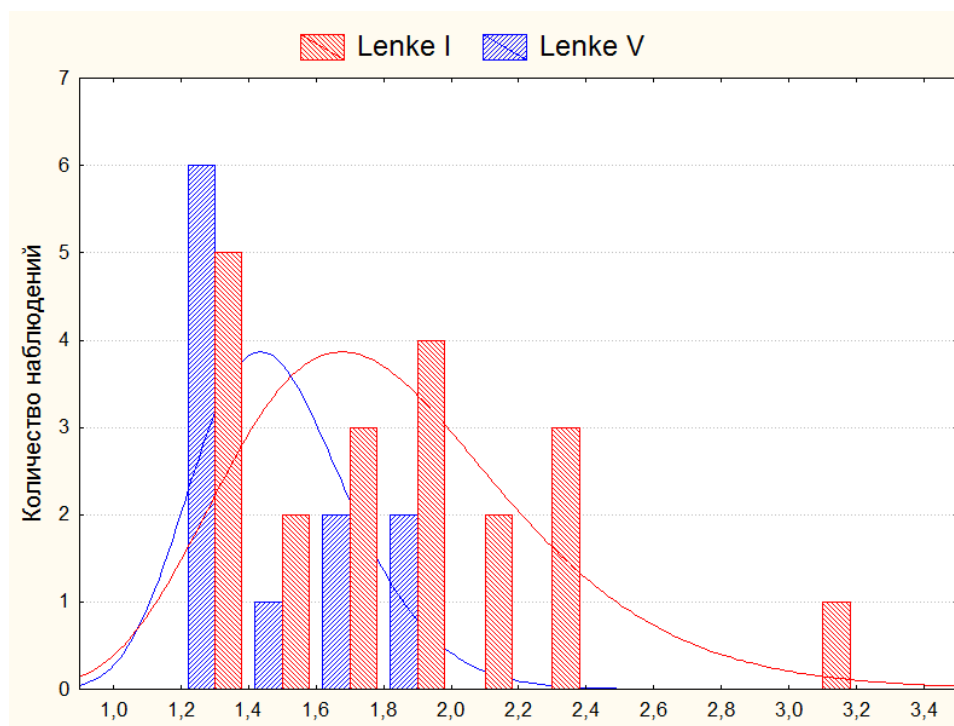
Таблица 14

Коэффициенты асимметрии апикальных позвонков у пациентов с идиопатическим сколиозом типов LenkeI и LenkeV

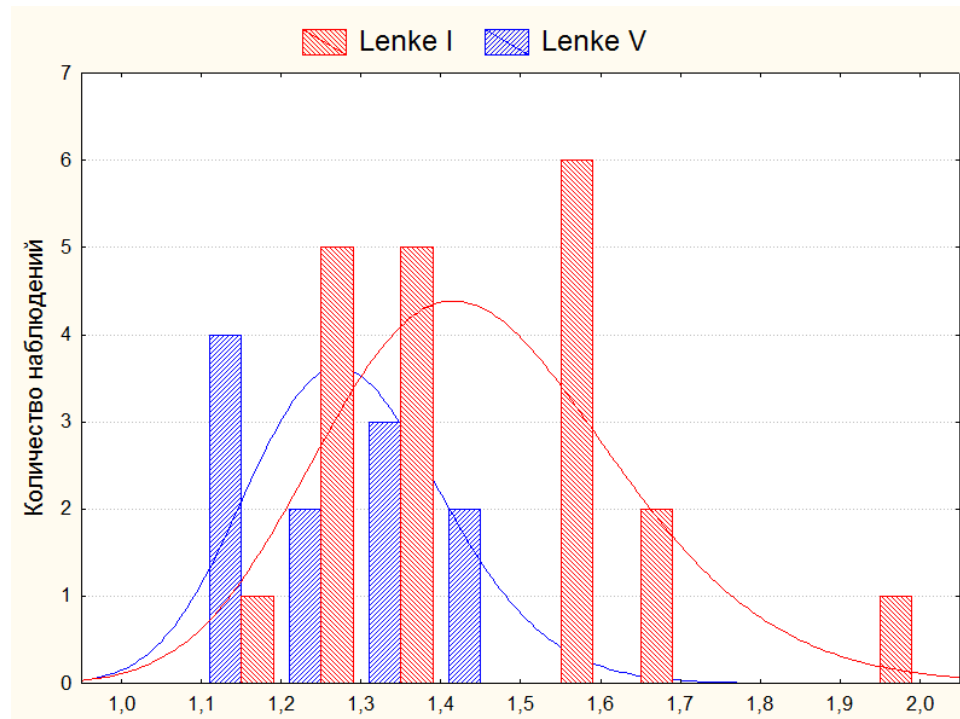
Коэффициенты асимметрии	Lenke I	Lenke V	t-критерий	F-критерий
KAtrd	1,77 (1,25; 3,11)	1,47 (1,26; 1,93)	P < 0,028	P = 0,168
KAlngd	1,44 (1,19; 1,90)	1,28 (1,12; 1,46)	P < 0,015	P = 0,337
KAS	2,36 (1,50; 4,73)	1,66 (1,16; 2,20)	P < 0,002	P = 0,129

Данные представлены в виде: геометрическое среднее (выборочный 95%-й доверительный интервал). Логарифмы значений всех трех коэффициентов были распределены нормально (критерий Колмогорова-Смирнова). Дисперсии логарифмов коэффициентов значимо не отличались (F-критерий Фишера). Тест Стьюдента применялся для логарифмов значений коэффициентов асимметрии. Во всех трех случаях различия оказались статистически значимы.

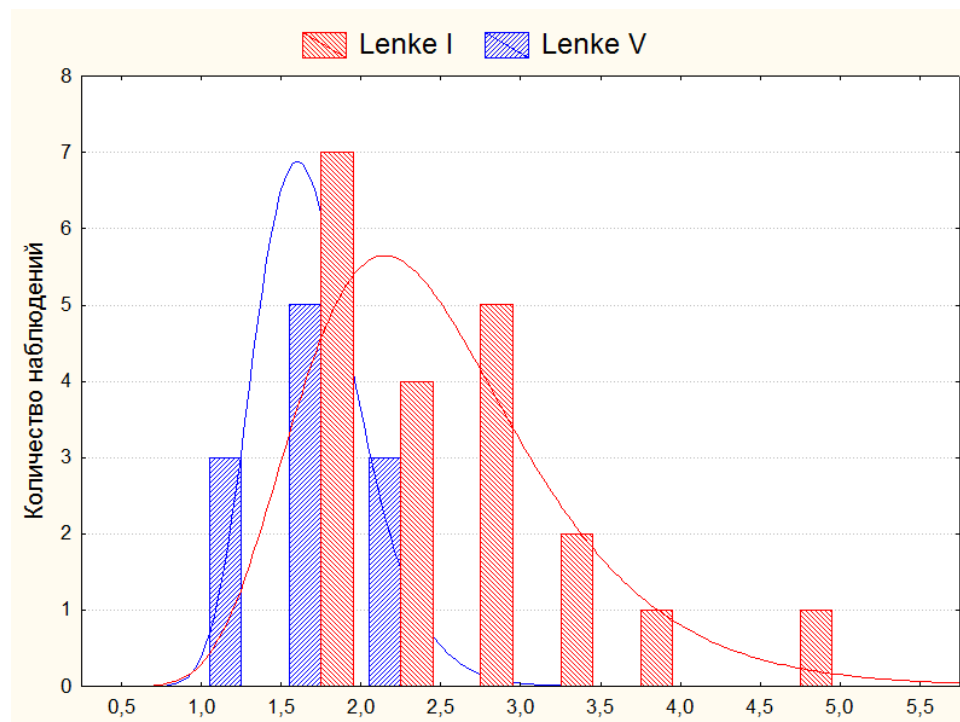
При визуальном анализе гистограмм коэффициентов асимметрии различие КА в сравниваемых группах пациентов хорошо видно по смещению пиков огибающих (рис. 52 А, Б, В).



А



Б



В

Рис. 52. Совместная гистограмма распределения значений признаков KAtrd (А), KAlngd (Б), KAS (В) в группах пациентов с идиопатическим сколиозом типов I и V (по L. Lenke). Огибающие выборочных значений соответствуют логарифмически нормальному распределению (тест Колмогорова – Смирнова)

Для всех трех коэффициентов определяется большая выраженность асимметрии для апикальных позвонков I типа сколиоза по L.Lenke по сравнению с апикальными позвонками при V типе сколиоза.

Таким образом, анатомические размеры поперечных и продольных диаметров корней дуг с вогнутой и выпуклой стороны на вершине основной дуги деформации у пациентов с идиопатическим сколиозом тип LenkeV превышали 4,0 мм. Это говорит о том, что у данной категории пациентов можно осуществить тотальную транспедикулярную фиксацию на протяжении дуги искривления с обеих сторон. Данная особенность является кардинальным отличием от сколиотической деформации у пациентов с типом LenkeI, где с вогнутой стороны основной дуги искривления поперечный диаметр корней дуг позвонков апикальной зоны составил в среднем 3,6 мм.

При анализе коэффициентов асимметрии поперечных и продольных диаметров корней дуг позвонков апикальной зоны, отмечено, что значения K_{Atrd} и K_{Alng} составили 0,81-0,82 и 0,87-0,92, соответственно. Однако, наибольшая выраженность асимметрии костных структур позвонков, выявленная на уровне апикального позвонка грудопоясничной/поясничной сколиотической дуги деформации, характеризовалась коэффициентом асимметрии их площадей ($KAS = 0,67 - 0,68$). Необходимо отметить, что изменения значения KAS также имели выраженные отклонения от единицы на уровне Th4 позвонка – 0,88 и Th6 и –и Th7 позвонков (1,41 и 1,28), то есть вне зоны основной структуральной дуги сколиотического искривления. Статистический анализ не выявил подобных изменений KAS для верхнегрудного отдела и каудальных сегментов поясничного отдела позвоночника. Чувствительность данного коэффициента к асимметрии корней дуг и его диаграммная наглядность в отражении структуральных изменений позволяет рассматривать его в качестве интегрального показателя выраженности сколиотического процесса при различных типах сколиоза.

При проведении корреляционного анализа методом корреляционных плеяд В.П.Терентьева также определялась плеяда (РАП, угол сколиоза и KA_{Ingd}), выявленная ранее у пациентов с грудным типом идиопатического сколиоза. Схожесть в закономерностях сколиотического процесса для I и V типов по Lenke идиопатического сколиоза выражалась в отсутствии корреляционной связи величины угла сколиотического искривления и РАП с размером поперечного диаметра правого корня дуги и коэффициентом асимметрии поперечных диаметров апикального позвонка. Необходимо отметить, что при V типе идиопатического сколиоза по Lenke нами были выявлены корреляционные связи между признаками АП trdR, KA trd и KAS, что говорит о большем влиянии размеров поперечного диаметра корней дуг позвонков апикальной зоны на KAS, являющимся интегральным показателем выраженности асимметрии при сколиотическом процессе.

На основании проведенного статистического анализа, нами установлено достоверное ($p < 0,05$) отличие, заключающееся в большей выраженности асимметрии поперечных и продольных диаметров корней дуг позвонков апикальной зоны при I типе идиопатического сколиоза по Lenke в сравнении с апикальными позвонками при V типе. Выявленные особенности при проведении сравнительного анализа признаков KA_{trd} , KA_{Ingd} и KAS, на наш взгляд, можно объяснить тем, что характер и процесс течения сколиотического процесса, несомненно, оказывает влияние на анатомо-антропометрические параметры и пространственные взаимоотношения костных структур позвонков, входящих в основную дугу искривления. В свою очередь, отличия анализируемых параметров костных структур позвонков в дуге искривления при I и V типе идиопатического сколиоза по Lenke обусловлены различной локализацией основной дуги деформации и отличиями в анатомическом строении позвонков грудного и поясничного отделов, входящих в нее.

ГЛАВА 5

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ИНТРАОПЕРАЦИОННЫХ ПРОТОКОЛОВ РАБОТЫ СИСТЕМЫ АКТИВНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ 3D-КТ НАВИГАЦИИ

5.1. Результаты интраоперационной регистрации по анатомическим ориентирам и по поверхности

Особенностью проведения процедуры интраоперационной регистрации по анатомическим ориентирам у детей с идиопатическим сколиозом для получения наименьшей среднеквадратичной ошибки и высокой точности сопоставления поверхности костных структур позвоночника с поверхностью виртуальной 3D-модели позвоночника в навигационной станции является выбор референтных точек и их количества. Соблюдение определенной последовательности при выборе анатомических ориентиров дорсальных костных структур позвонков, измененных и деформированных в результате их асимметричного роста, развития, торсии и ротации на фоне течения сколиотического процесса в организме ребенка, позволяет обеспечить корректную работу навигационного оборудования.

Для выбора определенных анатомических ориентиров и набора референтных точек, используемых в ходе проведения процедуры регистрации на основании метода оценки погрешности интраоперационной регистрации выполнено исследование у 66 пациентов с идиопатическим сколиозом грудной, грудопоясничной и поясничной локализации, вошедших в основную группу.

При выборе оптимальных точек регистрации необходимо выделить те участки поверхности регистрируемого позвонка, к которым имеется возможность доступа навигационного инструментария и четкая визуализации их структур в ходе хирургического вмешательства при выполнении дорсального доступа. Поверхность, к которой возможно получить доступ, определяется зоной скелетирования дорсальных костных структур позвонков

и выступающими анатомическими элементами на задней опорной колонне позвонков на протяжении дуги деформации наиболее удобные для точной и детальной регистрации. Отличительной особенностью при проведении хирургического доступа к дорсальным структурам грудного и поясничного отделов позвоночника является осуществление их тщательного и досконального скелетирования. При отработке выбора точек, используемых для проведения регистрации по анатомическим ориентирам в грудном отделе позвоночника, нами исходно был выбран Th6 позвонок, в поясничном отделе – L3 позвонок. Критериями выбора точек регистрации являлась их хорошая визуализация и свободная доступность для навигационного инструментария, при помощи которого проводится процедура регистрации.

В грудном отделе позвоночника были выделены следующие анатомические структуры позвонка в качестве возможных претендентов на роль референтных точек для проведения интраоперационной регистрации: остистый отросток (*processus spinosus*), и поперечные отростки (*processus transversus*) регистрируемого позвонка. Для позвонка Th12 дополнительно выбирался сосцевидный отросток (*processus mamillaris*), расположенный на задней поверхности поперечного отростка позвонка. Выбор точек регистрации в грудном отделе обусловлен анатомическими особенностями строения заключающаяся в том, что поперечные отростки направлены кнаружи и несколько кзади, а остистый отросток остроконечен, имеет трехгранную форму и обращен книзу. Немаловажным моментом являлся тот факт, что все костные структуры, выбранные в качестве анатомических ориентиров для регистрации, выступали дорсально и были доступны для навигационных инструментов. Выбранные ориентиры позволили достичь наибольшей точности и правильности сопряжения контуров костной ткани кортикального слоя позвонка с контурами виртуальной 3D-модели позвоночника и получить наименьшую среднеквадратичную погрешность регистрации (табл. 15).

При проведении поиска оптимальных референтных точек для проведения интраоперационной регистрации в поясничном отделе позвоночника были выбраны следующие анатомические структуры позвонка L3: остистый отросток (*processus spinosus*), поперечный отросток (*processus transversus*), верхне- и нижнесуставные отростки (*processus articularis superior et inferior*) и сосцевидный отросток (*processus mamillaris*). Также были учтены особенности анатомического строения поясничных позвонков, обуславливающие специфические особенности проведения процедуры интраоперационной регистрации у детей с идиопатическим сколиозом.

В качестве референтных точек нами были выбраны середина вершины остистого отростка регистрируемого позвонка и середина дугоотростчатого сустава между регистрируемым и вышележащим позвонком с обеих сторон относительно линии остистых отростков. Это позволило достичь наибольшей точности и правильности сопряжения контуров костной ткани кортикального слоя позвонка с контурами виртуальной 3D-модели позвоночника и получить наименьшую среднеквадратичную погрешность регистрации (табл. 15).

При проведении многоуровневой регистрации нами было отмечено, что увеличение количества референтных точек удлиняет время регистрации и увеличивает величину погрешности. Такой набор референтных точек, используемых для регистрации по анатомическим ориентирам давал погрешность больше 1,5 мм и проявлялся несовпадением поверхности позвонка с его виртуальной 3D-моделью в навигационной станции.

Для проведения регистрации по поверхности нами определены следующие зоны поверхности позвонка: вершина остистого отростка, представленная своеобразной «площадкой», боковые поверхности остистого отростка, дорзальные поверхности дуг позвонка, дорзальная поверхность поперечных отростков, дорзальная поверхность верхне- и нижнесуставных отростков поясничного позвонка, дорзальная поверхность нижнесуставных отростков грудного позвонка. Полученная ошибка регистрации по

поверхности для грудного и поясничного отделов позвоночника представлена в таблице 15.

Таблица 15

Среднеквадратичная ошибка регистрации по анатомическим ориентирам и по поверхности, в мм

Позвонок	RegAnMD*	RegSurMD*
Th2	0,0	0,0
Th3	2,6 (2,1 - 3,1)	0,4 (0,4 - 0,5)
Th4	1,0 (0,4 - 2,0)	0,5 (0,4 - 0,6)
Th5	0,8 (0,2 - 2,7)	0,4 (0,3 - 0,7)
Th6	0,8 (0,4 - 2,2)	0,5 (0,4 - 0,6)
Th7	0,8 (0,4 - 1,8)	0,5 (0,3 - 0,7)
Th8	1,0 (0,5 - 2,0)	0,4 (0,3 - 0,7)
Th9	0,9 (0,3 - 3,0)	0,5 (0,3 - 0,8)
Th10	1,0 (0,3 - 4,0)	0,5 (0,3 - 0,8)
Th11	1,1 (0,4 - 5,7)	0,5 (0,3 - 1,0)
Th12	0,9 (0,2 - 1,5)	0,4 (0,3 - 0,4)
L1	1,0 (0,4 - 1,9)	0,5 (0,4 - 0,8)
L2	0,7 (0,2 - 1,6)	0,5 (0,4 - 0,8)
L3	1,0 (0,4 - 2,0)	0,6 (0,4 - 0,7)
L4	1,6 (1,2 - 2,2)	0,4 (0,4 - 0,5)
L5	0,0	0,0

*Примечание - для значений RegAnMD и RegSurMD данные в таблице представлены в виде - среднее геометрическое, минимум – максимум

Для проведения визуального анализа полученной погрешности при выполнении интраоперационной регистрации по анатомическим ориентирам и по поверхности в грудном и поясничном отделах позвоночника были построены диаграммы Тьюки «ящички с усами» (рис. 54, 55).

Ошибка, полученная при регистрации по анатомическим ориентирам в грудном и поясничном отделе в целом, колебалась в пределах от 0,2 мм до 5,7 мм, ее среднее геометрическое значение – 0,7 – 2,6 мм. В верхнегрудном отделе позвоночника, на уровне Th3 и Th4 позвонках разброс ошибки составил от 0,4 мм до 3,1 мм, среднее геометрическое значение ошибки – 1,0 – 2,6 мм.

Для среднегрудного отдела позвоночника (Th5-Th8 позвонки) разброс ошибки составил от 0,2 мм до 2,7 мм, среднее геометрическое значение ошибки – 0,8 – 1,0 мм. В нижнегрудном отделе позвоночника (Th9-Th12 позвонки) ошибка регистрации составила от 0,3 мм до 5,7 мм, среднее геометрическое значение ошибки – 0,9 – 1,1 мм. В поясничном отделе позвоночника значение ошибки, полученной при регистрации по анатомическим ориентирам, находилось в диапазоне от 0,4 мм до 2,2 мм, ее среднее геометрическое значение – 0,7 – 1,6 мм.

Таким образом, на основании проведенного анализа среднеквадратичной ошибки при регистрации по анатомическим ориентирами выявлено, что ее среднее геометрическое значение в грудном и поясничном отделах позвоночника для большинства позвонков составило менее 1,0мм. Ошибка, превышающая значение 1,0мм была отмечена на уровне Th3 позвонка - 2,6 мм, а также на уровне позвонка L4 – 1,6 мм. Такое повышение ошибки было связано с трудностью доступа навигационного инструментария в ходе проведения процедуры регистрации к дорсальным структурам позвонков на данных уровнях, обусловленное эластическим сопротивлением паравертебральных мышц краниального и каудального отделов операционной раны.

Важно подчеркнуть, что максимальные значения полученной погрешности регистрации по анатомическим ориентирам, превышающее 1,0 мм, отмечались в основном на начальном этапе отработки методики интраоперационной регистрации (рис. 53).

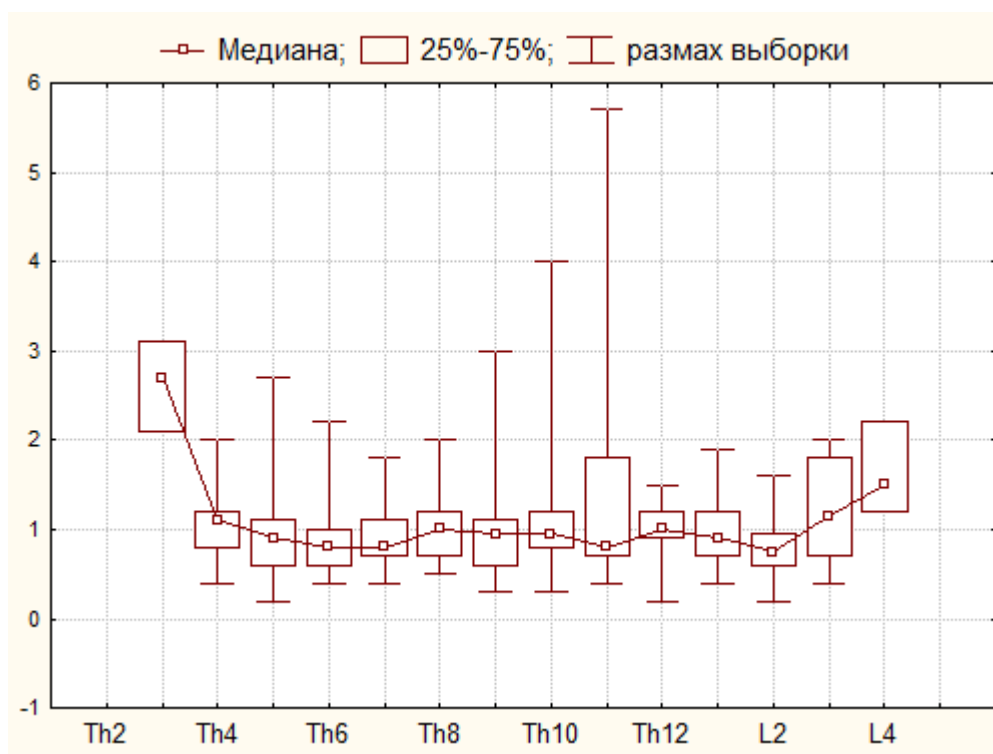


Рис. 53. Погрешность регистрации по анатомическим ориентирам, в мм

Ошибка, полученная при регистрации по поверхности в грудном и поясничном отделе в целом, колебалась в пределах от 0,3 мм до 1,0 мм, ее среднее геометрическое значение – 0,4 – 0,6 мм. В верхнегрудном отделе позвоночника, на уровне Th3 и Th4 позвонков разброс ошибки составил от 0,4 мм до 0,6 мм, среднее геометрическое значение ошибки – 0,4 – 0,5 мм. Для среднегрудного отдела позвоночника (Th5-Th8 позвонки) разброс ошибки, полученной при регистрации по поверхности, составил от 0,3 мм до 0,7 мм, среднее геометрическое значение ошибки – 0,4 – 0,5 мм. В нижнегрудном отделе позвоночника (Th9-Th12 позвонки) ошибка регистрации составила от 0,3 мм до 1,0 мм, среднее геометрическое значение ошибки – 0,4 – 0,5 мм. В поясничном отделе позвоночника значение ошибки,

полученной при регистрации по поверхности, находилось в диапазоне от 0,4 мм до 0,8 мм, ее среднее геометрическое значение – 0,4 – 0,6 мм.

Таким образом, на основании проведенного анализа среднеквадратичной ошибки при регистрации по поверхности определено, что ее среднее геометрическое значение в грудном и поясничном отделах позвоночника для большинства позвонков составила менее 0,5 мм. Среднее геометрическое значение ошибки, незначительно превышающее 0,5 мм, отмечено только на уровне L3 позвонка - 0,6 мм. Разброс значений ошибки, полученной при регистрации по поверхности, был небольшим, составив по дельте всего 0,7 мм. Важно подчеркнуть, что во всех случаях проведения интраоперационной регистрации по поверхности нами была получена высокая точность и правильность сопряжения контуров костной ткани кортикального слоя регистрируемого позвонка с контурами его виртуальной 3D-модели у 66 пациентов основной группы (рис. 54).

