

Применение нейронавигационных технологий при тяжелых формах сколиоза у детей

И.П. Пимбурский^{✉1}, А.С. Бутенко¹, К.А. Самохин^{2,3}, О.Б. Челпаченко^{1,4}, К.В. Жердев^{1,5}, С.П. Яцык¹, А.А. Емельянов⁶

¹ФГАУ «Национальный медицинский исследовательский центр здоровья детей» Минздрава России, Москва, Россия;

²ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный медицинский университет» Минздрава России, Оренбург, Россия;

³ГАУЗ «Оренбургский областной клинический центр хирургии и травматологии», Оренбург, Россия;

⁴ГБУЗ г. Москвы «Научно-исследовательский институт неотложной детской хирургии и травматологии»

Департамента здравоохранения г. Москвы, Москва, Россия;

⁵ФГАУ ВО «Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова» Минздрава России (Сеченовский Университет), Москва, Россия;

⁶ФГБОУ ВО «Рязанский государственный медицинский университет им. акад. И.П. Павлова» Минздрава России, Рязань, Россия

Аннотация

Обоснование. Методом выбора хирургической коррекции сколиозов (ХКС) является технология трехмерной полисегментарной фиксации по Cotrel–Dubousset. Ее применение сопряжено с характерными сложностями и рисками, часто связанными с мальпозицией опорных элементов, а также риском осложнений. Частота неврологических осложнений при ХКС может достигать 7%. Высокие риски необратимых осложнений ХКС диктуют необходимость внедрения современных методов обеспечения безопасности, в числе которых 0-агм-навигация и интраоперационный нейромониторинг (ИОНМ).

Цель. Повышение эффективности и безопасности ХКС у детей с применением 0-агм-навигации и ИОНМ.

Материалы и методы. Под наблюдением находились 136 пациентов, прооперированных по поводу сколиоза. Они разделены на 2 группы: в 1-ю группу вошли пациенты, оперированные с применением технологии free-hand (всего проанализировано 609 винтов у 30 обследованных); во 2-ю группу – пациенты, прооперированные с использованием 0-агм-навигации и нейромониторинга (524 винта у 25 больных). Средний угол деформации по Cobb составил $66,9 \pm 28,1^\circ$ в 1-й группе и $82,4 \pm 25,8^\circ$ – во 2-й. Мальпозиции оценены с использованием классификации G. Rao и соавт. (2002 г.), также проведен анализ неврологических осложнений у 69 пациентов в 1-й группе и у 67 – во 2-й.

Результаты. В 1-й группе общая частота мальпозиций составила 27,3% (166 из 609 винтов), во 2-й группе – 10,5% (55 из 524 винтов). В 1-й группе частота мальпозиций 1-й степени составила 3,9% (24 из 609) случаев, 2-й степени – 11,8% (72 из 609), 3-й степени – 11,5% (70 из 609). Во 2-й группе 1-я степень встречалась в 4,2% (22 из 524) случаев, 2-я степень – в 3,4% (18 из 524) и 3-я степень – в 2,9% (15 из 524). Частота медиальных мальпозиций в 1-й группе была 7,6% (46 из 609), во 2-й – 2,7% (14 из 524). Латеральные мальпозиции в 1-й группе составили 11,7% (71 из 609), во 2-й – 4,4% (24 из 524), передние мальпозиции в 1-й группе – 8,05% (49 из 609), во 2-й – 3,2% (17 из 524). В 1-й группе отмечены 3 (4,3%) случая неврологических осложнений, во 2-й – 1 (1,4%).

Заключение. 0-агм-навигация и ИОНМ позволили снизить частоту мальпозиций, также отмечена тенденция снижения числа неврологических осложнений в группе пациентов, где использовали ИОНМ и 0-агм-навигацию.

Ключевые слова: сколиоз, транспедикулярные винты, транспедикулярная фиксация, 0-arm, free-hand, нейромониторинг

Для цитирования: Пимбурский И.П., Бутенко А.С., Самохин К.А., Челпаченко О.Б., Жердев К.В., Яцык С.П., Емельянов А.А. Применение нейронавигационных технологий при тяжелых формах сколиоза у детей. Педиатрия. Consilium Medicum. 2024;2:130–137. DOI: 10.26442/26586630.2024.2.202865

© ООО «КОНСИЛИУМ МЕДИКУМ», 2024 г.

Введение

Тяжелые многоплоскостные деформации позвоночника различной этиологии у детей сопровождаются нарушениями функциональных систем растущего организма, обуславливая раннюю инвалидизацию и сокращение продолжительности жизни пациентов. Консервативное лечение деформаций неэффективно, что определяет необходимость хирургического лечения. Задний инструментальный спондилодез в настоящее время является «золотым стандартом» в лечении сколиоза. Появление инструментария III поколения для заднего спондилодеза, предложенного Y. Cotrel и соавт. [1], позволило совершить значительный

прорыв в лечении сколиоза. Во многих работах сравнивали крючковые системы с транспедикулярными системами (ТПС), большинство исследований пришло к выводу о том, что транспедикулярная фиксация (ТПФ) является методом выбора, преимущество которого заключается в том, что он позволяет добиться лучшего корригирующего эффекта и более стабильной фиксации [2–6].