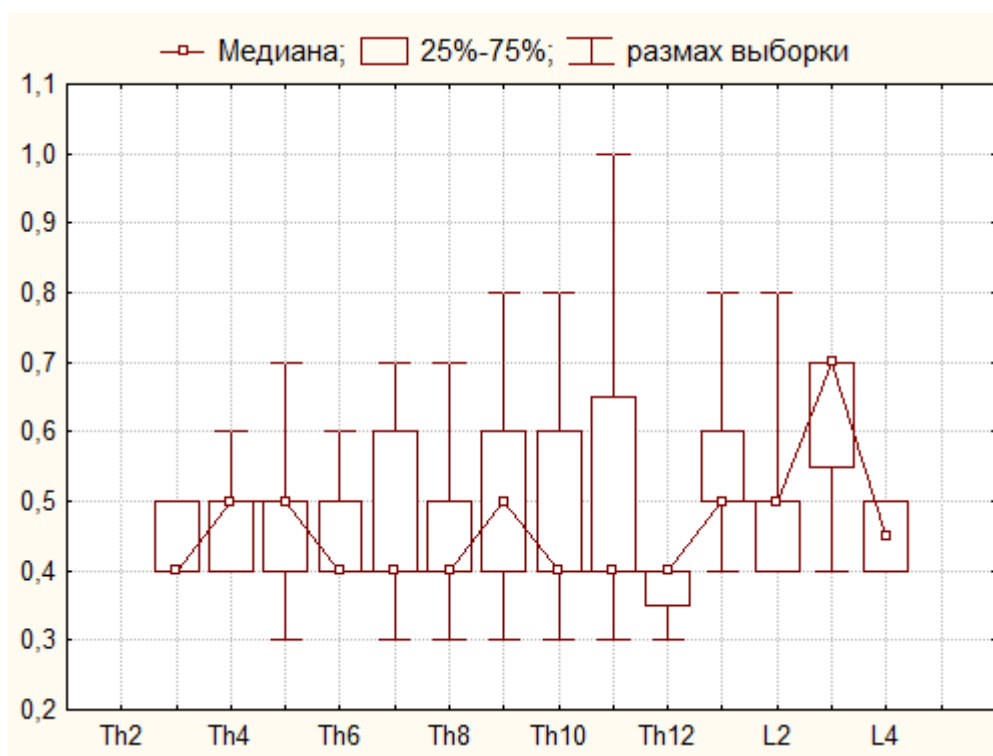


Рис. 54. Погрешность регистрации по поверхности, в мм

Разработанный нами вариант планирования референтных точек для регистрации по анатомическим ориентирам у детей с идиопатическим сколиозом позволил снизить среднеквадратичную ошибку, получаемую при регистрации в ходе операции, и добиться точности сопряжения контуров костной ткани кортикального слоя позвонка с контурами его виртуальной 3D-модели, построенной в компьютере навигационной станции. Также было установлено, что одноуровневая регистрация и сочетание регистрации по анатомическим ориентирам с регистрацией по поверхности позволяет получить наибольшую точность в работе навигационной станции.

5.2. Результаты исследования процедуры формирования костных каналов для ТПФ при помощи системы активной оптической 3D-КТ навигации

На основании разработанных протоколов интраоперационной регистрации у 66 пациентов основной группы была проведена оценка количества уровней регистрации по анатомическим ориентирам и по поверхности, выполненных на протяжении зоны инструментального спондилодеза в ходе хирургического вмешательства в грудном и поясничном отделах позвоночника.

Краниальная граница инструментальной зоны стабилизации заканчивалась на позвонке Th3 в 13 наблюдениях, на Th4 – у 31 ребенка, на Th5 – у 12 пациентов, Th10 – 12 случаев. Среднегрудной и нижнегрудной отделы позвоночника были полностью включены в зону спондилодеза у 54 пациентов. Каудальная граница зоны металлофиксации оканчивалась на L1 позвонке в 14 наблюдениях, на L2 – в 9 случаях, на L3 – у 31 ребенка и на L4 позвонке – у 12 пациентов (табл. 16).

Таблица 16

Зона инструментального спондилодеза (n=66)

Количество позвонков	Зона спондилодеза			
	УТ*	МТ*	ЛТ*	L*
0	22 (33,3 %)	12 (18,2%)	-	-
1	31 (47 %)	-	-	14 (21,2 %)
2	13 (19,7 %)	-	-	9 (13,6 %)
3	-	-	12 (18,2%)	31 (47 %)
4	-	54 (81,8 %)	54 (81,8 %)	12 (18,2 %)

*Примечание: УТ-верхнегрудной, МТ – среднегрудной, ЛТ – нижнегрудной и L – поясничный отдел позвоночника

Количество позвонков, вошедших в зону спондилодеза, находилось в пределах от 6 до 14, среднее геометрическое значение – 10,8 позвонков.

Общее количество выполненных регистраций у 66 пациентов основной группы составило 608. Из них по анатомическим ориентирам - 380, по поверхности – 228 регистраций. В среднем на одного пациента пришлось 5,8 уровней регистрации по анатомическим ориентирам ($5,9 \pm 2,1$) и 3,5 уровня регистрации по поверхности ($3,6 \pm 2,8$) (табл. 17).

Таблица 17

Число регистраций по анатомическим ориентирам (N reg An) и регистрации по поверхности (N reg Sur)

Позвонок	N reg An	N reg Sur	Всего
Th2	0	0	0
Th3	6	6	12
Th4	22	14	36
Th5	44	32	76
Th6	40	20	60

Продолжение

Th7	38	20	58
Th8	46	28	74
Th9	28	18	46
Th10	40	22	62
Th11	30	16	46
Th12	18	8	26
L1	18	14	32
L2	32	18	50
L3	12	8	20
L4	6	4	10
L5	0	0	0
Всего	380	228	608

При проведении визуального анализа диаграммы числа регистраций по анатомическим ориентирам и по поверхности выявлено, что наибольшее количество выполненных регистраций по анатомическим ориентирам отмечено в среднегрудном отделе позвоночника с максимальным значением на уровне Th8 позвонка – 46, в нижнегрудном отделе позвоночника наибольшее количество выполненных регистраций по анатомическим ориентирам было на уровне Th10 позвонка – 40, в поясничном отделе позвоночника – на уровне L2 позвонка (32 регистрации по анатомическим ориентирам). Распределение абсолютного числа регистраций по поверхности по отношению к грудному и поясничному отделам позвоночника имело сходный характер (рис. 55).

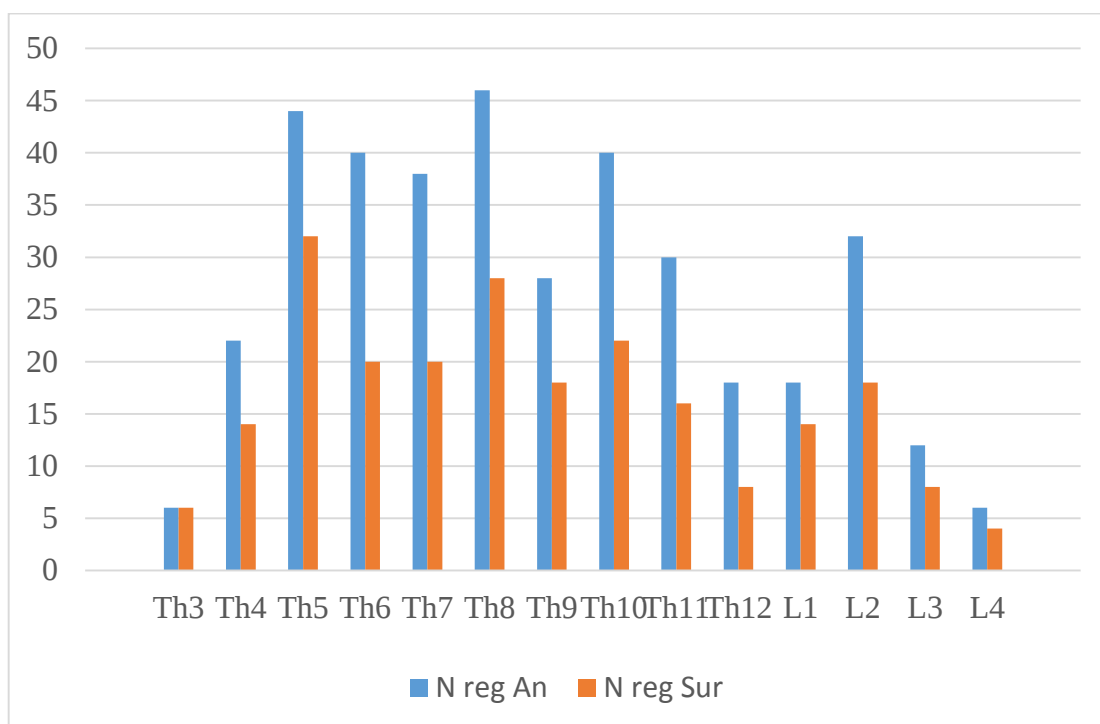


Рис. 55. Диаграмма распределения числа регистраций по анатомическим ориентирам и регистрации по поверхности

В верхнегрудном отделе позвоночника для установки транспедикулярных винтов в 33,3% наблюдений регистрация по анатомическим ориентирам проводилась на одном уровне, в 3% случаев – на двух уровнях. Такой низкий процент регистраций обусловлен в 2 раза меньшим количеством позвонков (только Th3 и Th4 позвонки), вошедших в зону спондилодеза (краниальная граница инструментальной зоны стабилизации - позвонок Th3), что соответственно говорит об истинном соотношении числа уровней регистрации к количеству инструментированных позвонков - $\frac{1}{2}$. В двух третях случаев (63,7 %) регистрация не проводилась, т.к. формирование каналов для транспедикулярных опорных элементов в верхнегрудном отделе позвоночника осуществляли с зарегистрированного позвонка Th5.

В среднегрудном отделе позвоночника отмечено увеличение числа уровней регистраций по отношению к количеству инструментированных позвонков. В одной трети наблюдений (33,3 %) для формирования каналов

потребовалось провести три регистрации, во второй трети наблюдений (30,3 %) регистрация по анатомическим ориентирам была проведена на двух уровнях. Отмечено увеличение, по сравнению с верхнегрудным отделом позвоночника, процента наблюдений (19,8 %), где для формирования каналов пришлось прибегнуть к четырехуровневой регистрации. В 3% случаев регистрация не проводилась, что было обусловлено формированием каналов с зарегистрированных позвонков Th4 и/или Th9.

В нижнегрудном отделе позвоночника соотношение числа уровней регистраций к количеству инструментированных позвонков было несколько иным. В 47 % случаев формирование костных каналов было осуществлено с двух уровней регистрации, в 37,9 % - с 1 уровня, в 9,1 % случаев (как и в поясничном отделе) выполнено три регистрации. В 3% наблюдений регистрацию проводили на каждом позвонке нижнегрудного отдела позвоночника (соотношение 4/4). В 3% случаев регистрация не проводилась, т.к. формирование каналов для транспедикулярных опорных элементов осуществляли с зарегистрированных позвонков Th8 и/или L1.

При проведении анализа количества уровней регистрации по анатомическим ориентирам в поясничном отделе позвоночника выявлено, что в 43,9 % случаев формирование костных каналов для винтов было осуществлено с одного уровня регистрации, в 16,7 % - с 2 уровней, и только в 9,1 % случаев потребовалось выполнить три регистрации. В трети случаев (30,3 %) регистрация не проводилась, т.к. формирование каналов для транспедикулярных опорных элементов в поясничном отделе позвоночника осуществляли с зарегистрированного позвонка Th12 (табл. 18).

Таблица 18

Регистрация по анатомическим ориентирам в грудном и поясничном отделах позвоночника (n=66)

N _r	Регистрация по анатомическим ориентирам			
	UT	MT	LT	L
0	42 (63,7 %)	2 (3 %)	2 (3 %)	20 (30,3 %)
1	22 (33,3 %)	9 (13,6 %)	25 (37,9 %)	29 (43,9 %)
2	2 (3 %)	20 (30,3 %)	31 (47 %)	11 (16,7 %)
3	-	22 (33,3 %)	6 (9,1 %)	6 (9,1 %)
4	-	13 (19,8 %)	2 (3 %)	-

При проведении анализа количества уровней регистрации по поверхности в поясничном отделе позвоночника установлено, что в 30,3 % случаев формирование костных каналов для винтов было осуществлено с одного уровня регистрации, в 19,7 % - с 2 уровней. В половине наблюдений (50%) регистрация по поверхности в поясничном отделе позвоночника не проводилась, т.к. для формирования каналов для транспедикулярных опорных элементов было достаточно выполненной регистрации по анатомическим ориентирам.

В нижнегрудном отделе отмечен более высокий процент выполненных регистраций по поверхности, чем в поясничном отделе позвоночника. Так в 42,5 % случаев формирование костных каналов было осуществлено с одного уровня регистрации, в 13,6 % - с 2 уровней. В 3 % случаев для установки транспедикулярных винтов в нижнегрудной отдел позвоночника выполнено три регистрации. В 3% наблюдений для достижения достаточной точности сопряжения контуров костной ткани кортикального слоя позвонка с контурами его виртуальной 3D-модели регистрацию по поверхности пришлось выполнить на каждом позвонке данного сегмента. В 37,9% случаев

регистрация по поверхности в нижнегрудном отделе позвоночника не проводилась.

В среднегрудном отделе позвоночника также было отмечено продолжающееся увеличение числа уровней регистраций по поверхности в сравнении с нижнегрудным и поясничными отделами позвоночника. Чуть более чем в одной четверти наблюдений (28,8 %) регистрация была проведена на одном уровне, в 24,2% случаев – на двух уровнях, в 19,8% наблюдений для формирования каналов в позвонках среднегрудного отдела позвоночника потребовалось провести три регистрации. Доля наблюдений в которых для формирования транспедикулярных каналов в телах позвонков возникла необходимость в выполнении четырехуровневой регистрации была такой же, как и в нижнегрудном отделе позвоночника, и составила 3%. И лишь менее, чем в одной четверти случаев (24,2%) регистрация по поверхности не проводилась.

В верхнегрудном отделе позвоночника для установки транспедикулярных винтов в 22,7% наблюдений регистрация по поверхности проводилась на одном уровне, в 3% случаев – на двух уровнях. Более чем в двух третях случаев (74,3 %) регистрация не проводилась. Данное уменьшение доли регистрации по поверхности в верхнегрудном отделе позвоночника было обусловлено высоким суммарным процентом многоуровневых регистраций, выполненных на смежном сегменте (позвонки Th5) среднегрудного отдела позвоночника (табл. 19).

Таблица 19

Регистрация по поверхности в грудном и поясничном отделах позвоночника
(n=66)

Nr	Регистрация по поверхности			
	UT	MT	LT	L
0	49 (74.3 %)	16 (24,2 %)	25 (37,9 %)	33 (50 %)
1	15 (22.7 %)	19 (28,8 %)	28 (42,5 %)	20 (30,3 %)
2	2 (3 %)	16 (24,2 %)	9 (13,6 %)	13 (19,7 %)
3	-	13 (19,8 %)	2 (3 %)	-
4	-	2 (3 %)	2 (3 %)	-

Для определения средней доли уровней регистрации по анатомическим ориентирами и по поверхности в грудном и поясничном отделах позвоночника были выполнены описательные статистики, представленные ниже в таблице 20.

Таблица 20

Описательные статистики долей регистраций по анатомическим ориентирам и по поверхности для грудного и поясничного отделов позвоночника

Доли регистрации	Mean±Std.Dev.	Уровень регистрации/Нпозвонков
Доля An UT	52,4±48,7	1,9
Доля An MT	63,3±26,2	1,5
Доля An LT	44,8±21,2	2,2
Доля An L	43,3±26,6	2,3
Доля An общая	47,4±15,2	2,1
Доля Sur UT	33,3±45,6	2,7
Доля Sur MT	36,7±29,1	2,5
Доля Sur LT	23,2±24,2	3,1
Доля Sur L	28,0±24,3	2,9
Доля Sur общая	27,3±20,1	2,9

Необходимо отметить, что при дополнении регистрации по анатомическим ориентирам регистрацией по поверхности возрастает количество инструментированных позвонков с одного уровня, что обусловлено повышением точности сопряжения дорсальной поверхности регистрируемых позвонков с виртуальной моделью позвоночника на протяжении зоны установки транспедикулярных опорных элементов.

Таким образом, при изучении процедуры формирования костных каналов для ТПФ при помощи системы активной оптической 3D-КТ навигации нами было установлено, что в верхнегрудном отделе позвоночника в среднем с одного уровня выполненной регистрации по анатомическим ориентирам при условии сохранения достаточной точности сопряжения контуров костной ткани кортикального слоя позвонка с контурами его виртуальной 3D-модели удалось сформировать каналы для транспедикулярных винтов в 1,9 позвонка.

Для среднегрудного отдела позвоночника соотношение уровень регистрации к инструментированным позвонкам составило – 1/1,5, в нижнегрудном отделе – 1/2,2.

В поясничном отделе позвоночника соотношение уровня регистрации к позвонкам, позволяющее сохранить точность сопряжения контуров кортикального слоя позвонка с контурами его виртуальной 3D-модели, составило 1/2,3.

5.3. Результаты хронометрического исследования

В соответствии с дизайном исследования у 66 пациентов основной группы в ходе проведения проспективного исследования на основании разработанного нами хронометрического протокола были изучены временные характеристики при работе с навигационной станцией на интраоперационном этапе.

5.3.1. Результаты хронометрического исследования процедуры интраоперационной регистрации

В ходе интраоперационной регистрации у всех 66 пациентов основной группы осуществляли мониторинг времени, затрачиваемого на установку нулевого трекера, проведения регистрации по анатомическим ориентирам и по поверхности, и времени, затрачиваемого на формирование костных каналов для транспедикулярных опорных элементов в позвонках, входящих в зону инструментальной фиксации.

По результатам проведенного исследования время установки трекера пациента (нулевого трекера) составило от 35 до 82 секунд (в среднем 55 секунд). Результаты полученных временных характеристик для регистрации по анатомическим ориентирам (RegAntime) и по поверхности (RegSurtime) представлены ниже в таблице 21.

Таблица 21

Время, затрачиваемое на регистрацию по анатомическим ориентирам и по поверхности, в сек.

Позвонок	RegAntime	RegSurtime
Th3	20,8 (14,0 - 31,0)	88,8 (68,0 - 116,0)
Th4	20,5 (4,0 - 365,0)	71,3 (52,0 - 100,0)
Th5	19,7 (4,0 - 222,0)	57,9 (16,0 - 163,0)
Th6	25,3 (4,0 - 105,0)	48,0 (30,0 - 81,0)
Th7	22,4 (4,0 - 152,0)	68,9 (40,0 - 180,0)
Th8	20,7 (4,0 - 151,0)	63,1 (40,0 - 144,0)
Th9	16,7 (4,0 - 74,0)	51,7 (20,0 - 120,0)
Th10	18,8 (5,0 - 173,0)	66,8 (50,0 - 250,0)
Th11	25,9 (6,0 - 360,0)	62,0 (50,0 - 91,0)
Th12	23,2 (6,0 - 118,0)	43,5 (34,0 - 50,0)

Продолжение

L1	22,7 (5,0 - 158,0)	66,0 (45,0 - 120,0)
L2	21,4 (5,0 - 346,0)	52,1 (6,0 - 120,0)
L3	32,4 (10,0 - 111,0)	52,4 (40,0 - 63,0)
L4	73,4 (36,0 - 220,0)	114,9 (60,0 - 220,0)
L5	0,0	0,0

Большинство распределений в таблице имели выраженную логарифмически нормальную форму (критерий Колмогорова-Смирнова и Лиллиефорса не отвергает гипотезу на уровне значимости: $P > 0,1$). В связи с этим данные таблицы представлены в виде среднего геометрического и интервала размаха выборки максимум-минимум

Для проведения визуального анализа времени, затрачиваемого на проведение интраоперационной регистрации по анатомическим ориентирам и по поверхности в грудном и поясничном отделах позвоночника были построены диаграммы Тьюки «ящики с усами» (рис. 57, 58).

Время, затраченное на проведение регистрации по анатомическим ориентирам в грудном и поясничном отделе в целом, колебалось в пределах от 4 до 365 секунд, его среднее геометрическое значение составило от 16,7 до 73,4 секунд. В верхнегрудном отделе позвоночника, на уровне Th3 и Th4 позвонков разброс RegAntime составил от 4 до 365 секунд, среднее геометрическое значение – 20,5 – 20,8 секунд. Для среднегрудного отдела позвоночника (Th5-Th8 позвонки) разброс RegAntime составил от 4 до 222 секунд, среднее геометрическое значение – 19,7 – 25,3 секунд. В нижнегрудном отделе позвоночника (Th9-Th12 позвонки) RegAntime составило от 4 до 360 секунд, среднее геометрическое значение – 16,7 – 25,9 секунд. В поясничном отделе позвоночника значение RegAntime находилось в диапазоне от 5 до 346 секунд, его среднее геометрическое значение составило 21,4 – 73,4 секунд.

Таким образом, на основании проведенного визуального анализа выявлено, что время регистрации по анатомическим ориентирам на графике имеет определенные особенности. Наличие данных выбросов, имеющих большие цифровые показатели (свыше 300 секунд) объяснимо тем, что при начале работы с навигационной станцией в фазе отработки методики регистрации, время, затрачиваемое на проведение данной процедуры, было значительно больше. Однако, медиана значений времени регистрации по анатомическим ориентирам почти на всех уровнях позвонков имела значение, менее 20 секунд (рис. 56).

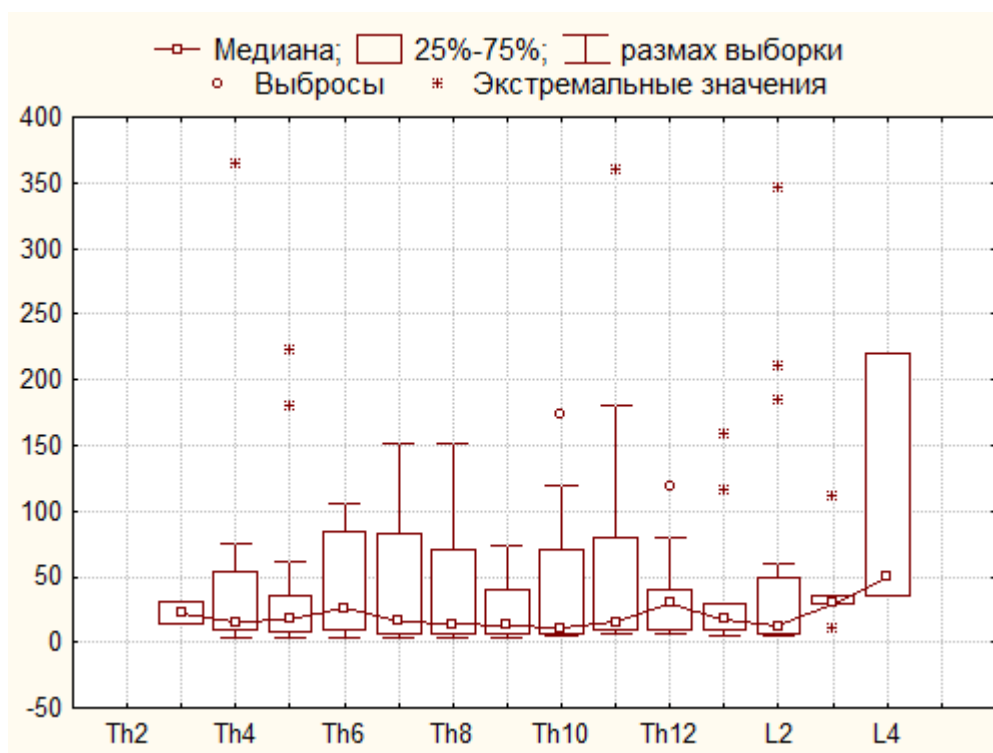


Рис. 56. Время, затрачиваемое на проведение регистрации по анатомическим ориентирам, в сек. Примечание: extremes – экстремальные значения, outliers – выбросы. Значения, имеющие коэффициент разброса более 1,5 относительно медианы – это выбросы, более 3 – экстремальные значения

Время, затраченное на проведение регистрации по поверхности в грудном и поясничном отделе, колебалось в пределах от 6 до 250 секунд, его среднее геометрическое значение составило от 43,5 до 114,9 секунд. В верхнегрудном отделе позвоночника на уровне Th3 и Th4 позвонков разброс RegSurttime составил от 52 до 116 секунд, среднее геометрическое значение – 71,3 – 88,8 секунд. Для среднегрудного отдела позвоночника (Th5-Th8 позвонки) разброс RegSurttime составил от 16 до 180 секунд, среднее геометрическое значение – 48,0 – 68,9 секунд. В нижнегрудном отделе позвоночника (Th9-Th12 позвонки) RegSurttime составило от 20 до 250 секунд, среднее геометрическое значение – 43,5 – 66,8 секунд. В поясничном отделе позвоночника значение RegSurttime находилось в диапазоне от 6 до 220 секунд, его среднее геометрическое значение составило 52,1 – 114,9 секунд.

Таким образом, на основании проведенного визуального анализа выявлено, что время регистрации по поверхности на графике также имело определенные особенности - выбросы. Наличие данных выбросов, имеющих большие цифровые показатели (свыше 240 секунд) также объяснимо с большими затратами времени на проведение регистрации по поверхности на начальном этапе освоения работы с навигационной станцией. Однако, медиана значений времени регистрации по поверхности для большинства уровней позвонков грудного и поясничного составляла менее 70 секунд (рис. 57).

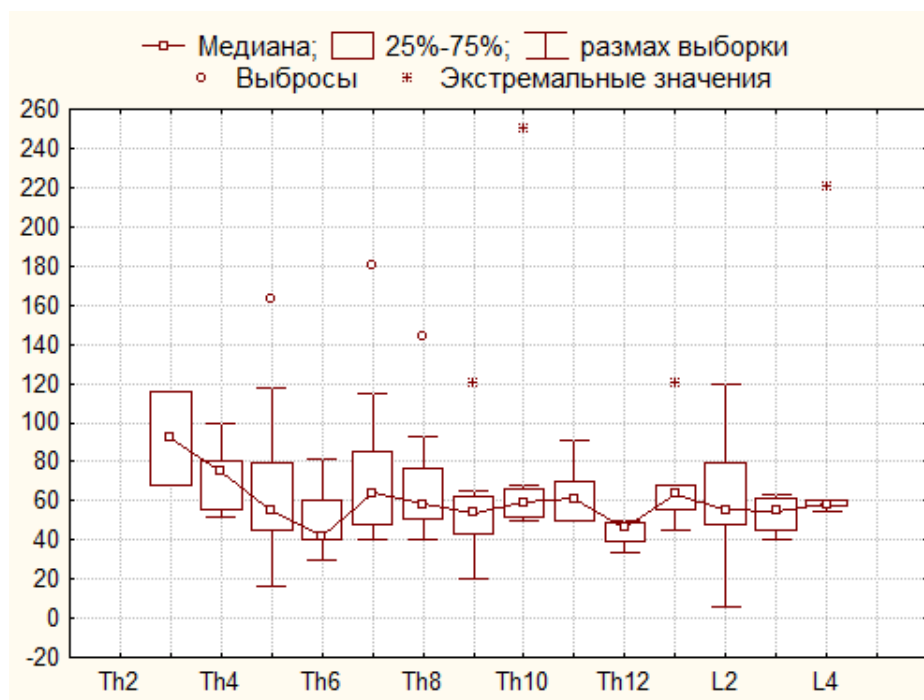


Рис. 57. Время, затрачиваемое на проведение регистрации по поверхности, в сек

5.3.2. Результаты хронометрического исследования формирования каналов для транспедикулярных винтов

Результаты полученных хронометрических данных формирования каналов для транспедикулярных опорных элементов под контролем 3D-КТ навигации с левой (screwLtime) и с правой (screwRtime) сторон относительно линии остистых отростков позвоночника представлены ниже в таблице 22.

Таблица 22

Время, затрачиваемое на формирование костных каналов для транспедикулярных винтов

Позвонок	screwLtime	screwRtime
Th3	31,9 (15,0 - 80,0)	61,0 (61,0 - 61,0)
Th4	37,8 (12,0 - 115,0)	69,4 (39,0 - 193,0)
Th5	49,8 (12,0 - 150,0)	78,2 (24,0 - 319,0)
Th6	54,3 (17,0 - 170,0)	66,5 (20,0 - 280,0)

Продолжение

Th7	64,9 (14,0 - 300,0)	69,5 (25,0 - 480,0)
Th8	78,2 (25,0 - 214,0)	55,0 (19,0 - 180,0)
Th9	65,8 (14,0 - 210,0)	51,4 (13,0 - 240,0)
Th10	67,9 (15,0 - 290,0)	52,5 (12,0 - 200,0)
Th11	54,6 (12,0 - 151,0)	57,5 (17,0 - 220,0)
Th12	59,1 (26,0 - 236,0)	51,9 (17,0 - 310,0)
L1	57,8 (15,0 - 180,0)	50,9 (25,0 - 184,0)
L2	56,6 (25,0 - 409,0)	57,3 (17,0 - 175,0)
L3	57,9 (25,0 - 224,0)	55,4 (19,0 - 308,0)
L4	48,3 (25,0 - 100,0)	47,2 (28,0 - 110,0)

Для значений screwLtime и screwRtime данные в таблице представлены в виде - среднее геометрическое, минимум – максимум. Время формирования костного канала для транспедикулярного винта определяли от момента установки навигационного шила в зону введения транспедикулярного винта до завершения верификации целостности стенок канала пуговчатым зондом.

Для проведения визуального анализа времени, затрачиваемого на формирование каналов для транспедикулярных винтов в грудном и поясничном отделах позвоночника были построены диаграммы Тьюки «ящички с усами» (рис. 58, 59).

Время, затраченное на формирование костных каналов для транспедикулярных винтов с левой стороны относительно линии остистых отростков позвоночника в грудном и поясничном отделе в целом, колебалось в пределах от 12 до 409 секунд, его среднее геометрическое значение составило от 31,9 до 78,2 секунд. В верхнегрудном отделе позвоночника, на уровне Th3 и Th4 позвонков разброс screwLtime составил от 12 до 115

секунд, среднее геометрическое значение – 31,9 – 37,8 секунд. Для среднегрудного отдела позвоночника (Th5-Th8 позвонки) разброс screwLtime составил от 12 до 300 секунд, среднее геометрическое значение – 49,8 – 78,2 секунд. В нижнегрудном отделе позвоночника (Th9-Th12 позвонки) screwLtime составило от 12 до 290 секунд, среднее геометрическое значение – 54,6 – 67,9 секунд. В поясничном отделе позвоночника значение screwLtime находилось в диапазоне от 15 до 409 секунд, его среднее геометрическое значение составило 48,3 – 57,9 секунд (рис. 58).

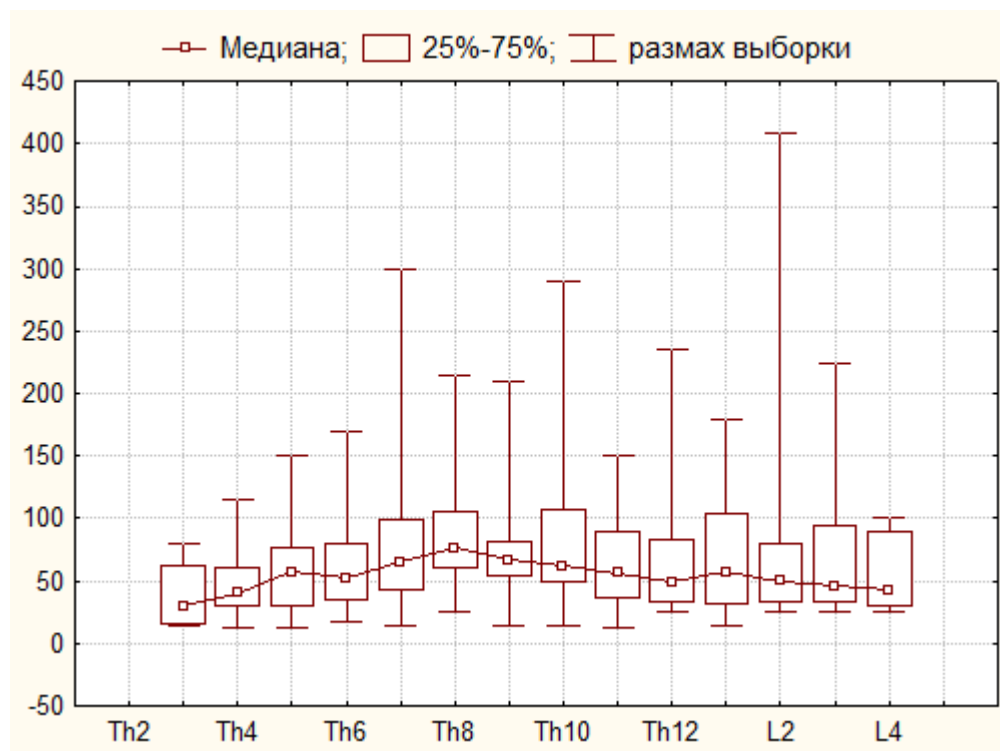


Рис. 58. Время, затрачиваемое на формирование каналов для транспедикулярных винтов слева, в сек

Таким образом, на основании проведенного визуального анализа выявлено, что медиана screwLtime на уровне Th3-Th6 и Th11-L4 позвонков имела значение менее 60 секунд. На позвонках с уровня Th7 до Th10 значение медианы screwLtime незначительно превышало 1 минуту, достигая своего максимального значения (78,2 секунды) на уровне Th8 позвонка. Такое увеличение времени, затрачиваемого на формирование костного

канала для транспедикулярного винта, было связано с анатомо-антропометрическими особенностями корня дуги апикального позвонка, расположенной с вогнутой стороны дуги сколиотической деформации.

Время, затраченное на формирование костных каналов для транспедикулярных винтов с правой стороны относительно линии остистых отростков позвоночника в грудном и поясничном отделе в целом, колебалось в пределах от 12 до 480 секунд, его среднее геометрическое значение составило от 47,2 до 78,2 секунд. В верхнегрудном отделе позвоночника, на уровне Th3 и Th4 позвонков разброс screwRtime составил от 39 до 193 секунд, среднее геометрическое значение – 61,0 – 69,4 секунд. Для среднегрудного отдела позвоночника (Th5-Th8 позвонки) разброс screwRtime составил от 19 до 480 секунд, среднее геометрическое значение – 55,0 – 78,2 секунд. В нижнегрудном отделе позвоночника (Th9-Th12 позвонки) screwRtime составило от 12 до 310 секунд, среднее геометрическое значение – 51,4 – 57,5 секунд (рис. 59).

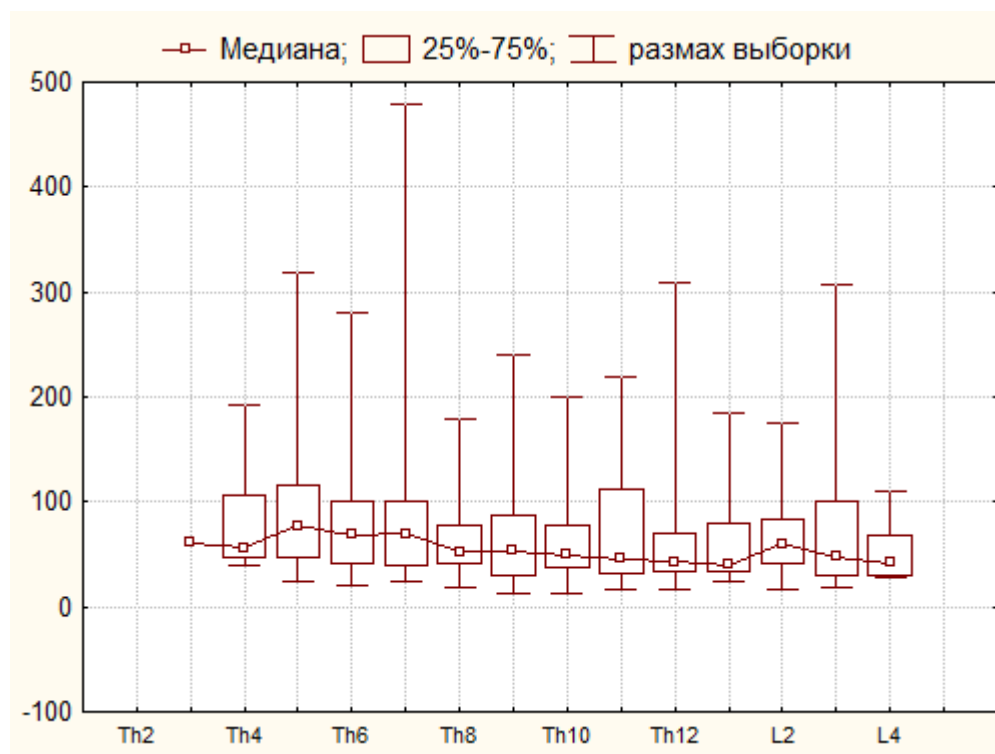


Рис. 59. Время, затрачиваемое на формирование каналов для транспедикулярных винтов справа, в сек

В поясничном отделе позвоночника значение screwRtime находилось в диапазоне от 17 до 308 секунд, его среднее геометрическое значение составило 47,2 – 57,3 секунд. Таким образом, на основании проведенного визуального анализа выявлено, что медиана screwRtime на уровне Th8-L4 позвонков имела значение менее 60 секунд. На позвонках с уровня Th3 до Th7 значение медианы screwRtime незначительно превышало 1 минуту, достигая своего максимального значения (78,2 секунды) на уровне Th5 позвонка.

Такое увеличение времени, затрачиваемое на формирование костных каналов для транспедикулярных винтов, было связано с анатомо-антропометрическими особенностями правых корней дуг позвонков, расположенных близко к краниальной границе грудной дуги сколиотической деформации, заключающимися в их выраженной асимметрии и уменьшением их поперечных диаметров по отношению к размерам поперечных диаметров корней дуг противоположной стороны на данном уровне.

Таким образом, подводя итоги данных, полученных на основании протоколов хронометрии интраоперационной регистрации и формирования каналов для транспедикулярных опорных элементов под контролем 3D-КТ навигации необходимо отметить, что суммарное время, затраченное на проведение регистрации по анатомическим ориентирам и по поверхности, составило от 104 до 310 секунд (1,7 – 33,2 минуты), его среднее геометрическое значение – 347,5 секунд (5,8 минут). Суммарное время, состоящее из совокупности RegAntime, RegSurtime, screwLtime и screwRtime, составило от 435 до 4568 секунд (7,3 – 76,1 минуты), его среднее геометрическое значение – 1555,4 секунд (25,9 минут).

5.3.3. Результаты хронометрического исследования при хирургическом лечении детей с идиопатическим сколиозом по трехкомпонентной методике Ю.И.Поздника

В ходе проведения проспективного исследования в основной группе пациентов, проведения сбора и анализа полученных данных и выработки оптимальной последовательности действий при работе с навигационным оборудованием с целью уменьшения технических сложностей, связанных с кривой обучения (learning curve), применение навигационной станции было изначально осуществлено у пациентов с деформациями позвоночника, не превышавшей 90 градусов по Cobb. Хирургическую коррекцию сколиотической деформации позвоночника таким детям проводили с использованием первого и второго тактических вариантов, применяемых на отделении патологии позвоночника и нейрохирургии ФГБУ НИДОИ им.Г.И.Турнера.

После предварительной отработки технических навыков работы с навигационной станцией в исследование были включены пациенты с тяжелыми формами идиопатического сколиоза, требующих проведения хирургической коррекции деформации позвоночника по трехкомпонентной методике Ю.И.Поздника. Пациентам данной категории также исходно проводили предоперационное исследование, включавшее в себя выполнение КТ-сканирования позвоночника. Однако, при проведении процедуры навигации нами было отмечено возрастание количества уровней интраоперационной регистрации, связанное очевидно со значительной разницей между пространственными межсегментарными взаимоотношениями виртуальной 3D-модели позвоночника и дорсальными структурами позвоночника пациента, расположенного на операционном столе. Для оптимизации работы навигационной станции нами была изменена методика предоперационного обследования и проведен сравнительный анализ количества одноуровневых регистраций по анатомическим ориентирам и временные характеристики при 3D-КТ-навигации в

хирургическом лечении детей с идиопатическим сколиозом 4 степени в зависимости от варианта выполнения КТ-сканирования позвоночника.

В исследование вошло 30 пациентов с идиопатическим сколиозом 4 степени грудной и грудопоясничной локализации в возрасте от 13 до 18 лет, 6 мальчиков и 24 девочки. Величина сколиотической деформации составила от 104° до 136° по Cobb (в среднем 122°).

Всем детям выполняли этапное хирургическое лечение: первый этап — передний релиз на вершине дуги искривления на 4-5 уровнях из переднебокового доступа в сочетании с межтеловым корпорорезом аутокостью (участок ребра) и HALO-феморальное вытяжение; второй этап — курс HALO-феморального вытяжения в течение 14-16 дней. Третий этап — коррекция сколиотической деформации многоопорной металлоконструкцией с транспедикулярными опорными элементами из дорсального доступа в сочетании с локальным спондилодезом аутокостью.

В ходе исследования все пациенты были разделены на две группы: 1 группа (15 детей), которым КТ позвоночника выполняли перед первым этапом хирургического лечения; вторую группу составили 15 пациентов, которым КТ исследование осуществляли после второго этапа хирургического лечения (в конце курса кранио-тибиального вытяжения). В обеих группах оценивали число регистраций по анатомическим ориентирам и время, затраченное на проведение регистрации в ходе хирургического вмешательства с применением статистического метода - U-критерий Манна-Уитни.

У пациентов 1 группы количество уровней регистраций (N_r) по анатомическим ориентирам в ходе операции составило от 7 до 10 ($8,7 \pm 0,88$), во 2 группе N_r - от 4 до 7 ($5,1 \pm 0,88$). Таким образом, на основании полученных данных отмечено большее количество уровней регистраций в ходе операции у пациентов в первой группе по сравнению с группой номер два (уровень значимости различия по критерию Манна-Уитни $p \leq 0.05$). Время, затраченное на проведение регистрации (T_r) в первой группе

составило от 580 до 811 секунд ($703,1 \pm 65,7$ секунд), во второй группе - T_r составило от 151 до 312 секунд ($218,5 \pm 46,99$ секунд). Таким образом, время, затраченное на регистрацию по анатомическим ориентирам в ходе операции, в первой группе пациентов было значительно больше по сравнению со второй группой больных ($p \leq 0.05$).

Результаты исследования показали, что проведенная КТ после дискэктомии и курса HALO-феморального вытяжения приводит к уменьшению количества уровней регистрации по анатомическим ориентирам в ходе операции, а, следовательно, и затраченного времени на эту манипуляцию. Объясняется это тем, что после проведенных двух этапов вмешательства при хирургической коррекции тяжелых форм идиопатического сколиоза меняется положение позвонков на протяжении основной дуги искривления. Именно поэтому выполненная КТ позвоночника перед первым этапом хирургического вмешательства не очень точно отражает позицию позвонков, которая меняется после предшествующих двух этапов лечения, что вынуждает прибегать к большему количеству уровней регистраций по анатомическим ориентирам в ходе операции. Большое количество уровней регистраций приводит к увеличению времени, которое затрачивается на их проведение, и как результат увеличивает общее время самого хирургического вмешательства. Выполненная КТ после проведения двух этапов хирургического лечения позволяет более корректно и точно оценить расположения тел позвонков на протяжении дуги искривления, изменившееся после дискэктомии и проведенного курса HALO-феморального вытяжения, что существенно влияет на количество уровней регистрации по анатомическим ориентирам и время на их проведения в ходе операции.

Таким образом, выполнение КТ исследования позвоночника у детей с идиопатическим сколиозом 4 степени после дискэктомии и курса HALO-феморального вытяжения позволяет уменьшить количество уровней

регистрации по анатомическим ориентирам и время, затрачиваемое на эту процедуру, в ходе хирургического вмешательства.

ГЛАВА 6

РЕЗУЛЬТАТЫ ХИРУРГИЧЕСКОГО ЛЕЧЕНИЯ ДЕТЕЙ С ИДИОПАТИЧЕСКИМ СКОЛИОЗОМ ОСНОВНОЙ И КОНТРОЛЬНОЙ ГРУПП

6.1. Сравнительный анализ результатов хирургического лечения детей с идиопатическим сколиозом с применением 3D-КТ навигации и методом «свободной руки»

В ходе проведения диссертационного исследования был выполнен анализ результатов оперативного лечения 96 детей с идиопатическим сколиозом, находившихся на отделении патологии позвоночника и нейрохирургии ФГБУ НИДОИ им.Г.И.Турнера в период с 2011 по 2015 год. Согласно дизайну проводимого исследования все пациенты были разделены на две группы – основную (I) и контрольную (II).

В проспективную группу исследования (I) вошло 66 пациентов в возрасте от 14 до 18 лет с идиопатическим сколиозом грудной, грудопоясничной и поясничной локализации, прошедших хирургическое лечение деформации позвоночника на отделении патологии позвоночника и нейрохирургии ФГБУ НИДОИ им.Г.И.Турнера с применением системы активной оптической 3D-КТ навигации. В ретроспективную группу (II) включено 30 пациентов в возрасте от 14 до 18 лет с идиопатическим сколиозом, прошедших хирургическое лечение деформации позвоночника на отделении патологии позвоночника и нейрохирургии ФГБУ НИДОИ им.Г.И.Турнера. Данной группе пациентов установку транспедикулярных винтов в позвонки осуществляли методом «free-hand».

Сравнительный анализ результатов осуществлен на основании данных рентгенологического и компьютерно-томографического методов исследования. Оценены основные лучевые параметры сколиотической деформации позвоночника в динамике, проведен сравнительный анализ корректности, правильности и стабильности установки транспедикулярных

винтов в позвонки на основании данных послеоперационного компьютерно-томографического исследования позвоночника у детей с идиопатическим сколиозом обеих групп.

6.1.1. Сравнительный анализ основных лучевых параметров сколиотической деформации позвоночника

Средние величины угла основной дуги сколиотической деформации перед проведением хирургического лечения в основной и контрольной группах были схожими и составили 71° ($40-136^{\circ}$) и 69° ($44-128^{\circ}$) по Cobb, соответственно. Процент коррекции сколиотической деформации позвоночника после выполненного хирургического вмешательства в основной группе составил 83,7% ($48-100\%$) и был значимо выше ($P<0,05$) процента коррекции в контрольной группе наблюдения - 60,3% ($30-72\%$).

Потеря послеоперационной коррекции в основной группе была отмечена на ранних сроках наблюдения (6 месяцев) и не превышала этот показатель и в отдаленный период после операции, составила в среднем 5° , что укладывается в погрешность измерения на основании рентгенологического исследования. В контрольной группе пациентов потеря коррекции деформации позвоночника в отдаленном послеоперационном периоде наблюдения (через 36 месяцев) была больше и составила в среднем 12° (табл. 23).

Таблица 23

Сколиотическая дуга при идиопатическом сколиозе (n=96)*

Группа		До операции	После операции	Через 6 месяцев	Через 12 месяцев	Через 18 месяцев	Через 36 месяцев
Основная	абс.	71° (40-136°)	14° (0-70°)	16° (0-74°)	19° (0-76°)	19° (0-76°)	19° (0-76°)
	%	-	83,7% (48-100%)	81,8% (48-98%)	80,1% (48-96%)	80,1% (48-96%)	80,1% (48-96%)
Контрольная	абс.	69° (44-128°)	28° (18-84°)	31° (26-86°)	37° (28-88°)	40° (30-90°)	40° (30-90°)
	%	-	60,3% (30-72%)	56,2% (30-70%)	53,2% (32-69%)	42,9% (34-68%)	42,9% (34-68%)

*Примечание - данные в таблице представлены в виде - среднее геометрическое, минимум – максимум

При проведении анализа динамики показателей сагиттального профиля позвоночника (кифоз и лордоз) в основной и контрольной группах наблюдения отмечена его нормализация после выполненного хирургического вмешательства, с сохранением данных показателей в отдаленном периоде наблюдения (табл. 24).

Таблица 24

Показатели сагиттального профиля (n=96)*

Группа		До операции	После операции	Через 12 месяцев	Через 36 месяцев
Основная	кифоз	32,4° (6-61°)	20,4° (7-40°)	20,4° (7-40°)	20,4° (7-40°)
	лордоз	32,7° (9-54°)	28° (9-53°)	28° (9-53°)	28° (9-53°)
Контрольная	кифоз	28,8° (8-59°)	27,4° (10-48°)	27,4° (10-48°)	27,4° (10-48°)
	лордоз	30,3° (12-48°)	27,4° (12-46°)	27,4° (12-46°)	27,4° (12-46°)

*Примечание - данные в таблице представлены в виде - среднее геометрическое, минимум – максимум

Среднее геометрическое значение протяженности инструментальной фиксации в основной группе наблюдения составило 10,8 позвонков (от 6 до 14 позвонков), в контрольной группе пациентов отмечалась более протяженная зона спондилодеза по сравнению с предыдущей группой, которая составила – 12,3 (8-15) позвонков.

Угол ротации апикального позвонка в основной группе до операции составил 23,4° (9-50°), после операции – 13,6° (4-26°), процент деротации - 33,5% (0-77%). Угол ротации апикального позвонка в контрольной группе до операции составил 18° (8-39°), после операции – 16,2° (6-34°), процент деротации - 10,2% (0-12%).

Таким образом, при проведении анализа основных лучевых параметров сколиотической деформации позвоночника в основной группе наблюдения в

сравнении с контрольной группой отмечены большая величина полученной коррекции деформации позвоночника, более выраженный деротационный эффект апикального позвонка, уменьшение протяженности зоны инструментального спондилодеза после операции и меньшая потеря достигнутой коррекции в отдаленном периоде наблюдения.

6.1.2. Сравнительный анализ распределения транспедикулярных опорных элементов в грудном и поясничном отделе позвоночника

На основании данных послеоперационного компьютерно-томографического исследования позвоночника у 66 пациентов основной группы и 30 детей контрольной группы была осуществлена оценка количества установленных транспедикулярных винтов в грудном и поясничном отделах позвоночника, а также проведен сравнительный анализ корректности, правильности и стабильности положения опорных элементов в позвонках на протяжении зоны инструментального спондилодеза.

Общее количество установленных транспедикулярных опорных элементов в позвонки на протяжении дуги сколиотической деформации позвоночника в основной группе наблюдения составило 1166, в контрольной группе – 546 винтов. При проведении сравнительного анализа распределения количества винтов по отделам позвоночника выявлено статистически значимое отличие ($P < 0,0001$) для грудного отдела позвоночника, выражающееся в преобладании удельного веса транспедикулярных опорных элементов в группе пациентов, оперированных с применением навигации. Различия для поясничного отдела позвоночника были статистически не значимы ($P = 0,04$) (табл. 25, 26).

Таблица 25

Распределение транспедикулярных винтов по отделам позвоночника*

Отделы позвоночника		Основная группа (n=66)		Контрольная группа (n=30)		χ^2
Грудной отдел	UT	70	803	13	259	P < 0,0001
	MT	305		85		
	LT	428		161		
Поясничный отдел		363		287		P = 0,4
Всего		1166		546		P = 0,04

*P соответствует уровню значимости различия в группах по критерию хи-квадрат (1 степень свободы)

Таблица 26

Распределение суммарного количества винтов по позвонкам и усредненного количества винтов на один позвонок по уровню установки

Позвонок	Основная группа	Контрольная группа	Основная группа	Контрольная группа
Th3	25	2	0,403226	0,0375
Th4	45	11	0,725806	0,275
Th5	75	20	1,209677	0,5
Th6	82	23	1,322581	0,5625
Th7	74	22	1,193548	0,55
Th8	74	20	1,193548	0,4875
Th9	91	24	1,467742	0,5875
Th10	112	32	1,806452	0,8
Th11	117	45	1,887097	1,125
Th12	108	60	1,741935	1,4875
L1	119	67	1,919355	1,675

Продолжение

L2	118	70	1,903226	1,7625
L3	76	71	1,225806	1,775
L4	50	51	0,806452	1,2625
L5	0	28	0	0,35

При рассмотрении совместной гистограммы распределения усредненного количества винтов на один позвонок определяется преобладание установленных транспедикулярных опорных элементов в грудном отделе позвоночника в группе с навигацией, по сравнению с контрольной группой. Это является отличительной и кардинальной особенностью количества установленных опорных элементов металлоконструкции в основной группе пациентов.

В нижнегрудном отделе позвоночника на уровне позвонка Th12 и в поясничном отделе на уровне L1-L2 позвонков распределение суммарного количества винтов было сходным в обеих группах наблюдения. Однако, с уровня позвонка L3 и ниже в контрольной группе отмечалось увеличение усредненного количества транспедикулярных опорных элементов по сравнению с основной группой. Такое отличие является особенностью для пациентов этой группы наблюдения и объясняется большей протяженностью дистальной зоны инструментальной фиксации у этой группы больных (рис. 60).

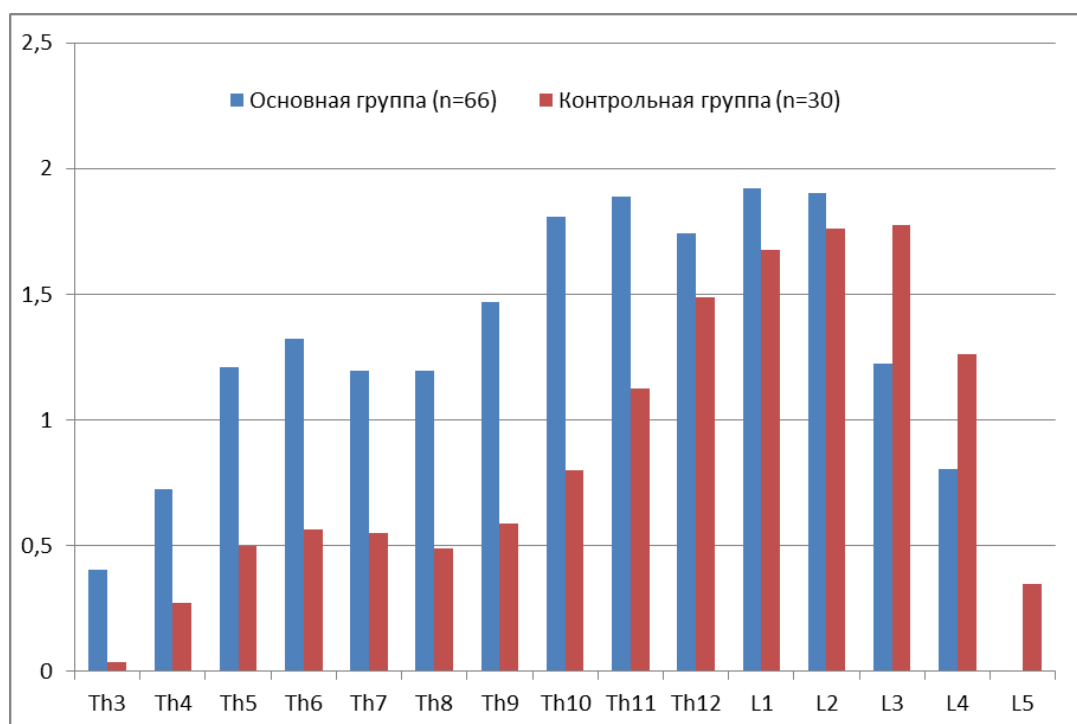


Рис. 60. Совместная гистограмма распределения по позвонкам усредненного количества винтов на один позвонок по позвонкам

Необходимо отметить определенные особенности распределения транспедикулярных винтов в грудном и поясничном отделах позвоночника у пациентов основной группы.

При проведении визуального анализа совместных гистограмм распределения винтов по позвонкам в группе пациентов с навигацией отмечалось преобладание количества винтов с вогнутой стороны деформации на уровне Th3-Th5 позвонков, с максимальным их количеством на уровне Th5 позвонка (46 винтов слева). С уровня Th6 до Th10 позвонка соотношение менялось в противоположную сторону - начинало преобладать количество винтов, установленных с выпуклой стороны искривления, с достижением максимальной разницы на уровне Th8 позвонка (21 винт с вогнутой стороны и 53 винта с выпуклой стороны деформации). В нижнегрудном и поясничном отделах позвоночника соотношение количества установленных винтов в позвонки с вогнутой и выпуклой сторон относительно линии остистых отростков выравнивалось (рис. 61).

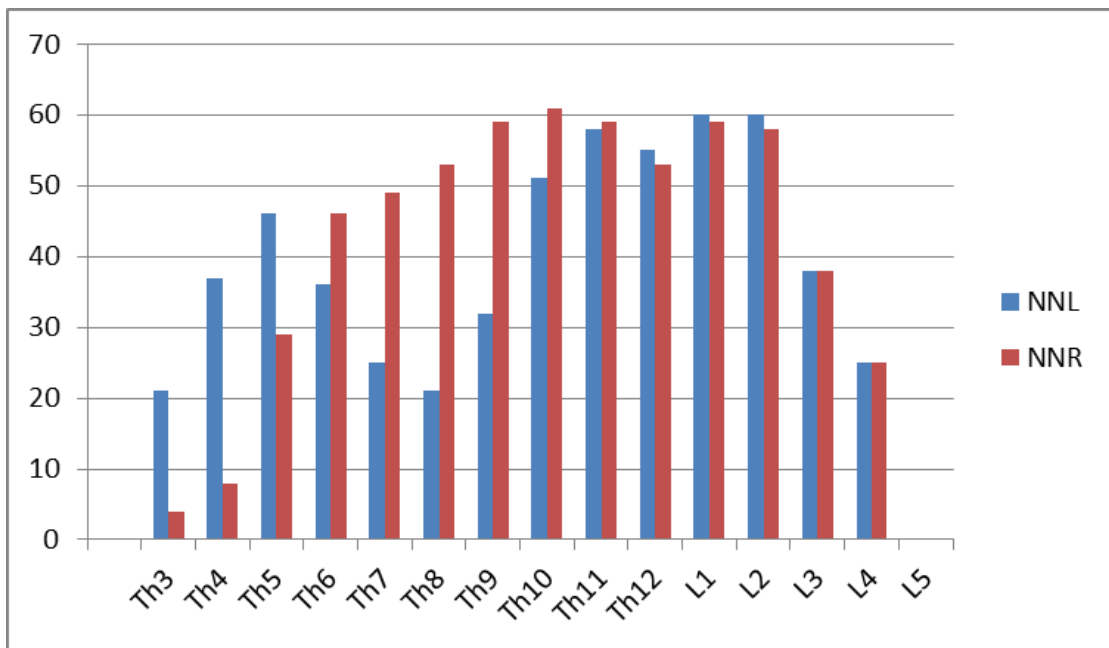


Рис. 61. Совместные гистограммы распределения винтов по позвонкам в основной группе. NNR и NNL – суммарные количества винтов на позвонке, установленных соответственно с вогнутой и выпуклой стороны деформации

Необходимо отметить, что распределение количества винтов относительно позвонков и сторон их установки имеет определенную закономерность и особенность, связанную с анатомо-антропометрическими особенностями корней дуг позвонков грудного отдела позвоночника. Так в верхнегрудном отделе позвоночника преобладание размеров поперечных диаметров корней дуг левой стороны над правой (trdL Th3, Th4 и Th5 позвонков - $5,3 \pm 1,1$ мм, $4,6 \pm 0,8$ мм и $4,5 \pm 1,1$ мм, соответственно; trdR Th3, Th4 и Th5 позвонков - $3,3 \pm 1,0$ мм, $2,9 \pm 0,8$ мм и $3,5 \pm 1,0$ мм, соответственно) обусловило большее количество винтов, установленных на данном уровне с левой стороны. В среднегрудном отделе позвоночника соотношение установленных винтов меняется в противоположную сторону с наибольшей разницей на уровне Th8 позвонка, что также обусловлено анатомо-антропометрическими особенностями корней дуг позвонков на этом уровне (trdL Th8 - $3,6 \pm 1,0$ мм, trdR Th8 - $5,1 \pm 0,7$ мм, KAtрд Th8 1,38).

Таким образом, данное распределение винтов было обусловлено методикой предоперационного планирования в программной среде Spine Map3D, заключающейся в доскональном проведении оценки анатомо-антропометрических характеристик корней дуг позвонков, с последующим определением возможностей установки и правильного корректного проведения транспедикулярных опорных элементов из дорсального доступа в тело позвонка под контролем 3D-КТ навигации.

В основной группе наблюдения отмечено статистически значимое ($P < 0,0001$) большее количество транспедикулярных опорных элементов в грудном отделе позвоночника по сравнению с контрольной группой. Такое количество установленных опорных элементов металлоконструкции в данной группе наблюдения являлось очередной особенностью пациентов детского возраста с деформацией позвоночника при идиопатическом сколиозе.

6.1.3. Сравнительный анализ корректности винтов, установленных в позвонки под навигацией и методом «свободной руки»

Для проведения сравнительного анализа корректности положения транспедикулярных опорных элементов, установленных в позвонки под контролем 3D-КТ навигации и при помощи метода «freehand», на основании шкалы S.D. Gertzbein et al. (1990) нами была использована схема определения корректности положения транспедикулярного винта относительно костных структур инструментированного позвонка, обозначенная в виде аббревиатуры SLIM+V. Первая часть аббревиатуры обозначает положение винта относительно внешних стенок корня дуги, которое оценивается в определенной очередности: S (superior) – верхняя (краниальная) стенка корня дуги, L (lateral) – латеральная (наружная) стенка корня дуги, I (inferior) – нижняя (каудальная) стенка корня дуги, M (medial) – медиальная (внутренняя) стенка корня дуги. Вторая часть аббревиатуры V (vertebral body) оценивает положение транспедикулярного винта по отношению к

переднебоковой поверхности тела позвонка. Степень смещения винта относительно костных структур позвонка оценивалась в миллиметрах: Grade 0 (full correct) – транспедикулярный винт расположен полностью в костных структурах позвонка, Grade I – смещение транспедикулярного опорного элемента до 2 мм, Grade II – смещение винта находится в пределах от 2 до 4 мм, Grade III – более 4 мм.

Общее количество транспедикулярных опорных элементов в основной группе наблюдения составило 1166, в контрольной группе – 546 винтов. Корректное положение винтов относительно костных структур инструментированных позвонков в основной группе в целом отмечено в 96% наблюдений (1119 винтов), не корректное положение винтов при проведении анализа данных послеоперационного КТ позвоночника выявлено в 4% наблюдений, что составило 47 транспедикулярных опорных элемента.

В контрольной группе пациентов при оценке положения установленных винтов по отношению к корням дуг и телам позвонков корректное положение отмечено только в 78% случаев (426 винтов), количество некорректно установленных транспедикулярных опорных элементов по сравнению с основной группой было достоверно больше ($P < 0,05$) и составило 22% (120 винтов).

Такое различие в корректности установленных винтов в основной и контрольной группах является особенностью у пациентов детского возраста с идиопатическим сколиозом и обусловлено использованием в ходе операции навигационной системы.

При проведении сравнительного анализа степени корректности положения транспедикулярных винтов в основной группе было отмечено преобладание большего количества винтов с меньшей степенью смещения по отношению к контрольной группе. Так, в I группе пациентов количество винтов со степенью смещения Grade I составило – 60% (28) и 2,4% по отношению к общему количеству установленных винтов. В 30% наблюдений (14 винтов) положение опорных элементов было определено как Grade II, что

по отношению к общему количеству винтов, установленных пациентам основной группы, составило 1,2%. Степень смещения транспедикулярных опорных элементов Grade III была выявлена только в 10% случаев (5 винтов) и составила лишь 0,3% от общего количества установленных винтов. В контрольной группе пациентов количество наблюдений со степенью смещения Grade I было меньшим и составило по отношению ко всем некорректно установленным (120 винтов) опорным элементам уже 40% (48 винтов) и 8,8% случаев - по отношению к общему количеству установленных винтов. В 34% наблюдений (41 винт) при проведении анализа послеоперационного КТ позвоночника отмечена степень смещения Grade II, что по отношению к общему количеству имплантированных транспедикулярных опорных элементов составило 7,5%. В сравнении с основной группой наблюдения, в контрольной группе выявлено значимо большее ($P<0,05$) количество винтов, смещение которых по отношению к костным структурам инструментированных позвонков, входящих в основную дугу сколиотической деформации, охарактеризовано как Grade III – 26% наблюдений (31 винт). Такой вид смещения опорных элементов по отношению к общему количеству установленных транспедикулярных винтов составил уже 5,7% (табл. 27).

Таблица 27

Распределение степени корректности положения винтов по позвонкам*

Позвонок	Основная группа (scT=1166)			Контрольная группа (scT=546)		
	Grade			Grade		
	I	II	III	I	II	III
Th3	3	1	0	0	1	1
Th4	2	3	0	2	4	4
Th5	3	0	0	5	3	2
Th6	2	2	0	3	1	1

Продолжение

Th7	3	1	0	4	1	2
Th8	2	2	1	4	2	4
Th9	2	1	1	6	7	4
Th10	1	1	0	2	4	2
Th11	1	1	1	4	5	1
Th12	2	1	1	6	2	4
L1	3	0	1	4	2	2
L2	2	0	0	3	2	1
L3	1	0	0	0	1	0
L4	1	1	0	1	3	1
L5	0	0	0	4	3	2
Всего, абс.	28	14	5	48	41	31
	47			120		
Всего, % к scIN	60%	30%	10%	40%	34%	26%
Всего, % к screw all	2,4%	1,2%	0,3%	8,8%	7,5%	5,7%
	4%			22%		

*Примечание: scIN – некорректно установленные винты, scT – общее

количество установленных винтов в группе наблюдения

Такой процент распределения корректной установки транспедикулярных опорных элементов в основной и контрольной группах наблюдения является очередной особенностью у пациентов с идиопатическим сколиозом и обусловлен использованием в ходе хирургического вмешательства системы навигации. Последняя позволяет под визуальным контролем в режиме реального времени осуществить

формирование костных каналов и проведение транспедикулярных опорных элементов.

При проведении анализа распределения видов смещений транспедикулярных винтов по отношению к костным структурам инструментированных позвонков в основной группе пациентов по схеме SLIM+V нами были получены следующие результаты. Количество некорректно расположенных винтов, установленных справа и слева относительно линии остистых отростков позвонков грудного и поясничного отделов позвоночника, было почти равным и составило 25 (53,2%) и 22 (46,8%), соответственно. Среди всех видов смещений для винтов, установленных в позвонки справа относительно линии остистых отростков, преобладало смещение, характеризовавшееся повреждением латеральной стенки корня дуги, составившее 31,9% случаев (15 винтов) от общего количества некорректно установленных винтов в группе пациентов с навигацией. Остальные виды смещений встречались приблизительно с одинаковой частотой и составили: 6,4% (3 винта) – повреждение верхней стенки корня дуги, 6,4% (3 винта) – выход за переднебоковую поверхность тела позвонка, 4,1% (2 винта) – повреждение нижней стенки корня дуги и 4,1% (2 винта) – повреждение медиальной стенки корня дуги.

Распределение видов смещений винтов, установленных в позвонки слева относительно линии остистых отростков, имело сходные закономерности с вышеописанными. Смещение опорных элементов, характеризовавшееся повреждением латеральной стенки корня дуги, составило 23,4% (11 винтов), в 10,6% случаев (5 винтов) отмечено повреждение верхней стенки корня дуги, 6,4% (3 винта) – повреждение нижней стенки корня дуги, выход резьбовой части транспедикулярного опорного элемента за переднебоковую поверхность тела позвонка диагностирован в 4,1% наблюдений (2 винта) и лишь в 2,1% случаев (1 винт) отмечено повреждение медиальной стенки корня дуги.

При проведении анализа распределения видов смещений транспедикулярных винтов по отношению к отделам позвоночника выявлено, что среди наиболее часто встречаемого вида (повреждение латеральной стенки корня дуги позвонка), составившего в целом 55,3% (26 винтов), отмечены некоторые закономерности. Так, с правой стороны относительно линии остистых отростков на уровне Th3-Th5 позвонков и в зоне грудопоясничного перехода (Th11-L2 позвонки) была отмечена латеропозиция транспедикулярных опорных элементов в 14,9% наблюдений (7 винтов) для обоих уровней. Некорректное положение винтов, установленных с левой стороны относительно линии остистых отростков, было отмечено на уровне Th6-Th9 позвонков и составило 19,2% случаев (9 винтов).

Необходимо отметить, что такое распределение обусловлено тем, что на уровнях Th6-Th9 позвонков и зоны грудопоясничного перехода корни дуг позвонков, в которые были установлены транспедикулярные винты, располагались на вогнутых сторонах дуг сколиотической деформации и имели в основном небольшой поперечный диаметр. На уровне Th3-Th5 позвонков анатомо-антропометрические особенности корней дуг позвонков, проявляющиеся в виде уменьшения размеров их поперечного диаметра справа также являлись причиной смещения винтов. Однако, большая часть данного вида положения винтов по степени смещения относилась к Grade I.

Таким образом, такой вид мальпозиции винтов, объясняется тем, что при малых размерах корня дуги при формировании правильной траектории канала для транспедикулярного опорного элемента под контролем 3D-КТ навигации хирург несколько латерализовал его направление, стараясь сохранить медиальную стенку корня дуги, формирующую позвоночный канал. Это является очередной особенностью мальпозиции транспедикулярных винтов у пациентов с деформацией позвоночника при идиопатическом сколиозе при формировании костных каналов и их установке в ходе операции (табл. 28).

Распределение видов смещений транспедикулярных винтов по отношению к костным структурам инструментированных позвонков, основная группа (n=66)*

Позвонок	N screw=47									
	Dexter					Sinister				
	S	L	I	M	V	S	L	I	M	V
Th3		2		1						1
Th4		3				2				
Th5		2				1				
Th6			1			1	2			
Th7			1			1	2			
Th8				1			4			
Th9	1						1	1	1	
Th10	1							1		
Th11	1	1			1					
Th12		2			2					
L1		3					1			
L2		1								1
L3							1			
L4		1						1		
Всего, абс. и в %	3	15	2	2	3	5	11	3	1	2
	6,4	31,9	4,1	4,1	6,1	10,6	23,4	6,4	2,1	4,1
	25 (53,2%)					22 (46,8%)				

*Примечание: Dexter – винты, установленные справа, Sinister – и слева, S – верхняя стенка корня дуги, L – латеральная стенка корня дуги, I – нижняя стенка корня дуги, M – медиальная стенка корня дуги, V – тело позвонка

При проведении анализа распределения видов смещений транспедикулярных винтов по отношению к костным структурам инструментированных позвонков в контрольной группе пациентов по схеме SLIM+V нами были получены следующие результаты. Количество некорректно расположенных винтов, установленных с вогнутой и выпуклой стороны относительно линии остистых отростков позвонков грудного и поясничного отделов позвоночника, было, как и в основной группе наблюдения, почти равным и составило 64 (53,3%) и 56 (46,7%), соответственно. Однако, в отличие от группы пациентов проспективного наблюдения, среди всех видов смещений для винтов, установленных пациентам контрольной группы преобладало смещение, характеризовавшееся повреждением медиальной стенки корня дуги, составившее 48,3% случаев (58 винтов) от общего количества некорректно установленных винтов.

Так из всех видов смещений винтов, установленных в позвонки с выпуклой стороны относительно линии остистых отростков, на первом месте по частоте встречаемости находилось смещение тип М (повреждение медиальной стенки корня дуги), величина которого составила 22,5% (27 винтов), на втором месте – в 16,7% случаев (20 винтов) смещение тип V (vertebral body). Остальные виды смещений встречались приблизительно с одинаковой частотой и составили: 5,8% (7 винтов) – повреждение верхней стенки корня дуги, 5% (6 винтов) – повреждение латеральной стенки корня дуги и 3,3% (4 винта) – повреждение нижней стенки корня дуги.

Распределение видов смещений винтов, установленных в позвонки с вогнутой стороны относительно линии остистых отростков, имело сходные закономерности с вышеописанными, за исключением смещения типа V (vertebral body). Смещение опорных элементов, характеризовавшееся повреждением медиальной стенки корня дуги, составило 25,8% (31 винт), в равных долях - 8,3% случаев (10 винтов), отмечено повреждение верхней стенки корня дуги и выход резьбовой части транспедикулярного опорного

элемента за переднебоковую поверхность тела позвонка, в 2,5% (3 винта) – повреждение нижней стенки корня дуги и в 1,7% случаев (2 винта) отмечено повреждение латеральной стенки корня дуги.

При проведении анализа распределения видов смещений транспедикулярных винтов по отношению к отделам позвоночника в контрольной группе также были отмечены некоторые особенности и закономерности. Среди винтов, установленных с выпуклой стороны относительно линии остистых отростков была отмечена медиализация относительно корня дуги транспедикулярных опорных элементов на уровне Th3-Th4 позвонков в 7,5% наблюдений (9 винтов) и на уровне Th12-L2 позвонков в 10% (12 винтов). Тип смещения V (vertebral body) выявлен на уровне Th11-Th12 позвонков в 7,5% случаев (9 винтов) и на уровне L2-L5 позвонков в 6,7% наблюдений (8 винтов). Повреждение медиальной стенки корня дуги винтами, установленными с вогнутой стороны относительно линии остистых отростков, было отмечено на уровне Th6-Th9 позвонков и составило 20,8% наблюдений (25 винтов). Выход резьбовой части винта за переднебоковой контур тела позвонка составил 5,8% (7 винтов).

Необходимо отметить, что данное распределение смещения типа M (medial) было также обусловлено анатомо-антропометрическими особенностями корней дуг позвонков, входящих в дугу сколиотического искривления. Однако, в отличие от основной группы в группе ретроспективного наблюдения большая часть данного вида положения винтов по степени смещения относилась к Grade II и III. Смещение типа V (vertebral body), составившее 25% (20 винтов), было обусловлено не соответствием типоразмера транспедикулярного опорного элемента длине «винтового пути».

Таким образом, такой вид мальпозиции винтов объясняется отсутствием возможности визуального контроля при формировании каналов для транспедикулярных винтов методом «freehand», и является потенциально опасным из-за возможности повреждения структур позвоночного канала при

повреждении медиальной стенки корня дуги и риска повреждения превертебральных структур при смещении типа V (табл. 29).

Таблица 29

Распределение видов смещений транспедикулярных винтов по отношению к костным структурам инструментированных позвонков, контрольная группа (n=30)*

Позвонок	N screw=120									
	Dexter					Sinister				
	S	L	I	M	V	S	L	I	M	V
Th3				2						
Th4			1	7		2				
Th5		1	2		3	1				3
Th6			1			1			3	
Th7									7	
Th8		1							9	
Th9	3	1		2		3		2	6	
Th10	2			3		2		1		
Th11	1	1			4	1	2		1	
Th12	1	2		3	5				1	
L1				5					3	
L2				4	1					1
L3					1					
L4					3					2
L5				1	3				1	4
Всего, абс.	7	6	4	27	20	10	2	3	31	10
и в %	5,8	5	3,3	22,5	16,7	8,3	1,7	2,5	25,8	8,3
	64 (53,3%)					56 (46,7%)				

*Dexter – винты, установленные справа, Sinister – и слева, S – верхняя стенка корня дуги, L – латеральная стенка корня дуги, I – нижняя стенка корня дуги, M – медиальная стенка корня дуги, V – тело позвонка.

При проведении сравнительного анализа распределения некорректного положения транспедикулярных винтов по отношению к грудному и поясничному отделам позвоночника в основной и контрольной группах наблюдения нами были получены следующие результаты. В основной группе наблюдения некорректно установленные транспедикулярные опорные элементы в грудном отделе позвоночника выявлены в 4,8% наблюдений (38 винтов). Распределение некорректно установленных винтов по сегментам грудного отдела позвоночника было следующим: верхнегрудной отдел позвоночника – 12,9% (9 винтов), среднегрудной отдел - 5,1% (16 винтов), нижнегрудной отдел позвоночника - 3,1% (13 винтов). В поясничном отделе позвоночника процент некорректно установленных винтов был меньшим и составил всего 2,5% (9 винтов).

В контрольной группе пациентов некорректно установленные транспедикулярные опорные элементы в грудном отделе позвоночника выявлены в 35,1% случаев (91 винт). Распределение по сегментам грудного отдела позвоночника было следующим: верхнегрудной отдел позвоночника – 92,3% (12 винтов), среднегрудной отдел - 37,7% (32 винта), нижнегрудной отдел позвоночника - 29,2% (47 винтов). В поясничном отделе позвоночника процент некорректно установленных винтов составил 10,1% (29 винтов).

Таким образом, количество некорректно установленных винтов в грудном отделе позвоночника было достоверно выше ($P < 0,05$) в контрольной группе наблюдения. Процент некорректно установленных винтов увеличивался в краниальном направлении, достигая максимального значения в верхнегрудном отделе позвоночника (табл. 30).

Таблица 30

Распределение некорректного положения транспедикулярных винтов по отношению к грудному и поясничному отделам позвоночника*

Позвонок	Основная группа (n=66)					Контрольная группа (n=30)				
	scT	scIN	%			scT	scIN	%		
Th3	25	4	UT	12,9%	4,8%	2	2	UT	92,3%	35,1%
Th4	45	5				11	10			
Th5	75	3	MT	5,1%		20	10	MT	37,7%	
Th6	82	4				23	5			
Th7	74	4				22	7			
Th8	74	5				20	10			
Th9	91	4	LT	3,1%		24	17	LT	29,2%	
Th10	112	2				32	8			
Th11	117	3				45	10			
Th12	108	4				60	12			
L1	119	4	L	2,5%		67	8	L	10,1%	
L2	118	2				70	6			
L3	76	1				71	1			
L4	50	2				51	5			
L5	0	0				28	9			
Всего	1166	47	4%			546	120	22%		

*Примечание: scT – общее количество винтов, установленных на данном уровне, scIN – количество винтов, установленных некорректно на данном уровне, UT – верхнегрудной отдел, MT – среднегрудной отдел, LT – нижнегрудной, L – поясничный отдел позвоночника

Таким образом, на основании проведенного сравнительного анализа установлено, что в основной группе наблюдения процент некорректно установленных транспедикулярных опорных элементов в грудном и поясничном отделах позвоночника (4%) и процент их смещения достоверно ниже ($P < 0,05$), чем в контрольной группе (22%).

Клиническое наблюдение

Пациент К., 16 лет. Диагноз: идиопатический правосторонний грудной сколиоз четвертой степени. На момент поступления на рентгенограммах отмечается сколиотическая деформация позвоночника, угол искривления грудной дуги составил 80° по Cobb, патологическая ротация позвонков на вершине достигала 24° (рис. 62 А).

Данные полученные при проведении компьютерной томографии позвоночника на протяжении от Th1 до S1 позвонка в положении пациента на животе, при помощи носителя импортировали в программную среду SpineMap 3D системы активной оптической 3D-КТ навигации. На основе трехмерной КТ-реконструкции в планирующей станции в плоскости относительно тела каждого позвонка проведено измерение внешних поперечных и продольных диаметров корней дуг позвонков. Полученные данные измерений с целью предоперационного планирования занесены в таблицу 31. На основании оценки анатомо-антропометрических особенностей данного пациента определены уровни корректной установки транспедикулярных опорных элементов, включавшие в себя Th5-L2 позвонки с обеих сторон относительно линии остистых отростков.

27.08.2012 г. выполнена операция: наложение краниальной скобы; коррекция и стабилизация деформации позвоночника многоопорной транспедикулярной системой «Horizon» фирмы «Medtronic Sofamor Danek, Inc.», США под контролем оптической 3D-КТ навигации. Дорсальный спондилодез аутотрансплантатами.

В ходе проведенного хирургического вмешательства на этапе интраоперационной регистрации проводился учет количества уровней регистрации, среднеквадратичной погрешности регистрации по анатомическим ориентирам и по поверхности, времени, затраченного на проведение регистрации и формирования костных каналов для транспедикулярных опорных элементов (табл. 32, табл. 33).

Таблица 31

Размеры поперечного и продольного внешних диаметров корней дуг
позвонков пациента К., 16 лет

Позвонок	trdR, мм	lngdR, мм	trdL, мм	lngdL, мм
Th2	5,3	10,6	6,5	11,5
Th3	3,3	10,7	5,3	12,0
Th4	2,9	10,9	4,6	10,8
Th5	4,1	11,6	4,9	10,1
Th6	4,8	12,6	4,8	9,7
Th7	5,7	12,7	4,7	9,7
Th8	5,8	13,3	4,6	10,2
Th9	6,1	13,8	4,9	11,8
Th10	6,4	15,6	5,1	14,8
Th11	7,3	16,7	6,8	17,3
Th12	7,0	15,7	7,4	16,8
L1	6,1	14,3	6,2	14,8
L2	6,2	13,5	6,3	14,6
L3	8,5	13,9	7,9	14,3
L4	10,4	13,3	10,3	13,3
L5	14,5	12,9	15,6	12,7

Мониторинг времени, затрачиваемого на регистрацию по анатомическим ориентирам и по поверхности

Ф.И.О.: ____ К. _____ Возраст: _16 лет_				
Тип деформации: ____ Lenke I _____ Величина деформации: _80° ____				
Объем операции: _ Коррекция деформации позвоночника дорсальным CDI, задний локальный спондилодез _				
Позвонок	T regAn, с	RegAnMD, мм	T regSur, с	RegSurMD, мм
Th2	-	-	-	-
Th3	-	-	-	-
Th4	-	-	-	-
Th5	19	1,8	57	0,4
Th6	-	-	-	-
Th7	15	0,8	73	0,3
Th8	9	0,5	-	-
Th9	-	-	-	-
Th10	12	0,9	66	0,5
Th11	-	-	-	-
Th12	-	-	-	-
L1	10	0,5	-	-
L2	-	-	-	-
L3	-	-	-	-
L4	-	-	-	-
L5	-	-	-	-

Мониторинг времени, затрачиваемого на формирование костных каналов для
транспедикулярных винтов

Ф.И.О.: ____ К. _____ Возраст: _16 лет_				
Тип деформации: ____ Lenke I _____ Величина деформации: _80° ____				
Объем операции: _ Коррекция деформации позвоночника дорсальным CDI, задний локальный спондилодез _				
Позвонок	T screwCanL, с	Примечание	T screwCanR, с	Примечание
Th2	-	-	-	-
Th3	-	-	-	-
Th4	-	-	-	-
Th5	49	-	78	-
Th6	54	-	66	-
Th7	58	-	69	-
Th8	61	-	55	-
Th9	65	-	51	-
Th10	49	-	52	-
Th11	43	-	57	-
Th12	59	-	51	-
L1	35	-	50	-
L2	26	-	57	-
L3	-	-	-	-
L4	-	-	-	-
L5	-	-	-	-

В ходе хирургического вмешательства на протяжении дуги сколиотической деформации позвоночника имплантировано 20 транспедикулярных опорных элементов. Установка нулевого трекера заняла 25 секунд. Всего выполнено 5 регистраций по анатомическим ориентирам и 3

регистрации по поверхности. Достигнута среднеквадратичная погрешность регистрации в пределах 0,3 мм – 0,5 мм. Суммарное время, затраченное на проведение интраоперационной регистрации составило 261 секунду (4,35 минуты). Суммарное время, затраченное на формирование 20 костных каналов для транспедикулярных опорных элементов составило 1085 секунд (18,1 минуты). Время, затраченное на проведение навигации в целом в ходе хирургического вмешательства составило 1371 секунду (22,9 минуты).

При проведении анализа послеоперационного компьютерно-томографического исследования позвоночника выявлено латеральное смещение транспедикулярного опорного элемента относительно правого корня дуги позвонка Th5, составившее менее 2 мм (Grade I). Остальные транспедикулярные винты были установлены корректно (рис. 62 В, Г).

На контрольной рентгенограмме от 05.09.2012 г.: состояние после коррекции сколиотической деформации позвоночника, стояние элементов металлоконструкции корректное, фиксация стабильная. Остаточная величина правосторонней сколиотической дуги Th5–Th12 = 5°. Ребенок осмотрен через 2 года после оперативного вмешательства – стояние элементов металлоконструкции стабильное, угол остаточной деформации составил 5° (рис. 62 Б).

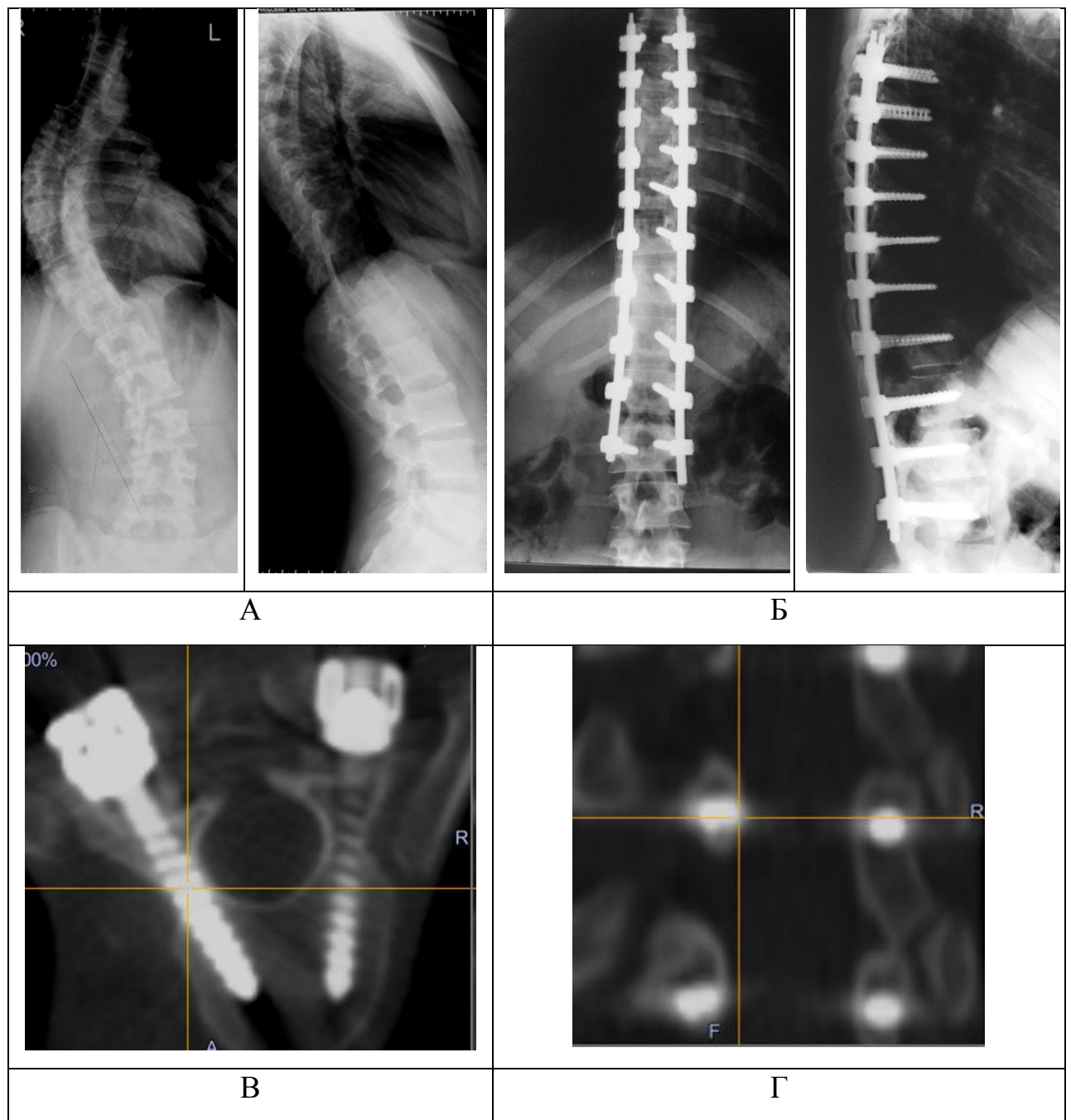


Рис. 62. Рентгенограммы и КТ пациентки К. 16 лет, с идиопатическим сколиозом грудного отдела позвоночника IV ст.: А – до операции (угол деформации 80° по Cobb); Б – через 2 года после операции (угол деформации 5° по Cobb); В, Г – КТ позвоночника после операции

Клиническое наблюдение

Пациент А., 17 лет. Диагноз: идиопатический правосторонний грудной сколиоз IV степени. При поступлении на рентгенограммах отмечается сколиотическая деформация позвоночника, угол искривления грудной дуги составил 110° по Cobb (рис. 63 А).

12.10.2011 г. выполнена операция: Дискапофизэктомия, корпородез аутокостью на уровнях Th6-Th11. Наложение кранио-тибиального вытяжения. 26.10.2011 - коррекция и стабилизация деформации позвоночника многоопорной транспедикулярной системой «Horizon» фирмы «Medtronic Sofamor Danek, Inc.», США. Дорсальный спондилодез аутооттрансплантатами.

На уровне Th3, Th6, Th10-L4 позвонков справа и Th3, Th4, L1-L4 слева относительно линии остистых отростков при помощи метода «свободной руки» установлено 15 транспедикулярных опорных элементов.

При проведении компьютерно-томографического исследования позвоночника в послеоперационном периоде выявлено латеральное смещение транспедикулярного опорного элемента относительно корня дуги позвонка Th3 справа (Grade II), медиальное смещение транспедикулярного винта относительно корня дуги позвонка Th3 слева (Grade III), выход резьбовой части винта за границу передней поверхности тел позвонков Th10 (Grade III) и Th11 (Grade II) с выпуклой стороны сколиотической дуги и медиальное смещение транспедикулярного винта относительно правого корня дуги позвонка Th12 (Grade III). Остальные транспедикулярные винты были установлены корректно (рис. 63 В).

Остаточный угол сколиотической дуги деформации по Cobb после операции составил 58° по Cobb. Неврологических нарушений в послеоперационном периоде не отмечено. При контрольном осмотре пациентки через 2 года после оперативного вмешательства – угол сколиотической дуги составил 74° (рис. 63 Б).

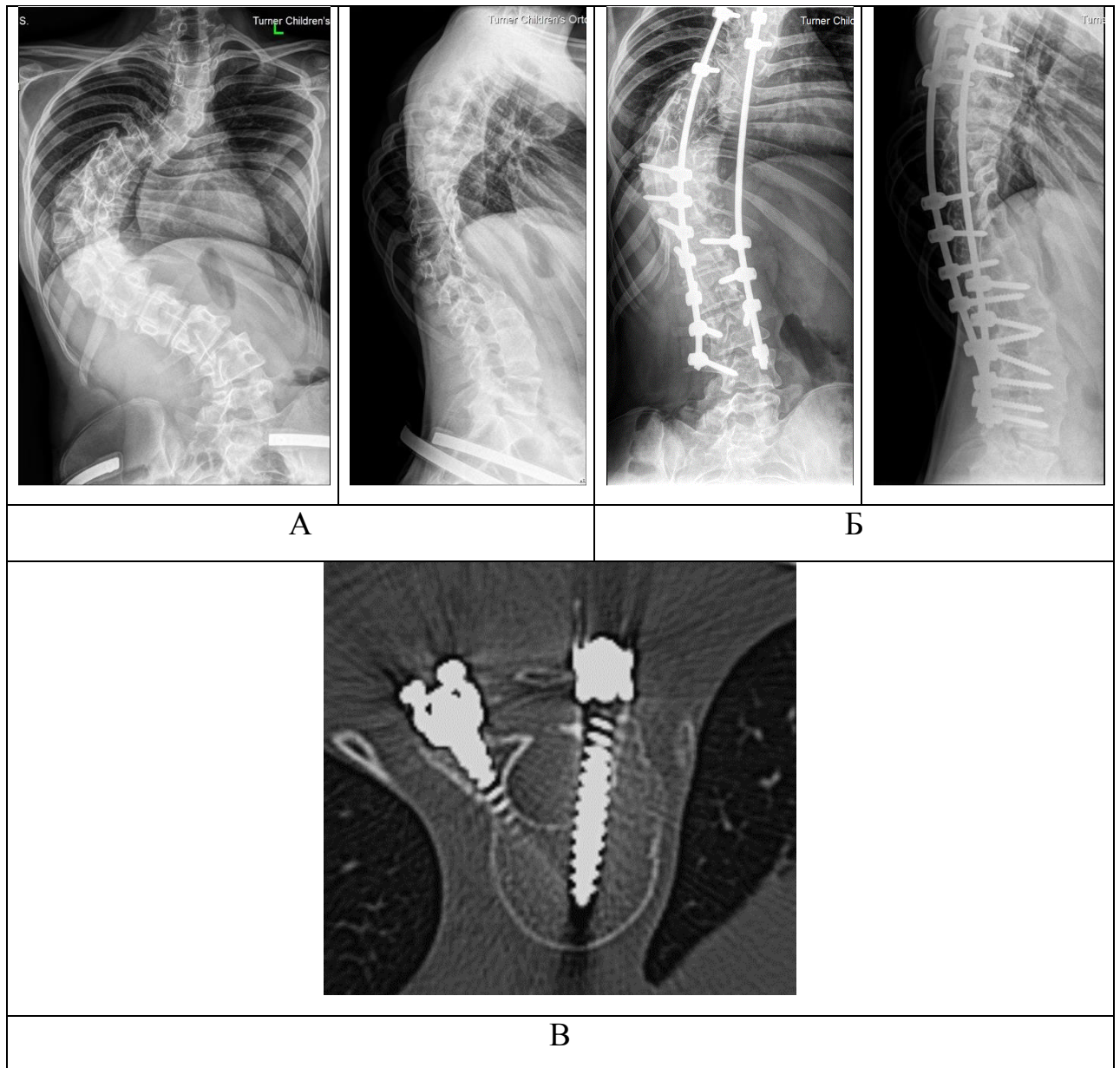


Рис. 63. Рентгенограммы и КТ пациентки А., 17 лет, с идиопатическим сколиозом грудного отдела позвоночника IV ст.: А – до операции (угол деформации 110° по Cobb); Б – через 2 года после операции (угол деформации 74° по Cobb); В – КТ позвоночника после операции

6.2. Обоснование алгоритма использования системы активной оптической 3D-КТ навигации при коррекции деформации позвоночника у детей с идиопатическим сколиозом

Проведенные исследования, сравнительный анализ полученных результатов, а также изучение данных профильных научных публикаций позволили обосновать и предложить алгоритм использования системы активной оптической 3D-КТ навигации при коррекции деформации позвоночника у детей с идиопатическим сколиозом грудной, груднопоясничной и поясничной локализации 3 и 4 степени по В.Д.Чаклину. Этот алгоритм предполагает разделение мероприятий на три этапа и их проведение в определенной последовательности, как показано ниже на схеме (рис. 64, 65, 66). При этом на каждом из указанных этапов после получения необходимых сведений по результатам анатомо-антропометрического обследования пациентов в программной среде SpineMap3D навигационной станции, данным интраоперационной регистрации и верификации дорсальных костных структур при помощи навигационного инструментария должны приниматься обоснованные решения о выборе определенной последовательности действий, позволяющих обеспечить точность и корректность работы навигационного оборудования, оптимизировать затраты времени на интраоперационный этап работы навигационной станции, достичь высокой степени корректной и стабильной установки транспедикулярных опорных элементов в структурально измененные позвонки на протяжении основной дуги сколиотической деформации позвоночника.

На первом этапе (рис. 64), согласно разработанному нами алгоритму, особенностью в проведении предоперационного обследования является выполнение КТ сканирования позвоночника на уровне Th1-S1 в prone position в зависимости от предполагаемого тактического варианта оперативного лечения либо перед хирургическим вмешательством (I и II варианты), либо перед завершением курса кранио-тибиального вытяжения

(III вариант). Такая последовательность действий была выработана нами и внедрена в клиническую практику отделения патологии позвоночника и нейрохирургии ФГБУ НИДОО им.Г.И.Турнера на основании полученных данных результатов хронометрического исследования хирургического лечения детей основной группы по трехкомпонентной методике Ю.И.Поздника.

Следующий шаг первого этапа алгоритма основывается на оценке возможности корректной установки транспедикулярных опорных элементов в сколиотически измененные позвонки, осуществляемой в программной среде SpineMap3D навигационной станции. Согласно нашим данным, размер поперечного диаметра корня дуги позвонка более 4,0 мм является критерием, позволяющим осуществить корректную установку винта в тело деформированного позвонка через корень дуги. Выбор такого критерия был основан на результатах, полученных при проведении анализа анатомо-антропометрических особенностей позвонков, с учетом корреляционных связей структурально-пространственных взаимоотношений деформированных позвонков и сколиотического процесса, закономерностей, основанных на определенной направленности изменений коэффициентов асимметрии, а также сопоставления данных особенностей с корректностью положения транспедикулярных опорных элементов по отношению к костным структурам инструментированных позвонков при помощи модифицированной шкалы S.D. Gertzbein et al. (1990), представленной в виде SLIM+V.

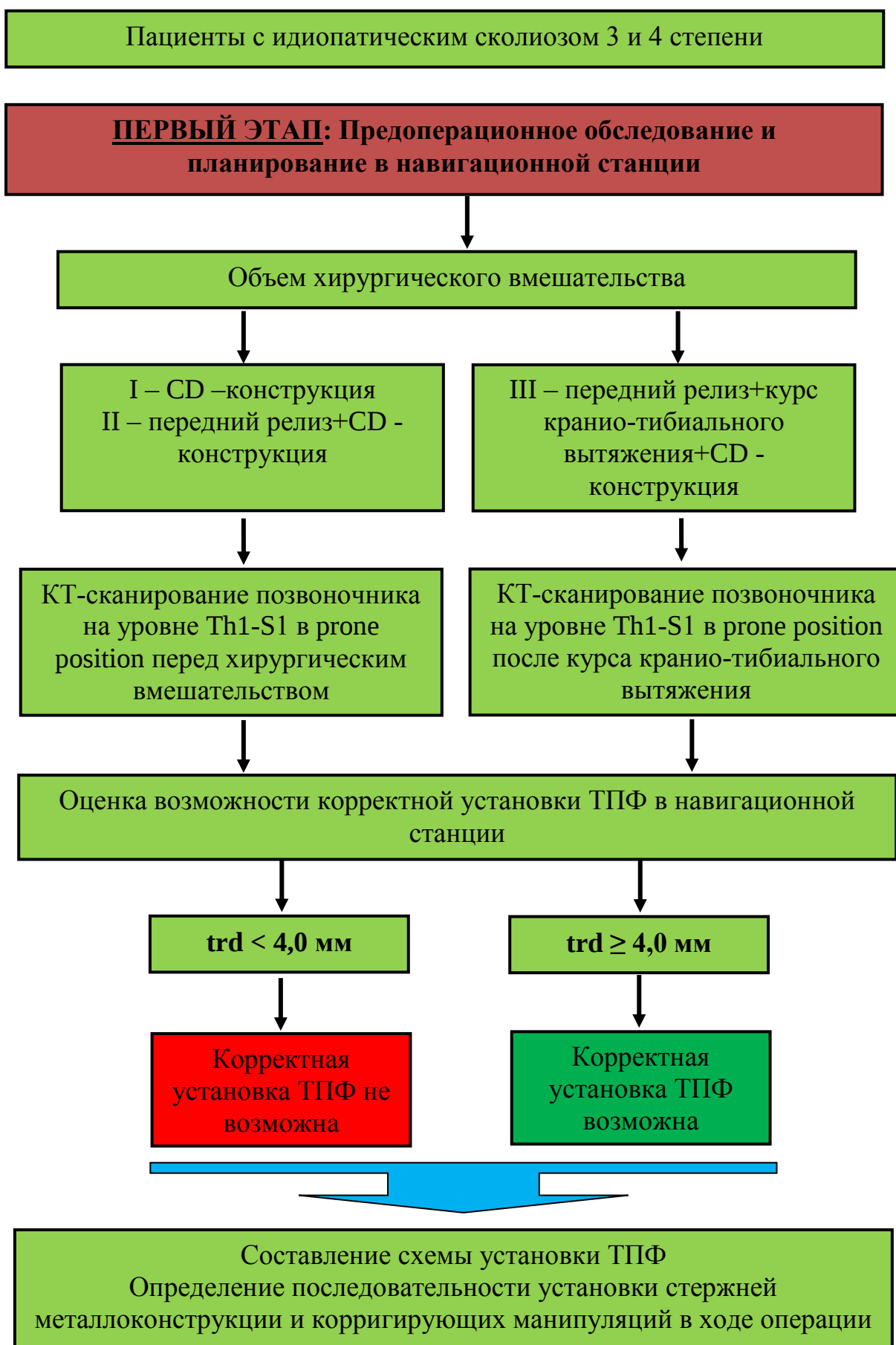


Рис. 64. Предоперационное обследование и планирование

Таким образом, на основании критерия возможности корректной установки транспедикулярных винтов в завершении первого этапа предложенного нами алгоритма, составляется схема предполагаемой установки транспедикулярных опорных элементов в позвонки с определением последовательности установки стержней металлоконструкции и корректирующих манипуляций в ходе операции.

Второй этап алгоритма заключается в проведении интраоперационной регистрации по анатомическим ориентирам и по поверхности (рис. 65). Согласно представленной ниже схеме при проведении регистрации по анатомическим ориентирам в грудном отделе позвоночника в качестве референтных точек на наш взгляд целесообразно использовать следующие: 1 – середина вершины остистого отростка, 2 и 3 – середины вершин поперечных отростков регистрируемого позвонка. Для проведения регистрации по анатомическим ориентирам в поясничном отделе позвоночника мы рекомендуем использовать середину вершины остистого отростка регистрируемого позвонка и середины дугоотростчатых суставов между регистрируемым и вышележащим позвонком. Использование такого набора референтных точек позволяет достичь наибольшей точности и правильности сопряжения контуров костной ткани кортикального слоя позвонка с контурами виртуальной 3D-модели позвоночника, снизить получаемую погрешность регистрации по анатомическим ориентирам и является простым для оператора.

Следующий шаг алгоритма заключается в оценки полученной погрешности регистрации по анатомическим ориентирам (RegAnMD). Если значение RegAnMD превышает 2,5 мм, мы рекомендуем проводить повторную регистрацию по анатомическим ориентирам. Такая последовательность действий позволяет исключить ошибку с выбором уровня регистрации.

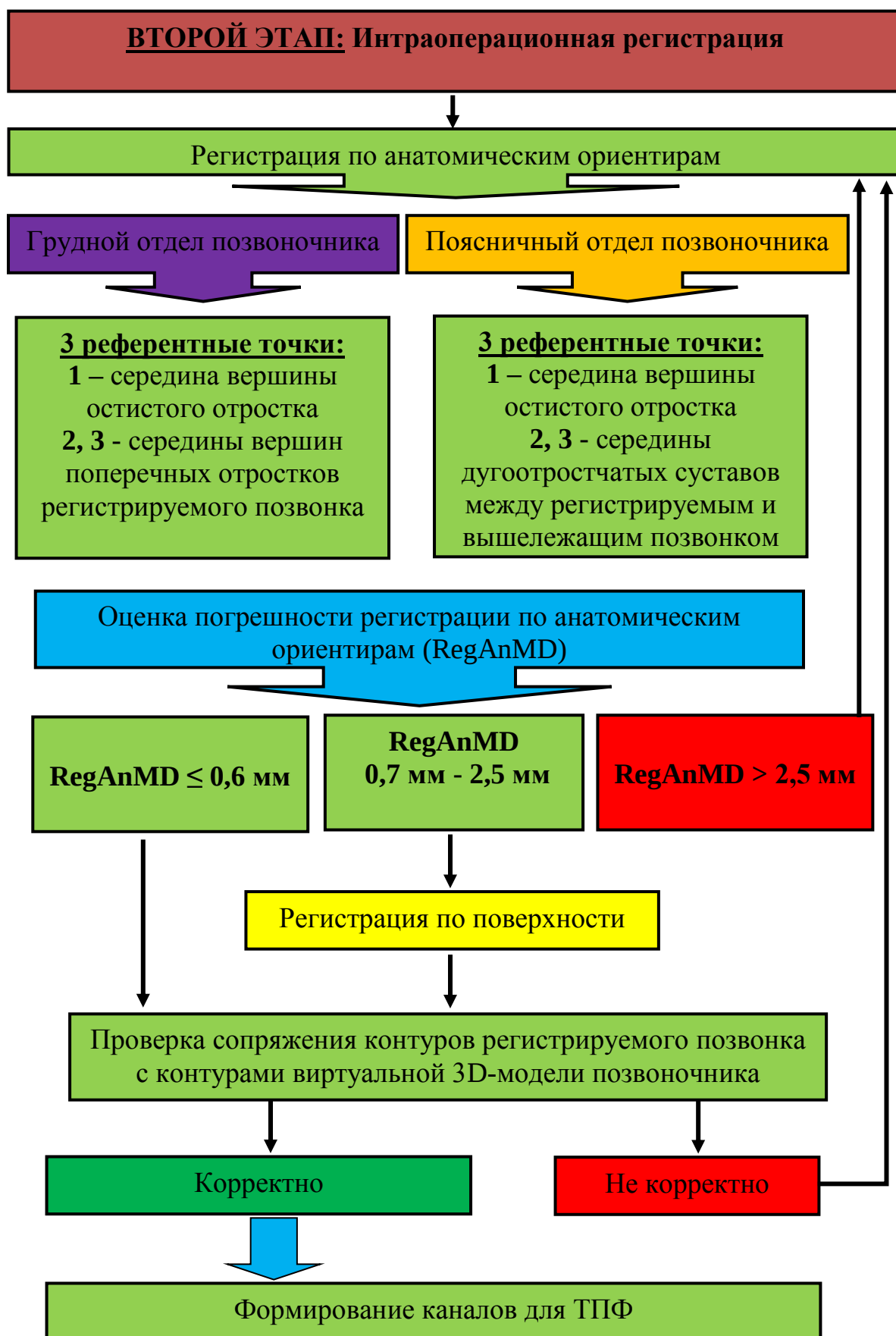


Рис. 65. Интраоперационная регистрация

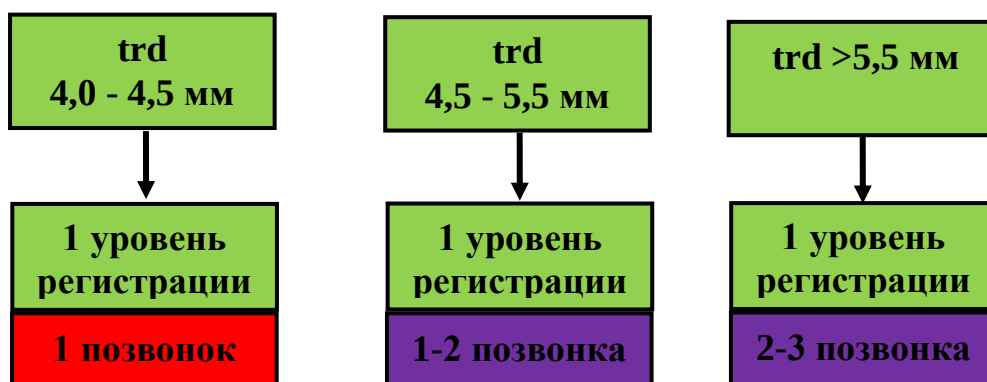
При значении RegAnMD находящемся в диапазоне от 0,7 до 2,5мм целесообразно дополнительно проводить регистрацию по поверхности, т.к. данный шаг алгоритма позволяет уменьшить получаемую при работе с навигационной станцией погрешность. В тех случаях, когда значение RegAnMD составляет 0,6 мм и менее, как правило, достигается достаточная точность сопряжения контуров костной ткани кортикального слоя позвонка с контурами виртуальной 3D-модели позвоночника.

Однако, необходимо подчеркнуть, что следующим достаточно важным и ключевым моментом в работе с навигационной станцией является проверка правильности сопряжения контуров регистрируемого позвонка с контурами виртуальной 3D-модели позвоночника. Только после выполнения этого шага алгоритма и оценки корректности и правильности выполненной интраоперационной регистрации мы рекомендуем проводить процедуру формирования каналов для транспедикулярных опорных элементов. Несоответствие контуров зарегистрированного позвонка с контурами его виртуальной 3D-модели в навигационной станции вне зависимости от величины полученной погрешности регистрации согласно нашему алгоритму является показанием к проведению повторной процедуры регистрации.

Третий этап алгоритма, определяющий последовательность действий при формировании каналов для транспедикулярных опорных элементов в телах позвонков (рис. 66). Данный этап основан на двух ключевых критериях: отдел позвоночника, в котором расположен зарегистрированный позвонок и размер поперечного диаметра корня дуги позвонка, в котором предполагается формировать костный канал навигационным инструментом для транспедикулярного винта. Так, в верхнегрудном и среднегрудном отделах позвоночника при величине trd от 4,0 до 4,5 мм мы рекомендуем с одного уровня регистрации проводить инструментализацию только одного, зарегистрированного позвонка.

ТРЕТИЙ ЭТАП: Формирование каналов в телах позвонков для ТПФ

Верхне- и среднегрудной отделы позвоночника



Нижнегрудной и поясничный отделы позвоночника



Рис. 66. Формирование каналов в телах позвонков для ТПФ

При значениях trd от 4,5 до 5,5 мм возможна корректная инструментализация одного или двух позвонков. Если trd больше 5,5 мм, мы рекомендуем с одного уровня регистрации осуществлять установку

транспедикулярных винтов в 3-4 позвонка. В нижнегрудном и поясничном отделах позвоночника при величине trd от 4,0 до 4,5 мм мы также рекомендуем устанавливать опорные элементы только в зарегистрированный позвонок. В тех случаях, когда значение trd находится в диапазоне от 4,5 до 5,5 мм, то с одного уровня регистрации целесообразно осуществить инструментализацию двух позвонков. Если значение trd превышает 5,5 мм, возможно с одного уровня регистрации установить транспедикулярные винты в 3-4 позвонка без потери корректности и правильности их позиции.

Таким образом, предложенный нами и подробно представленный в настоящем разделе алгоритм использования системы активной оптической 3D-КТ навигации при коррекции деформации позвоночника у детей с идиопатическим сколиозом основан на результатах собственных исследований и данных специальной литературы.

Кроме того, необходимо отметить, что обоснование алгоритма применения системы активной оптической 3D-КТ навигации в хирургическом лечении детей с идиопатическим сколиозом, представленное в настоящем разделе диссертационной работы, явилось основным итогом проведенного нами исследования и полностью соответствует его цели и задачам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Деформации позвоночника у детей с идиопатическим сколиозом, требующие проведения хирургической коррекции, являются одним из важных и ключевых направлений современной вертебродологии. В последнее время для коррекции деформации позвоночника у детей с идиопатическим сколиозом применяются металлоконструкции с транспедикулярными опорными элементами. Однако проведение и установка транспедикулярных винтов в деформированные позвонки является технически сложной процедурой, сопряженной с развитием различных осложнений. Использование активных оптических навигационных систем в ходе хирургического вмешательства при установке транспедикулярных опорных элементов металлоконструкции в тела позвонков, на протяжении основной дуги деформации, способствует повышению точности их проведения. До настоящего времени не были разработаны и обоснованы принципы использования навигационных систем при хирургическом лечении детей с идиопатическим сколиозом, а данные литературы, посвященные описанию этой проблемы, весьма немногочисленны и противоречивы.

Целью настоящего исследования являлась разработка и обоснование методики применения системы активной оптической 3D-КТ навигации в хирургическом лечении детей с идиопатическим сколиозом.

Основой проведенного исследования явился анализ полученных результатов обследования 96 пациентов в возрасте от 14 до 18 лет с идиопатическим сколиозом грудной, грудопоясничной и поясничной локализации, проходивших хирургическое лечение в отделении патологии позвоночника и нейрохирургии ФГБУ «НИДОИ им. Г.И. Турнера» Минздрава России в период с 2011 по 2015 год. Все пациенты были разделены на две группы: основную (66 детей), в которой при хирургическом лечении деформации позвоночника установка транспедикулярных опорных элементов осуществлялась с применением системы активной оптической 3D-

КТ навигации, и контрольную (30 детей), в которой установку транспедикулярных опорных элементов дорсальной спинальной системы осуществляли методом «свободной руки».

Для реализации цели диссертационного исследования было поставлено шесть задач, решение которых далее последовательно представлено по тексту заключения.

Задача 1 состояла в проведении оценки особенностей анатомо-антропометрического строения и пространственного взаимоотношения костных структур позвонков у детей с идиопатическим сколиозом при помощи программного обеспечения Spine Map 3D навигационной станции.

Для решения этой задачи у 66 пациентов основной группы проведен анализ данных компьютерно-томографического исследования позвоночника, импортированных в навигационную станцию, включающий в себя оценку угла основной дуги сколиотической деформации, ротации апикального и периапикальных позвонков, внешнего поперечного и продольного диаметров корней дуг позвонков с уровня Th2 до L5 позвонка и разработанных нами коэффициентов асимметрии костных структур позвонков с применением методов статистики (описательной статистики, визуальный анализ диаграмм Тьюки анатомо-антропометрических характеристик позвонков и коэффициентов асимметрии, критерий Колмогорова-Смирнова, корреляционный анализ и метод корреляционных плеяд В.П. Терентьева).

Из 66 пациентов у 40 детей имел место идиопатический сколиоз грудной локализации с правосторонней направленностью сколиотической дуги. У пациентов с данным видом деформации обнаружена сильная корреляционная связь между величиной ротацией апикального позвонка, основным углом сколиотической деформации и коэффициентом асимметрии продольных диаметров корней дуг вершинного позвонка. Впервые выявлена закономерность, заключающаяся в значительной асимметрии правых и левых поперечных диаметров корней дуг позвонков верхнегрудного отдела позвоночника на уровне Th3-Th4 позвонков, вне зоны основной дуги

искривления («Закономерность изменения анатомо-антропометрических показателей корней дуг позвонков у детей с правосторонним идиопатическим сколиозом грудной локализации», свидетельство №490 на открытие от 18.03.2016, выдано Российской Академией естественных наук и Международной академией авторов научных открытий и изобретений). У всех 40 пациентов отмечалось преобладание размеров поперечных диаметров левых корней дуг позвонков над правыми, подтверждавшееся их коэффициентом асимметрии, медиана которого для уровня Th3 и Th4 позвонков составила 0,60-0,63. Выявленные особенности параметров костных структур позвоночника у детей с правосторонним идиопатическим сколиозом грудной локализации позволили доказать структуральные изменения, которые происходят в телах позвонков в результате онтогенеза сколиотического процесса.

На основании проведенного анализа особенностей анатомо-антропометрических параметров позвонков у остальных 26 пациентов с идиопатическим левосторонним сколиозом грудопоясничной/поясничной локализации при помощи 3D-КТ навигации установлено, что анатомические размеры поперечных и продольных диаметров корней дуг с вогнутой и выпуклой стороны на вершине основной дуги деформации в среднем превышают 4,0 мм. Эта особенность позволяет у данной категории пациентов осуществить тотальную транспедикулярную фиксацию на протяжении дуги искривления с обеих сторон. Данная особенность является кардинальным отличием от сколиотической деформации у пациентов с типом Lenke I, где с вогнутой стороны основной дуги искривления поперечный диаметр корней дуг позвонков апикальной зоны составил в среднем 3,6 мм при величине сколиотической деформации от 33,7° до 136°.

На основании проведенного статистического сравнительного анализа коэффициентов асимметрии поперечного и продольного диаметров корней дуг и коэффициента асимметрии площадей корней дуг, установлено достоверное ($p < 0,05$) отличие, заключающееся в большей выраженности

асимметрии поперечных и продольных диаметров корней дуг позвонков апикальной зоны при I типе идиопатического сколиоза по Lenke в сравнении с апикальными позвонками при V типе.

Таким образом, знание анатомо-антропометрических параметров и пространственных взаимоотношений костных структур позвонков в основной дуге деформации позволили осуществить рациональное предоперационное планирование, точно определить уровни и возможности корректной установки транспедикулярных опорных элементов металлоконструкции во время хирургического вмешательства.

Задача 2 заключалась в определении анатомических ориентиров и количества референтных точек для регистрации в грудном и поясничном отделах позвоночника в ходе операции у детей с идиопатическим сколиозом при использовании навигационной системы.

Для решения этой задачи у 66 пациентов основной группы на основании метода оценки среднеквадратичной погрешности интраоперационной регистрации проведен анализ протоколов работы системы активной оптической 3D-КТ навигации, с учетом полученной погрешности регистрации по анатомическим ориентирам определены анатомические ориентиры и количество референтных точек для регистрации в грудном и поясничном отделах позвоночника во время хирургического вмешательства.

Установлено, что в грудном отделе позвоночника оптимальными анатомическими костными структурами позвонка, используемых в качестве референтных точек для проведения интраоперационной регистрации, являются 3 точки: середина вершины остистого отростка и вершины поперечных отростков регистрируемого позвонка. Для проведения регистрации в поясничном отделе позвоночника в качестве референтных точек используют также 3 точки: середину вершины остистого отростка регистрируемого позвонка и середину дугоотростчатого сустава между регистрируемым и вышележащим позвонком с обеих сторон относительно

линии остистых отростков. На основании проведенного статистического анализа полученной ошибки регистрации по анатомическим ориентирами, установлено, что при использовании такого количества и последовательности референтных точек в грудном и поясничном отделах позвоночника среднее геометрическое значение погрешности составляет менее 1,0 мм.

На основании проведенного анализа величины среднеквадратичной ошибки при регистрации по поверхности определено, что ее среднее геометрическое значение в грудном и поясничном отделах позвоночника для большинства позвонков составило менее 0,5 мм. Также установлено, что одноуровневая регистрация и сочетание регистрации по анатомическим ориентирам с регистрацией по поверхности позволяет получить наибольшую точность при работе с использованием навигационной станции.

Задача 3 состояла в определении возможного количества сформированных костных каналов для транспедикулярных опорных элементов металлоконструкции с одного уровня регистрации в грудном и поясничном отделах позвоночника.

Для решения данной задачи у 66 пациентов основной группы проведен анализ разработанных нами интраоперационных протоколов работы системы активной оптической 3D-КТ навигации регистрации и осуществлена оценка количества уровней регистрации по анатомическим ориентирам и по поверхности, выполненных на протяжении зоны инструментального спондилодеза в ходе хирургического вмешательства в грудном и поясничном отделах позвоночника.

В результате проведенного исследования процедуры формирования костных каналов для транспедикулярной фиксации при помощи системы активной оптической 3D-КТ навигации установлено, что в верхнегрудном отделе позвоночника в среднем с одного уровня регистрации по анатомическим ориентирам и по поверхности удалось сформировать каналы для транспедикулярных винтов в 1,9 позвонка. Для среднегрудного отдела

позвоночника соотношение уровень регистрации к инструментированным позвонкам составило – 1/1,5, а в нижнегрудном отделе – 1/2,2. В поясничном отделе позвоночника соотношение уровня регистрации к позвонкам, позволяющее сохранить точность сопряжения контуров кортикального слоя позвонка с контурами его виртуальной 3D-модели, составило 1/2,3.

Задача 4 заключалась в оценке временных характеристик использования системы активной оптической 3D-КТ навигации в ходе хирургического вмешательства у детей с идиопатическим сколиозом.

На основании разработанного хронометрического протокола изучены временные характеристики при работе с навигационной станцией на интраоперационном этапе у всех 66 пациентов основной группы. Выполнен мониторинг времени, затрачиваемого на установку нулевого трекера, проведения регистрации по анатомическим ориентирам и по поверхности, а также времени, затрачиваемого на формирование костных каналов для транспедикулярных опорных элементов в позвонках, входящих в зону инструментальной фиксации.

По результатам проведенного исследования время установки нулевого трекера пациента составило от 35 до 82 секунд (в среднем 55 секунд). На основании проведенного визуального анализа установлено, что медиана значений времени регистрации по анатомическим ориентирам почти на всех уровнях позвонков имела значение менее 20 секунд; медиана значений времени регистрации по поверхности составляла менее 70 секунд. Время, затраченное на формирование костных каналов для транспедикулярных винтов, с левой стороны относительно линии остистых отростков позвоночника в грудном и поясничном отделах составило от 12 до 409 секунд. Время, затраченное на формирование костных каналов для транспедикулярных винтов, с правой стороны относительно линии остистых отростков позвоночника в грудном и поясничном отделах составило от 12 до 480 секунд. Значение медианы *screwLtime* и *screwRtime* для большинства уровней составило менее 60 секунд. Суммарное время *RegAntime* и

RegSurtime составило от 1,7 до 33,2 минуты, среднее геометрическое значение – 5,8 минут. Суммарное время, состоящее из совокупности RegAntime, RegSurtime, screwLtime и screwRtime, составило от 7,3 до 76,1 минуты, среднее геометрическое значение – 25,9 минут.

В ходе исследования установлено, что выполнение КТ исследования позвоночника у детей с идиопатическим сколиозом 4 степени после дискэктомии и курса HALO-феморального вытяжения позволяет уменьшить количество уровней регистрации по анатомическим ориентирам и время, затрачиваемое на эту процедуру, в ходе хирургического вмешательства.

Задача 5 состояла в осуществлении сравнительного анализа корректности, правильности и стабильности установки транспедикулярных винтов в позвонки у детей с идиопатическим сколиозом методом «free-hand» и с применением системы активной оптической 3D-КТ навигации.

Для решения этой задачи нами проведен сравнительный анализ хирургического лечения 96 пациентов с идиопатическим сколиозом. На основании данных послеоперационного компьютерно-томографического исследования позвоночника у 66 пациентов основной группы и 30 детей контрольной группы (методом «free-hand») осуществлена оценка количества установленных транспедикулярных винтов в грудном и поясничном отделах позвоночника, а также проведен сравнительный анализ корректности, правильности и стабильности положения опорных элементов в позвонках на протяжении зоны инструментального спондилодеза.

Общее количество транспедикулярных опорных элементов в основной группе наблюдения составило 1166, в контрольной группе – 546 винтов. В основной группе наблюдения отмечено статистически значимое ($P < 0,0001$) большее количество установленных транспедикулярных опорных элементов в грудном отделе позвоночника по сравнению с контрольной группой.

Сравнительный анализ корректности положения транспедикулярных опорных элементов, установленных в позвонки под контролем 3D-КТ навигации и при помощи метода «freehand», выполнен на основании шкалы

S.D. Gertzbein et al. (1990): Grade 0 (full correct) – транспедикулярный винт полностью находится в корне дуги, не контактируя с прилежащим мягкими тканями, Grade I – смещение транспедикулярного опорного элемента относительно кортикала корня дуги до 2 мм, Grade II – смещение винта находится в пределах от 2 до 4 мм, Grade III – более 4 мм; и пространственной схемы положения транспедикулярного винта относительно костных структур инструментированного позвонка - SLIM+V.

Корректное и стабильное положение винтов относительно костных структур инструментированных позвонков в основной группе в целом отмечено в 96% наблюдений (1119 винтов), не корректное положение винтов при проведении анализа данных послеоперационного КТ позвоночника выявлено в 4% наблюдений (47 винтов). В контрольной группе пациентов корректное положение отмечено в 78% случаев (426 винтов), количество некорректно установленных транспедикулярных опорных элементов по сравнению с основной группой было достоверно больше ($P < 0,05$) и составило 22% (120 винтов). Во всех наблюдениях не корректное стояние винтов не вызывало неврологических нарушений.

Задача 6 заключалась в создании алгоритма использования 3D-КТ навигации при коррекции деформации позвоночника у детей с идиопатическим сколиозом.

Решение этой задачи осуществлено на основании изучения особенностей работы системы активной оптической 3D-КТ навигации, специфики предоперационного планирования в программном обеспечении SpineMap3D и интраоперационного этапа работы с использованием навигационной станции при хирургическом лечении детей с идиопатическим сколиозом. В результате проведенного анализа указанный алгоритм был обоснован и представлен в виде специальной схемы, включающей в себя мероприятия, разделенные на три этапа.

Первый этап данного алгоритма, обозначенный нами как «Предоперационное обследование и планирование в навигационной

станции», описывает последовательность действий при выполнении КТ-сканирования позвоночника и критерии корректной установки транспедикулярных опорных элементов на основании проведения оценки анатомо-антропометрических особенностей корней дуг позвонков в программной среде SpineMap3D навигационной станцией.

Второй этап созданного нами алгоритма определяет последовательность действий при проведении процедуры интраоперационной регистрации. Данный этап учитывает анатомические особенности грудного и поясничного отделов позвоночника у детей с идиопатическим сколиозом и выбор референтных точек для проведения регистрации в зависимости от локализации регистрируемого позвонка. Создана определенная последовательность действий, основанных на оценке величины среднеквадратичной погрешности, полученной при проведении регистрации по анатомическим ориентирам и по поверхности, позволяющая обеспечить достаточную точность сопряжения контуров регистрируемого позвонка с контурами виртуальной 3D-модели позвоночника.

Третий этап алгоритма, описывающий процедуру формирования каналов в телах позвонков для транспедикулярных винтов, базируется на определении оптимального количества инструментированных позвонков с одного уровня регистрации. Последовательность действий на данном этапе определяются анатомическим отделом позвоночника, в котором осуществляют установку транспедикулярных опорных элементов, и анатомо-антропометрическими особенностями корней дуг инструментируемого позвонка.

Следует особо отметить, что предложенный алгоритм использования 3D-КТ навигации при коррекции деформации позвоночника у детей с идиопатическим сколиозом учитывает выявленные особенности навигационной ассистенции у пациентов данной категории. Именно поэтому предложенный алгоритм позволит улучшить результаты коррекции деформации позвоночника и достичь корректной и стабильной установки

транспедикулярных опорных элементов в тела позвонков на протяжении сколиотической дуги деформации.

Таким образом, в ходе выполнения диссертационного исследования удалось решить все шесть поставленные задачи и реализовать поставленную цель.

ВЫВОДЫ

1. Выраженность структуральных изменений на вершине основной дуги искривления у детей с идиопатическим сколиозом грудной, груднопоясничной и поясничной локализации характеризуется сильными корреляционными связями ($|r| > 0,7$) между величиной угла сколиотической деформации, ротацией и коэффициентом асимметрии продольных диаметров корней дуг апикального позвонка. Поперечный диаметр корней дуг позвонков с вогнутой стороны вершины основной дуги искривления при идиопатическом сколиозе тип Lenke I составил в среднем 3,6 мм, при идиопатическом сколиозе тип Lenke V превышал в среднем 4,0 мм. У детей с идиопатическим сколиозом грудной локализации имеется достоверно большая выраженность асимметрии поперечных и продольных диаметров корней дуг позвонков апикальной зоны ($p < 0,05$).

2. У детей с идиопатическим сколиозом анатомическими ориентирами для регистрации в ходе операции являются 3 референтные точки: в грудном отделе позвоночника - середина вершины остистого отростка и середина вершин поперечных отростков регистрируемого позвонка; в поясничном отделе - середина вершины остистого отростка регистрируемого позвонка и середина дугоотростчатого сустава между регистрируемым и вышележащим позвонком с обеих сторон относительно линии остистых отростков.

3. Количество позвонков, в которых сформированы костные каналы для установки транспедикулярных опорных элементов, с одного уровня регистрации в верхнегрудном отделе позвоночника составляет 1,9 позвонка, для среднегрудного отдела позвоночника – 1,5, в нижнегрудном отделе – 2,2 позвонка, в поясничном отделе позвоночника - 2,3 инструментированных позвонка ($P < 0,05$).

4. Временные характеристики из расчета на один позвонок, затраченные при использовании навигационной станции в ходе операции, составили: установка нулевого трекера пациента - 55 секунд, регистрация по

анатомическим ориентирам - 20 секунд, регистрация по поверхности - 70 секунд, формирование костных каналов для транспедикулярных винтов - 60 секунд. Среднегеометрическое значение показателя времени, затраченного на проведение навигации на одно хирургическое вмешательство, составило 1555,4 секунд (25,9 минут).

5. Использование системы активной оптической 3D-КТ навигации при хирургическом лечении детей с идиопатическим сколиозом позволяет обеспечить корректное положение винтов в костных структурах инструментированных позвонков в 96% наблюдений, что достоверно выше ($P < 0,05$) в сравнении с методом «free-hand», обеспечивающим корректное положение транспедикулярных винтов в 78% случаев.

6. Предложенный алгоритм использования системы активной оптической 3D-КТ навигации при коррекции деформации позвоночника у детей с идиопатическим сколиозом, включающий в себя определенную последовательность действий при проведении предоперационного обследования и планирования, интраоперационной регистрации и процедуры формирования каналов в телах позвонков для транспедикулярных винтов, позволил научно обосновать методику применения данной системы в клинической практике и способствовать улучшению коррекции сколиотического компонента деформации позвоночника.

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Для возможности использования навигационной установки в ходе хирургического вмешательства необходимо выполнение КТ исследования позвоночника в положении пациента на животе (параметры сканирования - толщина среза – 1,0 мм, размер матрицы – 512 на 512 пикселей) с целью максимального приближения его положения на операционном столе.

2. Величина внешнего поперечного диаметра корня дуги позвонка более 4 мм, определенная в программе Spine Map 3D навигационной станции, является критерием возможности и корректной установки транспедикулярных винтов на протяжении сколиотической дуги деформации позвоночника.

3. При получении среднеквадратичной погрешности при регистрации по анатомическим ориентирам более 0,6 мм необходимо выполнение регистрации по поверхности задних костных структур регистрируемого позвонка.

4. Проверка правильности и точности сопряжения контуров регистрируемого позвонка в ходе операции с контурами виртуальной 3D-модели позвоночника является ключевым моментом в определении корректности работы навигационной системы и инструментов.

5. Алгоритм использования системы активной оптической 3D-КТ навигации при коррекции деформации позвоночника у детей с идиопатическим сколиозом позволит улучшить результаты коррекции деформации позвоночника, достичь корректной и стабильной установки транспедикулярных опорных элементов в тела позвонков на протяжении сколиотической дуги деформации.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

CDI – Cotrel–Dubousset

UT – верхнегрудной отдел позвоночника

MT – среднегрудной отдел позвоночника

LT – нижнегрудной отдел позвоночника

L – поясничный отдел позвоночника

КТ – компьютерная томография

MPT – магнитно-резонансная томография

trdL - поперечный диаметр левого корня дуги позвонка

lngdL - продольный диаметр левого корня дуги позвонка

trdR - поперечный диаметр правого корня дуги позвонка

lngdR - продольный диаметр правого корня дуги

SR - площадь правого корня дуги

SL - площадь левого корня дуги

KAtrd - коэффициент асимметрии поперечных диаметров корней дуг позвонка

KAlng - коэффициент асимметрии продольных диаметров корней дуг позвонка

KAS - коэффициент асимметрии площадей корней дуг позвонка

РАП - ротация апикального позвонка

РППП - ротация проксимального периапикального позвонка

РДПП - ротация дистального периапикального позвонка

ТПФ – транспедикулярная фиксация

RegAnMD - среднеквадратичная погрешность регистрации по анатомическим ориентирам

RegSurMD - среднеквадратичная погрешность регистрации по поверхности

T traker – время, затрачиваемое на установку нулевого трекера

T regAn – время, затрачиваемое на проведение регистрации по анатомическим ориентирам

T regSur – время, затрачиваемое на проведение регистрации по поверхности

T screwCanL - время, затрачиваемое на формирование костного канала для проведение транспедикулярного винта с левой стороны позвоночника относительно линии остистых отростков

T screwCanR - время, затрачиваемое на формирование костного канала для проведение транспедикулярного винта с правой стороны позвоночника относительно линии остистых отростков

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеева, Н.В. Состояние функции внутренних органов у больных сколиозом 3-4 степени / Н.В. Алексеева, Н.С. Малышкина, Е.Г. Ипполитова [и др.] // Бюл. Сибирского отделения РАМН. – 1996. – № 4. – С. 12.
2. Асютин, Д.С. Сравнительный анализ эффективности хирургического лечения дегенеративного стеноза позвоночного канала пояснично-крестцового отдела позвоночника с применением метода роботоассистенции : автореф. дис. ... канд. мед. наук / Асютин Дмитрий Сергеевич. – М., 2014. – 30 с.
3. Белецкий, А.В. Установка транспедикулярных винтов в поясничном отделе позвоночника с применением компьютерной навигации / А.В. Белецкий, А.Н. Мазуренко, С.В. Макаревич [и др.] // Ортопедия, травматология и протезирование. - 2010. - № 3. - С. 89-95.
4. Васюра, А.С. Хирургическое лечение сколиоза с применением метода транспедикулярной фиксации / А.С. Васюра, В.В. Новиков, М.В. Михайловский [и др.] // Хирургия позвоночника. – 2011. – № 2. – С. 27–34.
5. Васюра, А.С. Эффективность применения ламинарной и транспедикулярной фиксации при хирургическом лечении идиопатического сколиоза поясничной и грудопоясничной локализации / А.С. Васюра, В.В. Новиков, В.В. Белозеров [и др.] // Хирургия позвоночника. - 2012. - № 1. - С. 48-53.
6. Ветрилэ, С.Т. Оценка эффективности одноэтапной хирургической коррекции сколиотической деформации позвоночника инструментарием Cotrel-Dubousset / С.Т. Ветрилэ, А.А. Кисель, А.А. Кулешов // Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова. – 2004. – № 4. – С. 58–67.
7. Ветрилэ, С.Т. Дорсальная хирургическая коррекция сколиоза инструментарием Cotrel – Dubousset с предварительной

- галопельвиктракцией и без нее / С.Т. Ветрилэ, А.А. Кулешов, А.А. Кисель [и др.] // Хирургия позвоночника. – 2005. – № 4. – С. 32–39.
8. Ветрилэ, С.Т. Концепция оперативного лечения различных форм сколиоза с использованием современных технологий / С.Т. Ветрилэ, А.А. Кулешов, В.В. Швец // Хирургия позвоночника – 2009. – № 4. – С. 21–30.
 9. Ветрилэ, С.Т. Возможности компьютерной томографии в комплексной оценке сколиотической деформации позвоночника / С.Т. Ветрилэ, А.К. Морозов, А.А. Кисель [и др.] // Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова. – 2003. – Т. 1, № 1. – С. 11–20.
 10. Виссарионов, С.В. Анатомо-антропометрическое обоснование транспедикулярной фиксации у детей 1,5-5 лет / С.В. Виссарионов // Хирургия позвоночника. - 2006. - № 3. - С. 19-23.
 11. Виссарионов, С.В. Тактика хирургического лечения детей с идиопатическим сколиозом грудной локализации / С.В. Виссарионов, А.П. Дроздецкий // Хирургия позвоночника. - 2010. - № 4. - С. 25-29.
 12. Виссарионов, С.В. Коррекция идиопатического сколиоза у детей под контролем 3D-КТ-навигации / С.В. Виссарионов, А.П. Дроздецкий, Д.Н. Кокушин Д.Н. [и др.] // Хирургия позвоночника. - 2012. - № 2. - С. 30-36.
 13. Виссарионов, С.В. Технологии коррекции деформаций позвоночника транспедикулярными спинальными системами у детей с идиопатическим сколиозом / С.В. Виссарионов // Хирургия позвоночника. - 2013. - № 1. - С. 21-27.
 14. Виссарионов, С.В. Хирургическая коррекция деформации позвоночника при идиопатическом сколиозе: история и современное состояние (обзор литературы) / С.В. Виссарионов, А.В. Соболев, А.М. Ефремов // Травматология и ортопедия России. - 2013. - № 1. - С. 138-145.

15. Виссарионов, С.В. Коррекция деформации позвоночника у детей с идиопатическим сколиозом грудного отдела позвоночника с использованием навигации / С.В. Виссарионов // Ученые записки Тамбовского отделения РоСМУ. - 2014. - № 2. - С. 288-297.
16. Губин, А.В. Ретроспективный анализ мальпозиции винтов после инструментальной коррекции деформаций грудного и поясничного отделов позвоночника / А.В. Губин, С.О. Рябых, А.В. Бурцев // Хирургия позвоночника. - 2015. - Т. 12. - № 1. - С. 8-13.
17. Каспарова, К.А. Роботоассистенция в спинальной нейрохирургии : автореф. дис. ... канд. мед. наук / Каспарова Карина Альбертовна. – М., 2014. – 25 с.
18. Кон, И.И. 20-летний опыт консервативного лечения детей и подростков, больных сколиозом, в условиях специализированной санаторной школы–интерната (3647 наблюдений) / И.И. Кон, Р.Д. Назарова // Актуальные вопросы профилактики и лечения сколиоза у детей. – М. : ЦИТО, 1984. – С. 78–86.
19. Коновалов, Н.А. Новые технологии и алгоритмы диагностики и хирургического лечения дегенеративных заболеваний поясничного отдела позвоночника : автореф. дис. ... д-ра мед. наук / Коновалов Николай Александрович. – М., 2010. - 46 с.
20. Кулешов, А.А. Тяжелые формы сколиоза. Оперативное лечение и функциональные особенности некоторых органов и систем : автореф. дис. ... д-ра мед. наук / Кулешов Александр Алексеевич. – М., 2007. - 53 с.
21. Кулешов, А.А. Сравнительное экспериментальное исследование крючковой и транспедикулярной систем фиксации, применяемых при хирургическом лечении деформаций позвоночника / А.А. Кулешов, И.Н. Лисянский, М.С. Ветрилэ М.С. [и др.] // Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова. - 2012. - № 3. - С. 20-24.

22. Михайловский, М.В. Хирургия деформаций позвоночника / М.В. Михайловский, Н.Г. Фомичев. – Новосибирск : Сибирское университетское издательство, 2002. – 428 с.
23. Михайловский, М.В. Хирургическое лечение идиопатических сколиозов грудной локализации / М.В. Михайловский, В.В. Новиков, А.С. Васюра [и др.] // Хирургия позвоночника. – 2006. – № 1. – С. 25–32.
24. Михайловский, М.В. Хирургия деформаций позвоночника / М.В. Михайловский, Н.Г. Фомичев. – Новосибирск : Redactio, 2011. – 592 с.
25. Новокшенов, А.В. Компьютерная навигация в хирургии шейного и грудного отделов позвоночника / А.В. Новокшенов, М.Ю. Федоров, О.А. Якушин [и др.] // Политравма. - 2010. - № 1. - С. 17-22.
26. Поздников, Ю.И., Лечение сколиоза по методике Харрингтона – Люка / Ю.И. Поздников, Ю.Н. Рыжаков, А.Н. Микиашвили // Проблемы травматологии и ортопедии : тез. докл. VI съезда травматологов-ортопедов Прибалтийских республик. – Таллин, 1990. – Т. 2. – С. 20–27.
27. Поздников, Ю.И. Характеристика патологии опорно-двигательного аппарата у детей Санкт-Петербурга / Ю.И. Поздников, А.В. Овечкина, К.С. Соловьева [и др.] // Российский национальный конгресс «Человек и его здоровье» : материалы. – СПб., 1998. – С. 128.
28. Райе, Р.Э. Исходы оперативного лечения сколиоза у детей и подростков / Р.Э. Райе // Актуальные вопросы профилактики и лечения сколиоза у детей: матер. всесоюз. симпоз. детских ортопедов-травматологов. – М., 1984. – С.135–137.
29. Рубашкин, С.А. Анатомо-морфометрическое обоснование хирургической коррекции сколиотической деформации : автореф. дис. ... канд. мед. наук / Рубашкин С.А. – Саратов, 2008. – 23 с.

30. Садовой, М.А. Компьютерная оптическая система диагностики деформаций позвоночника у детей / М.А. Садовой, Н.Г. Фомичев // Травматология и ортопедия России. – 1994. – № 3. – С. 43–51.
31. Соболев, А.В. Хирургическое лечение детей с идиопатическим сколиозом грудопоясничной и поясничной локализации : автореф. дис. ... канд. мед. наук / Соболев Андрей Владимирович. – СПб., 2015. – 26 с.
32. Стоков, Л. Сегментно гръбначно фиксиране и мястото при задне вертебротомия / Л. Стоков, К. Кожухаров // Ортопедия и травматология (София). – 1989. – Т. XXVI, кн. 2. – С. 18–21.
33. Цивьян, Я.Л. Хирургия позвоночника / Я.Л. Цивьян. – Новосибирск : изд-во Новосибирского ун-та, 1993. – 364 с.
34. Шве́ц, В.В. Эффективность хирургической коррекции и стабилизации сколиотической деформации при различных операциях с применением дистрактора Харрингтона с боковой тягой : автореф. дис. ... канд. мед. наук / Шве́ц В.В. – М., 1997. – 24 с.
35. Шевченко, С.Д. Хирургическая коррекция позвоночника и грудной клетки при тяжелых формах сколиоза : автореф. дис. ... д-ра мед. наук / Шевченко С.Д. – Харьков, 1983. – 24 с.
36. Aaro, S. The effect of Harrington instrumentation on the sagittal configuration and mobility of the spine in scoliosis / S. Aaro, G. Ohlen // Spine. – 1983. – Vol. 8, N 6. – P. 570–575.
37. Aaro, S. Estimation of vertebral rotation and the spinal and rib cage deformity in scoliosis by computed tomography / S. Aaro, M. Dahlborn // Spine. – 1981. – Vol. 6. – P. 460–467.
38. Abul-Kasim, K. Radiological and clinical outcome of screw placement in adolescent idiopathic scoliosis: evaluation with low-dose computed tomography / K. Abul-Kasim, A. Ohlin, A. Strombeck [et al.] // Eur. Spine J. – 2010. Vol. 19. – P. 96–104.

- 39.Amiot, L.P. Comparative results between conventional and computer-assisted pedicle screw installation in the thoracic, lumbar, and sacral spine / L.P. Amiot, K. Lang, M. Putzier [et al.] // *Spine*. – 2000. – Vol. 25. - P. 606–614.
- 40.Barr, S.J. Lumbar pedicle screw versus hooks. Results in double major curves in adolescent idiopathic scoliosis / S.J. Barr, A.M. Schuette, J.B. Emans // *Spine*. – 1997. – Vol. 20. – P. 1369–1379.
- 41.Belmont, P.J. In vivo accuracy of thoracic pedicle screws / P.J. Belmont, W.R. Klemme, A. Dhawan [et al.] // *Spine*. – 2001. – Vol. 26, N 21. – P. 2340–2346.
- 42.Belmont, P.J. Accuracy of thoracic pedicle screws in patients with and without coronal plane spinal deformities / P.J. Belmont, W.R. Klemme, A. Dhawan [et al.] // *Spine*. – 2002. – Vol. 27, N 14. – P. 1558–1566.
- 43.Bentley, G. The treatment of scoliosis in muscular dystrophy using modified Luque and Harrington-Luque instrumentation / G. Bentley, F. Haddad, T. Bull, D. Seingry // *J. Bone Joint Surg.* – 2001. – Vol. 83, N 1. – P. 22–28.
- 44.Bergeson, R.K. How accurately do novice surgeons place thoracic pedicle screws with the free-hand technique? / R.K. Bergeson, R.M. Schwend, T. DeLucia [et al.] // *Spine*. – 2008. – Vol. 33, N 15. – P. 501–507.
- 45.Bidre, U. Pedicle morphometry in patients with adolescent idiopathic scoliosis / U. Bidre, M. Devkant, K. Pankaj [et al.] // *Indian J. Orthop.* – 2010. – Vol. 44, N 2. – P. 169–176.
- 46.Bridwell, K.H. Major intraoperative neurologic deficits in pediatric and adult spinal deformity patients. Incidence and etiology at one institution / K.H. Bridwell, L.G. Lenke, C. Baldus, K. Blanke // *Spine*. – 1998. – Vol. 23, N 3. – P. 324–331.
- 47.Bridwell, K.H. Surgical treatment of idiopathic adolescent scoliosis / K.H. Bridwell // *Spine*. – 1999. – Vol. 24. – P. 2607–2616.
- 48.Catan, H. Pedicle morphology of the thoracic spine in preadolescent idiopathic scoliosis: magnetic resonance supported analysis / H. Catan, L.

- Buluc, Y. Anik [et al.] // Eur. Spine J. – 2007. - Vol. 16, N 8. – P.1203 – 1208.
- 49.Chan, C.Y. Safety of thoracic pedicle screw application using the funnel technique in Asians: a cadaveric evaluation / C.Y. Chan, M.K. Kwan, L.B. Saw // Eur. Spine J. – 2010. – Vol. 19, N 1. – P. 78–84.
- 50.Chung, K.J. Ideal entry point for the thoracic pedicle screw during the free hand technique / K.J. Chung, S.W. Suh, S. Desai [et al.] // Int. Orthop. – 2008. – Vol. 32. – P. 657-662.
- 51.Cinotti, G. Pedicle insrtumentation in the thoracic spine: a morphometric and cadaveric study for placement of screws / G. Cinotti, S. Gumina, M. Ripani // Spine. – 1999. – Vol. 24. – P. 114–119.
- 52.Cotrel, Y. New universal instrumentation in spinal surgery / Y. Cotrel, J. Dubousset, M. Guillaumat // Clin. Orthop. – 1988. – N 227. – P. 10–29.
- 53.Danielsson, A.J. Radiologic findings and curve progression 22 years after treatment for adolescent idiopathic scoliosis. / A.J. Danielsson, A.L. Nachemson // Spine. – 2001. – Vol. 26, N 5. – P. 516–525.
- 54.De Blas, G. Safe pedicle screw placement in thoracic scoliotic curves using t-EMG: stimulation threshold variability at concavity and convexity in apex segments / G. De Blas, C. Barrios, I. Regidor [et al.] // Spine. – 2012. – Vol. 37, N 6. – P. 387–395.
- 55.Di Silvestre, M. Complications of thoracic pedicle screws in scoliosis treatment / M. Di Silvestre, P. Parisini, F. Lolli [et al.] // Spine. – 2007. – Vol. 32, N 15. - P. 1655–1661.
- 56.Donovan, D.J. The removal of a transdural pedicle screw for thoracolumbar spine fracture / D.J. Donovan, D.W. Polly, S.L. Ondra // Spine. – 1996. – Vol. 21. – P. 2495–2498.
- 57.Dove, J. Internal fixation of the lumbar spine: the Hartshill rectangle / J. Dove // Clin. Orthop. – 1986. – Vol. 203. – P. 135–140.
- 58.Dove, J. Segmental wiring for spinal deformity. A morbidity report / J. Dove // Spine. – 1989. – Vol. 14, N 2. – P. 229–231.

59. Dubousset, J. The Crankshaft phenomenon / J. Dubousset, J.A. Herring, H. Shufflebarger // J. Pediatr. Orthop. – 1989. – Vol. 9, N 5. – P. 541–550.
60. Ebraheim, N.A. Anatomic relations between the lumbar pedicle and the adjacent neural structures / N.A. Ebraheim, R. Xu, M. Darwich, R.A. Yeasting // Spine. – 1997. – Vol. 22. – P. 2338–2341.
61. Erkan, S. Alignment of pedicle screws with pilot holes: can tapping improve screw trajectory in thoracic spines? / S. Erkan, B. Hsu, C. Wu [et al.] // Eur. Spine J. – 2010. – Vol. 19, N 1. – P. 71–77.
62. Erker, M.L. Computer tomography evaluation of CDI in idiopathic scoliosis / M.L. Erker, R.R. Betz, P. Trent // Spine. – 1988. – Vol. 13. – P. 1141–1144.
63. Fayyazi, A.H. Accuracy of computed tomography in assessing thoracic pedicle screw malposition / A.H. Fayyazi, R.R. Hugate, J. Pennypacker [et al.] // J. Spinal Disord. Tech. – 2004. Vol. 17. – P. 367–371.
64. Fich, R. Comparison of Cotrel-Dubousset and Harrington rod instrumentations in idiopathic scoliosis / R. Fitch, M. Turi, B Bowman [et al.] // Pediatr. Orthop. – 1990. – N 10. – P. 44–44.
65. Gaines, R.W. Jr. The use of pedicle-screw internal fixation for the operative treatment of spinal disorders / R.W. Jr. Gaines // J. Bone Joint Surg. Am. – 2000. – Vol. 82, N 10. – P. 1458–1476.
66. Gang, C. Learning curve of thoracic pedicle screw placement using the free-hand technique in scoliosis: how many screws needed for an apprentice? / C. Gang, L. Haibo, L. Fancai [et al.] // Eur. Spine J. – 2012. – Vol. 21, N 6. – P. 1151–1156.
67. Gebhard, F.T. Does computer-assisted spine surgery reduce intraoperative radiation doses? / F.T. Gebhard, M.D. Kraus, E. Schneider [et al.] // Spine. – 2006. – Vol. 31, N 17. – P. 2024–2028.
68. Gertzbein, S.D. Accuracy of pedicular screw placement in vivo / S.D. Gertzbein, S.E. Robbins // Spine. – 1990. – Vol. 15, N1. – P. 11–14.

- 69.Gocen, S. A new method to measure vertebral rotation from CT scans / S. Gocen, H. Havitcioglu, E. Alici // Eur. Spine J. – 1999. Vol. 8. – P. 261–265.
- 70.Gonzalvo, A. The learning curve of pedicle screw placement: how many screws are enough? / A. Gonzalvo, G. Fitt, S. Liew [et al.] // Spine. – 2009. – Vol. 34, N 21. – P. 761–765.
- 71.Hackenberg, L. Axial and tangential fixation strength of pedicle screws versus hooks in the thoracic spine in relation to bone mineral density / L. Hackenberg, T. Link, U. Liljenqvist // Spine. – 2002. – Vol. 27, N 9. – P. 937–942.
- 72.Halm, H. Segmental pedicle screw instrumentation in idiopathic thoracolumbar and lumbar scoliosis / H. Halm, T. Niemeyer, T. Link [et al.] // Eur. Spine J. – 2000. – Vol. 9, N 3. – P. 191–197.
- 73.Hamill, C.L. The use of pedicle screw fixation to improve correction in the lumbar spine of patients with idiopathic scoliosis: Is it warranted? / C.L. Hamill, L.G. Lencke, K.H. Bridwell [et al.] // Spine. – 1996. – Vol. 21. – P. 1241–1249.
- 74.Harrington, P.R. Treatment of scoliosis. Correction and internal fixation by spine instrumentation / P.R. Harrington // J. Bone Joint Surg. – 1962. – Vol. 44-A, N 4. – P. 591–610.
- 75.Harrington, P.R. Technical details in relation to the successful use of instrumentation in scoliosis / P.R. Harrington // Orthop. Clin. North Am. – 1972. – Vol. 3, N 1. – P. 49–67.
- 76.Harrington, P.R. An eleven-year clinical investigation of Harrington instrumentation: A preliminary report on 578 cases / P.R. Harrington, J.H. Dickson // Clin. Orthop. – 1973. – N 93. – P. 113.
- 77.Heary, R.F. Thoracic pedicle screws: postoperative computerized tomography scanning assessment / R.F. Heary, C.M. Bono, M. Black // J. Neurosurg. 2004. – Vol. 100. – P. 325–331.

- 78.Hicks, J.M. Complications of pedicle screw fixation in scoliosis surgery: a systematic review / J.M. Hicks, A. Singla, F.H. Shen [et al.] // Spine. – 2010. – Vol. 35, N 11. – P. 465–470.
- 79.Ho, E.K.W. New methods of measuring vertebral rotation from computed tomographic scans: an intraobserver and interobserver study on girls with scoliosis / E.K.W. Ho, S.S. Upadhyay, F.L. Chan [et al.] // Spine. – 1993. – Vol. 18. – P. - 1173–1177.
- 80.Hwang, S.W. Comparison of 5-year outcomes between pedicle screw and hybrid constructs in adolescent idiopathic scoliosis / S.W. Hwang, A.F. Samdani, B. Wormser [et al.] // J. Neurosurg. Spine. – 2012. – Vol. 17, N 3. – P. 212–219.
- 81.Ishikawa, Y. Clinical accuracy of three-dimensional fluoroscopy-based computer-assisted cervical pedicle screw placement: a retrospective comparative study of conventional versus computer-assisted cervical pedicle screw placement / Y. Ishikawa, T. Kanemura, G. Yoshida [et al.] // J. Neurosurg. Spine. – 2010. – Vol. 13, N 5. – P. 606-611.
- 82.Jarvers, J.S. 3D-based navigation in posterior stabilisations of the cervical and thoracic spine: problems and benefits. Results of 451 screws / J.S. Jarvers, S. Katscher, A. Franck [et al.] // Eur. J. Trauma Emerg. Surg. – 2011. – Vol. 37, N 2. – P. 109–119.
- 83.Karatoprak, O. Comparative analysis of pedicle screw versus hybrid instrumentation in adolescent idiopathic scoliosis surgery / O. Karatoprak, K. Unay, M. Tezer [et al.] // Int. Orthop. – 2008. – Vol. 32, N 4. – P. 523–528.
- 84.Kim, Y.J. Free hand pedicle screw placement in the thoracic spine: is it safe? / Y.J. Kim, L.G. Lenke, K.H. Bridwell [et al.] // Spine. – 2004. – Vol. 29, N 3. – P.333 – 342.
- 85.Kim, Y.J. Comparative analysis of pedicle screw versus hybrid instrumentation in posterior spinal fusion of adolescent idiopathic scoliosis /

- Y.J. Kim, L.G. Lenke, J. Kim [et al.] // Spine. – 2006. – Vol. 31, N3. – P. 291–298.
- 86.Kim, Y.W. Free-hand pedicle screw placement during revision spinal surgery: analysis of 552 screws / Y.W. Kim, L.G. Lenke, Y.J. Kim [et al.] // Spine. – 2008. – Vol. 33, N 10. – P. 1141–1148.
- 87.Knoeller, S.M. Historical perspective. history of spinal surgery / S.M. Knoeller, C. Seifried // Spine. – 2000. – Vol. 25, N 21. – P. 2838–2843.
- 88.Kojima, T. Quantitation of three-dimensional deformity of idiopathic scoliosis / T. Kojima, Kurokawa T. // Spine. – 1992. – Vol. 17, 3S. – P. S22–S29.
- 89.Kosmopoulos, V. Pedicle screw placement accuracy: a meta-analysis / V. Kosmopoulos, C. Schizas // Spine. – 2007. – Vol. 32, N 3. – P. 111–120.
- 90.Kotani, Y. Improved accuracy of computer assisted cervical pedicle screw insertion / Y. Kotani, K. Abumi, M. Oto [et al.] // J. Neurosurg. – 2003. – Vol. 99, N 3. – P. 257-263.
- 91.Kotani, Y. Accuracy analysis of pedicle screw placement in posterior scoliosis surgery: comparison between conventional fluoroscopic and computer-assisted technique / Y. Kotani, K. Abumi, M. Ito [et al.] // Spine. – 2007. Vol. 32, N 14. – P. 1543–1550.
- 92.Krag, M. Morphometry of the thoracic and lumbar spine related to transpedicular screw placement for surgical spinal fixation / M. Krag, D. Weaver, B. Beynnon [et al.] // Spine. - 1988. – Vol. 13, N 1. – P. 27–32.
- 93.Krismer, M. Scoliotic correction by CDI: The effect of derotation and three dimensional correction / M. Krismer, R. Bauer, W. Sterzinger // Spine. – 1992. – Vol. 17. – P. 263–269.
- 94.Krismer, M. Axial rotation measurement of scoliotic vertebrae by means of computed tomography scans / M. Krismer, W. Sterzinger, H. Christian [et al.] // Spine. – 1996. – Vol. 21. – P. - 576–581.

- 95.Kuklo, T.R. Accuracy and efficacy of thoracic pedicle screws in curves more than 90 degrees / T.R. Kuklo, L.G. Lenke, M.F. O'Brien [et al.] // Spine. – 2005. – Vol. 30, N 2. – P. 222–226.
- 96.Kuklo, T.R. Monaxial versus multiaxial thoracic screws in the correction of adolescent idiopathic scoliosis / T.R. Kuklo, B.K. Potter, D.W. Polly [et al.] // Spine. 2005. – Vol. 30, N 18. – P. 2113–2120.
- 97.Kuraishi, S. Pedicle morphology using computed tomography-based navigation system in adolescent idiopathic scoliosis / S. Kuraishi, J. Takahashi, H. Hirabayashi [et al.] // J. Spinal Disord. Tech. – 2013. – Vol. 26, N 1. - P. 22 - 28.
- 98.Labelle, H. Comparison between preoperative and postoperative threedimentional reconstructions of idiopathic scoliosis with the Cotrel-Dubousset procedure / H. Labelle, J. Dansereau, C. Bellefleur // Spine. – 1995. – Vol. 20. – P. 2487–2492.
- 99.Laine, T. Accuracy of pedicle screw insertion with and without computer assistance: a randomised controlled clinical study in 100 consecutive patients / T. Laine, T. Lund, M. Ylikoski [et al.] // Eur. Spine J. – 2000. – Vol. 9, N 3. – P. 235-240.
100. Lee, C.S. The Crankshaft Phenomenon after posterior Harrington fusion in skeletally immature patients with thoracic or thoracolumbar idiopathic scoliosis followed to maturity / C.S. Lee, A.L. Nachemson // Spine. – 1997. –Vol. 22, N 1. – P. 58–67.
101. Lehman, R.A. Jr. Computed tomography evaluation of pedicle screws placed in the pediatric deformed spine over an 8-year period / R.A. Jr. Lehman, L.G. Lenke, K.A. Keeler [et al.] // Spine. – 2007. – Vol. 32, N 24. – P. 2679–2684.
102. Lenke, L.G. Analysis of pulmonary function and axis rotation in adolescent and young adult idiopathic scoliosis patients treated with CDI / L.G. Lenke, K.H. Bridwell, C. Baldus // J. Spinal Disord. – 1992. – Vol. 5. – P. 16–25.

103. Lenke, L.G. Cotrel-Dubousset instrumentation for adolescent idiopathic scoliosis / L.G. Lenke, K.H. Bridwell, C. Baldus // J. Bone Joint Surg. – 1992. – Vol. 74-A, N 7. – P. 1056–1067.
104. Lenke, L.G., Adolescent idiopathic scoliosis: a new classification to determine extent of spinal arthrodesis / L.G. Lenke, R.R. Betz, J. Harms [et al.] // J. Bone Joint Surg. – 2001. – Vol. 83-A, N 8. – P. 1169–1181.
105. Li, G. Complications associated with thoracic pedicle screws in spinal deformity / G. Li, G. Lv, P. Passias [et al.] // Eur. Spine J. – 2010. – Vol. 19, N 9. P. 1576–1584.
106. Liljenqvist, U.R. Pedicle screw instrumentation of the thoracic spine in idiopathic scoliosis / U.R. Liljenqvist, H.F. Halm, T.M. Link // Spine. – 1997. – Vol. 22. – P. 2239–2245.
107. Liljenqvist, U.R. Morphometric analysis of thoracic and lumbar vertebrae in idiopathic scoliosis / U.R. Liljenqvist, T.M. Link, H.F. Halm // Spine. – 2000. – Vol. 25, N 10. – P.1247-1253.
108. Liljenqvist, U.R. Analysis of vertebral morphology in idiopathic scoliosis with use of MRI and multiplanar reconstruction / U.R. Liljenqvist, T. Allkemper, L. Hackenberg [et al.] // J. Bone Joint Surg. – 2002. – Vol. 84-A, N 3. – P. 359– 368.
109. Liljenqvist, U. Comparative analysis of pedicle screw and hook instrumentation in posterior correction and fusion of idiopathic thoracic scoliosis / U. Liljenqvist, U. Lepsien, L. Hackenberg [et al.] // Eur. Spine J. – 2002. – Vol. 11, N 4. – P. 336-343.
110. Luque, E.R. Paralytic scoliosis in growing children / E.R. Luque // Clin. Orthop. – 1982. – N 163. – P. 202–209.
111. Luque, E.R. Segmental spinal instrumentation for correction of scoliosis / E.R. Luque // Clin. Orthop. – 1982. – N 163. – P. 192–198.
112. MacEwen, G.D. Acute neurological complication in the treatment of scoliosis: A report of the SRS / G.D. MacEwen, W.P. Bunnell, K. Sriram // J. Bone Joint Surg. – 1975. – Vol. 57-A. – P. 404–408.

113. Mac-Thiong, J.M. Neurological outcome and management of pedicle screws misplaced totally within the spinal canal / J.M. Mac-Thiong, S. Parent, B. Poitras [et al.] // *Spine*. – 2013. – Vol. 38, N 3. – P. 229–237.
114. Macke, J.J. Accuracy of robot-assisted pedicle screw placement for adolescent idiopathic scoliosis in the pediatric population / J.J. Macke, R. Woo, L. Varich // *J. Robot Surg*. – 2016. – Vol. 10, N 2. – P. 145-150.
115. McMaster, M.J. Luque rod instrumentation in the treatment of adolescent idiopathic scoliosis. A comparative study with Harrington instrumentation / M.J. McMaster // *J. Bone Joint Surg*. 1991. – Vol. 73-B. – P. 982–989.
116. Mirza, S.K. Accuracy of thoracic vertebral body screw placement using standard fluoroscopy, fluoroscopic image guidance, and computed tomographic image guidance: a cadaver study / S.K. Mirza, G.C. Wiggins, C. Kuntz [et al.] // *Spine*. – 2003. – Vol. 28. - P. 402-413.
117. Moen, K.Y. Treatment of scoliosis. An historical perspective / K.Y. Moen, A.L. Nachemson // *Spine*. – 1999. – Vol. 24, N 24. – P. 2570–2575.
118. Nottmeier, E.W. Placement of thoracolumbar pedicle screws using three-dimensional image guidance: experience in a large patient cohort / E.W. Nottmeier, W. Seemer, P.M. Young // *J. Neurosurg. Spine*. – 2009. – Vol. 10, N 1. – P. 33-39.
119. O'Brien, M.F. Pedicle morphology in thoracic adolescent idiopathic scoliosis: is pedicle fixation an anatomically viable technique? / M.F. O'Brien, L.G. Lenke, S. Mardjetko, T.G. Lowe // *Spine*. – 2000. – Vol. 25, N 18. – P. 2285– 2293.
120. Ovadia, D. The contribution of an electronic conductivity device to the safety of pedicle screw insertion in scoliosis surgery / D. Ovadia, A. Korn, M. Fishkin [et al.] // *Spine*. – 2011. – Vol. 36, N 20. – P. 1314–1321.
121. Panjabi, M. Complexity of the thoracic spine pedicle anatomy / M. Panjabi, J. O'Holleran, J. III Crisco [et al.] // *Eur. Spine J*. – 1997. - Vol. 6, N 1. – P. 19–24.

122. Pampliega, T. Neurologic complications after sublaminar wiring: an experimental study in lambs / T. Pampliega, J.L. Beguiristain, J. Artieda // *Spine*. – 1992. – Vol. 17. – P. 441–445.
123. Papadopoulos, E.C. Accuracy of single-time, multilevel registration in image-guided spinal surgery / E.C. Papadopoulos, F.P. Girardi, A. Sama [et al.] // *Spine J*. – 2005. – Vol. 5, N 3. – P. 263-268.
124. Parent, S. Morphometric analysis of anatomic scoliotic specimens / S. Parent, H. Labelle, W. Skalli [et al.] // *Spine*. – 2002. – Vol. 27, N 21. – P. 2305–2311.
125. Parker, S.L. Accuracy of free-hand pedicle screws in the thoracic and lumbar spine: analysis of 6816 consecutive screws / S.L. Parker, M.J. McGirt, S.H. Farber [et al.] // *Neurosurgery*. – 2011. – Vol. – 68. – P. 170-178.
126. Porter, R.W. Idiopathic scoliosis. The relation between the vertebral canal and the vertebral bodies / R.W. Porter // *Spine*. – 2000. – Vol. 25, N 11. – P. 1360–1366.
127. Rajan, V.V. Iso-C3D navigation assisted pedicle screw placement in deformities of the cervical and thoracic spine / V.V. Rajan, V. Kamath, A.P. Shetty [et al.] // *Indian J. Orthop*. – 2010. – Vol. 44, N 2. - P. 163-168.
128. Rampersaud, Y.R. Clinical accuracy of fluoroscopic computer-assisted pedicle screw fixation: a CT analysis // Y.R. Rampersaud, J.H. Pik, D. Salonen [et al.] // *Spine*. – 2005. – Vol. 30, N 7. – P. 183–190.
129. Reinhardt, H.F. Computer assisted brain surgery for small lesions in the central sensorimotor region / H.F. Reinhardt, M. Trippel, B. Westermann [et al.] // *Acta Neurochir*. – 1996. – Vol. 138, N 2. – P. 200-205.
130. Renshaw, T.S. Screening school children for scoliosis / T.S. Renshaw // *Chin. Orthop*. – 1988. – N 229. – P. 26–33.
131. Roberts, D.W. A frameless stereotaxic integration of computerized tomographic imaging and the operating microscope / D.W. Roberts, J.W.

- Strohbahn, J.F. Hatch [et al.] // J. Neurosurg. – 1986. – Vol. 65, N 4. – P. 545-549.
132. Roy-Camille, R. Internal fixation of the lumbar spine with pedicle screw plating / R. Roy-Camille, G. Saillant, C. Mazel // Clin. Orthop. – 1986. – Vol. 10. - P.7–17.
 133. Russel, G.G. A comparison of four computerized methods for measuring vertebral rotation / G.G. Russel, V.J. Raso, D. Hill, J. McIvor // Spine. – 1990. – Vol. 15. – P. 24–27.
 134. Samdani, A.F. Accuracy of free-hand placement of thoracic pedicle screws in adolescent idiopathic scoliosis: how much of a difference does surgeon experience make? / A.F. Samdani, A. Ranade, D.M. Sciubba [et al.] // Eur. Spine J. – 2010. – Vol. 19, N 1. – P. 91–95.
 135. Samdani, A.F. Triggered electromyography for placement of thoracic pedicle screws: is it reliable? / A.F. Samdani, M. Tantorski, P.J. Cahill [et al.] // Eur. Spine J. – 2011. – Vol. 20, N 6. - P. 869–874.
 136. Santos, E.R. The accuracy of intraoperative O-arm images for the assessment of pedicle screw position / E.R. Santos, C.G. Ledonio, C.A. Castro [et al.] // Spine. – 2012. – Vol. 37, N 2. P. 119–125.
 137. Schulze, C.J. Clinical relevance of accuracy of pedicle screw placement. A computed tomographic-supported analysis / C.J. Schulze, E. Munzinger, U. Weber [et al.] // Spine. – 1998. – Vol. 23, N 20. – P. 2215–2221.
 138. Schwarzenbach O, Berlemann U, Jost B, Visarius H, Arm E, Langlotz F, Nolte LP, Ozdoba C. Accuracy of computerassisted pedicle screw placement. An in vivo computed tomography analysis. Spine (Phila Pa 1976) 1997; 22: 452-458.
 139. Schwend, R.M. Accuracy of fluoroscopically assisted laser targeting of the cadaveric thoracic and lumbar spine to place transpedicular screws / R.M. Schwend, P.J. Dewire, J.M. Kowalski // J. Spinal Disord. – 2000. – Vol. 13. – P. 412–418.

140. Shimizu, M. Are pedicle screw perforation rates influenced by registered or unregistered vertebrae in multilevel registration using a CT-based navigation system in the setting of scoliosis? / M. Shimizu, J. Takahashi, S. Ikegami [et al.] // *Eur. Spine J.* – 2014. – Vol. 23, N 10. – P. 2211-2217.
141. Smorgick, Y. Accuracy and safety of thoracic pedicle screw placement in spinal deformities / Y. Smorgick, M.A. Millgram, Y. Anekstein [et al.] // *J. Spinal Disord. Tech.* – 2005. – Vol. 18. – P. 522–526.
142. Stirling, J. The Drummond spinous process segmental fixation system for scoliosis: a preliminary report / J. Stirling, S.M. Eisenstein // *J. Bone Joint. Surg.* – 1989. – Vol. 71-B, N 1. – P. 152.
143. Su, P. Use of computed tomographic reconstruction to establish the ideal entry point for pedicle screws in idiopathic scoliosis / P. Su, W. Zhang, Y. Peng [et al.] // *Eur. Spine J.* – 2012. – Vol. 21, N 1. – P. 23–30.
144. Suk, S. Segmental pedicle screw fixation in the treatment of thoracic idiopathic scoliosis / S. Suk, S. Lee, W. Kim // *Spine.* – 1995. – Vol. 20. – P. 1399–1405.
145. Suk, S.I. Thoracic pedicle screw fixation in spinal deformities: are they really safe? / S.I. Suk, W.J. Kim, S.M. Lee [et al.] // *Spine.* – 2001. – Vol. 26. - P. 2049–2057.
146. Suk, S.I. Pedicle screw instrumentation in adolescent idiopathic scoliosis (AIS) / S.I. Suk, J.H. Kim, S.S. Kim [et al.] // *Eur. Spine J.* – 2012. – Vol. 21. – P. 13–22.
147. Takahashi, J. Accuracy of multilevel registration in image-guided pedicle screw insertion for adolescent idiopathic scoliosis / J. Takahashi, H. Hirabayashi, H. Hashidate [et al.] // *Spine.* – 2010/ - Vol. 35, N 3. – P. - 347-352.
148. Tamura, Y. Surface-based registration accuracy of CT-based image-guided spine surgery / Y. Tamura, N. Sugano, T. Sasama [et al.] // *Eur. Spine J.* – 2005. – Vol. 14, N 3. – P. - 291-297.

149. Targett, J.P.G. Comparison of Hartshill-Luque spinal fusion with other sublaminar wiring techniques in idiopathic scoliosis in terms of Cobb angle and Perdriolle rotation / J.P.G. Targett, A.D. Gardner // *J. Bone Joint. Surg.* – 1990. – Vol. 72–B, N 2. – P. 335.
150. Tian, N.F. Pedicle screw insertion accuracy with different assisted methods: a systematic review and meta-analysis of comparative studies / N.F. Tian, Q.S. Huang, P. Zhou [et al.] // *Eur. Spine J.* – 2011. – Vol. 20, N 6. – P. 846–859.
151. Tian, W. Placement of pedicle screws using three-dimensional fluoroscopy-based navigation in lumbar vertebrae with axial rotation / W. Tian, Z. Lang // *Eur. Spine J.* – 2010. – Vol. 19, N 11. – P. 1928–1935.
152. Tian, N.F. Image-guided pedicle screw insertion accuracy: a meta-analysis / N.F. Tian, H.Z. Xu // *Int. Orthop.* – 2009. – Vol. 33, N 4. – P. 895–903.
153. Tormenti, M.J. Intraoperative computed tomography image-guided navigation for posterior thoracolumbar spinal instrumentation in spinal deformity surgery / M.J. Tormenti, D.B. Kostov, P.A. Gardner [et al.] // *Neurosurg. Focus.* – 2010. – Vol. 28, N 3. – P. E11.
154. Ughwanogho, E. Computed tomography-guided navigation of thoracic pedicle screws for adolescent idiopathic scoliosis results in more accurate placement and less screw removal / E. Ughwanogho, N.M. Patel, K.D. Baldwin [et al.] // *Spine.* – 2012. – Vol. 37, N 8. – P. 473–478.
155. Upendra, B.N. Outcome- based classification for assessment of thoracic pedicular screw placement / B.N. Upendra, D. Meena, B. Chowdhury [et al.] // *Spine.* – 2008. – Vol. 33, N 4. – P. 384–390.
156. Vaccaro, A.R. Placement of pedicle screw in the thoracic spine. Part II: Ananatomical and radiographic assessment / A.R. Vaccaro, S.J. Rizzolo, R.A. Balderston // *J. Bone Joint Surg.* – 1995. – Vol. 77-A. – P. 1200–1206.
157. Van de Kelft, E. A prospective multicenter registry on the accuracy of pedicle screw placement in the thoracic, lumbar, and sacral levels with the

- use of the O-arm imaging system and StealthStation Navigation / E. Van de Kelft, F. Costa, D. Van der Planken [et al.] // *Spine*. – 2012. – Vol. 37, N 25. – P. 1580–1587.
158. Vanichkachorn, J.S. Potential large vessel injury during thoracolumbar pedicle screw removal. A case report / J.S. Vanichkachorn, A.R. Vaccaro, M.J. Cohen // *Spine*. – 1997. – Vol. 22. – P. 110–113.
 159. Verma, R. Functional outcome of computer-assisted spinal pedicle screw placement: a systematic review and meta-analysis of 23 studies including 5,992 pedicle screws / R. Verma, S. Krishan, K. Haendlmayer [et al.] // *Eur. Spine J.* – 2010. – Vol. 19, N 3. – P. 370–375.
 160. Wagner, M.R. Aortic abutment after direct vertebral rotation: plowing of pedicle screws / M.R. Wagner, J.B. Flores, I. Sanpera [et al.] // *Spine*. – 2011. – Vol 36, N 3. – P. 243–247.
 161. Wang, V.Y. Free-hand thoracic pedicle screws placed by neurosurgery residents: a CT analysis / V.Y. Wang, C.T. Chin, D.C. Lu [et al.] // *Eur. Spine J.* – 2010. – Vol. 19, N 5. – P. 821–827.
 162. Wang, M. Optimal number and distribution of points selected on the vertebra for surface matching in CT-based spinal navigation / M. Wang, Song Z. // *Computer Aided Surgery*. – 2013. – Vol. 18. – P. 93–100.
 163. Watanabe, K. A novel pedicle channel classification describing osseous anatomy: how many thoracic scoliotic pedicles have cancellous channels? / K. Watanabe, L.G. Lenke, M. Matsumoto [et al.] // *Spine*. – 2010. – Vol. 35, N 20. – P. 1836–1842.
 164. Watanabe, K. Descending aortic injury by a thoracic pedicle screw during posterior reconstructive surgery: a case report / K. Watanabe, A. Yamazaki, T. Hirano [et al.] // *Spine*. – 2010. – Vol. 35, N 20. – P. 1064–1068.
 165. Weng, X. Mechanical analysis and treatment of Harrington—rods broken after initial operation for scoliosis / X. Weng, J.Zhang, G.Oiu [et al.] // *Chin. Med. Sci. J.* – 1997. – Vol.12, N 4. – P. 232–235.

166. White, A.A. Clinical Biomechanics of the Spine / A.A. White, M.M. Panjabi. - Philadelphia : Lippincott, 1990. - 722 p.
167. Wilber, R.G. Postoperative neurological deficits in segmental spinal instrumentation: A study using spinal cord monitoring / R.G. Wilber, G.H. Thompson, J.W. Shaffer // J. Bone Joint Surg. – 1984. – Vol. 66-A. – P. 1178– 1187.
168. Xu, R. Anatomic considerations of pedicle screw placement in the thoracic spine. Roy-Camille technique versus open-lamina technique / R. Xu, N.A. Ebraheim, Y. Ou [et al.] // Spine. – 1998. Vol. 23. - P. 1065-1068.
169. Yilmaz, G. Comparative analysis of hook, hybrid, and pedicle screw instrumentation in the posterior treatment of adolescent idiopathic scoliosis / G. Yilmaz, B. Borkhuu, A.A. Dhawale [et al.] // J. Pediatr. Orthop. – 2012. – Vol. 32, N 5. – P. 490–499.
170. Youkilis, A.S. Stereotactic navigation for placement of pedicle screws in the thoracic spine / A.S. Youkilis, D.J. Quint, J.E. McGillicuddy [et al.] // Neurosurgery. – 2001. – Vol. 48. – P. 771-778.
171. Zindrick, M.R. Analysis of the morphometric characteristics of the thoracic and lumbar pedicles / M.R. Zindrick, L.L. Wiltse, A. Doornik [et al.] // Spine. – 1987. – Vol. 12, N 2. – P.160–166.
172. Zindrick, M.R. Pedicle morphology of the thoracolumbar spine / M.R. Zindrick, G.W. Knight, M.J. Sartori [et al.] // Spine. – 2000. – Vol. 25, N 21. – P. 2726–2735.