Несмотря на преимущества использования ТПФ, существует риск сосудистых и неврологических осложнений, связанных с мальпозицией винтов. Неврологические осложнения являются самыми тяжелыми в хирургии позвоночника. Их общая частота при хирургической коррекции

Информация об авторах / Information about the authors

✉ **Пимбурский Иван Петрович** – врач – детский хирург, аспирант ФГАУ «НМИЦ здоровья детей». E-mail: bdfyltvlbjd@yandex.ru

Бутенко Андрей Сергеевич – врач – травматолог-ортопед нейроортопедического отделения с ортопедией ФГАУ «НМИЦ здоровья детей». E-mail: butenko.as@nczd.ru

Самохин Константин Александрович – ассистент каф. травматологии и ортопедии ФГБОУ ВО ОрГМУ, врач – травматолог-ортопед отделения плановой травматологии ГАУЗ ООКЦХТ. E-mail: ksamohin25@mail.ru

Челпаченко Олег Борисович – д-р мед. наук, врач – травматолог-ортопед консультативно-диагностического отделения ГБУЗ НИИ НДХИТ, проф. каф. детской хирургии с курсом анестезиологии и реанимации, гл. науч. сотр. лаб. научных основ нейроортопедии и ортопедии, врач – травматолог-ортопед нейроортопедического отделения с ортопедией Научно-исследовательского института детской хирургии ФГАУ «НМИЦ здоровья детей». E-mail: Chelpachenko81@mail.ru

✉ **Ivan P. Pimburskiy** – pediatric surgeon, National Medical Research Center for Children's Health. E-mail: bdfyltvlbjd@yandex.ru; ORCID: 0009-0002-5274-3941

Andrey S. Butenko – traumatologist-orthopedic, National Medical Research Center for Children's Health. E-mail: butenko.as@nczd.ru; ORCID: 0000-0002-7542-8218

Konstantin A. Samokhin – Assistant, Orenburg State Medical University, Orenburg Regional Clinical Center of Surgery and Traumatology. E-mail: ksamohin25@mail.ru; ORCID: 0009-0002-4292-8782

Oleg B. Chelpachenko – D. Sci. (Med.), Research Institute of Emergency Pediatric Surgery and Traumatology, National Medical Research Center for Children's Health. E-mail: Chelpachenko81@mail.ru; ORCID: 0000-0002-0333-3105

Use of neuronavigation technologies for severe forms of scoliosis in children

Ivan P. Pimburskiy¹, Andrey S. Butenko¹, Konstantin A. Samokhin^{2,3}, Oleg B. Chelpachenko^{1,4}, Konstantin V. Zherdev^{1,5}, Sergey P. Yatsyk¹, Andrey A. Emelyanov⁶

¹National Medical Research Center for Children's Health, Moscow, Russia;

²Orenburg State Medical University, Orenburg, Russia;

³Orenburg Regional Clinical Center of Surgery and Traumatology, Orenburg, Russia;

⁴Research Institute of Children's Traumatology and Surgery, Moscow, Russia;

⁵Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University), Moscow, Russia;

⁶Pavlov Ryazan State Medical University, Ryazan, Russia

Abstract

Background. The method of choice for surgical correction of scoliosis is the technology of three-dimensional polysegmental fixation according to Cotrel–Dubousset. Its use is associated with inherent difficulties and risks, often associated with malposition of supporting elements, as well as the risk of complications. The incidence of neurological complications during surgical correction of scoliosis can reach 7%. High risks, including irreversible complications, of surgical correction of scoliosis dictate the need to introduce modern safety methods, including O-arm navigation and intraoperative neuromonitoring (IONM).

Aim. Increasing the effectiveness and safety of surgical correction of scoliosis in children using O-arm navigation and IONM.

Materials and methods. 136 patients operated on for scoliosis were observed. The patients were divided into 2 groups: group 1 included patients operated on using the "free-hand" technology (a total of 609 screws were analyzed in 30 patients); group 2 included patients operated on using O-arm navigation and IONM (524 screws in 25 patients). The average Cobb angle of deformation was $66.9 \pm 28.1^\circ$ in group 1 and $82.4 \pm 25.8^\circ$ in group 2. Malpositions were assessed using the classification of G. Rao et al. (2002), and an analysis of neurological complications was also carried out in 69 patients in group 1, and in 67 patients in group 2.

Results. In group 1, the overall incidence of malpositions was 27.3% (166 out of 609 screws). In group 2, it was 10.5% (55 out of 524 screws). In group 1, the frequency of grade 1 malpositions was 3.9% (24 out of 609), grade 2 – 11.8% (72 out of 609), grade 3 – 11.5% (70 out of 609). In 2: grade 1 occurred in 4.2% of cases (22 out of 524), grade 2 – 3.4% (18 out of 524), and grade 3 – 2.9% (15 out of 524). The frequency of medial malpositions in the first group was 7.6% (46 out of 609), in the second group – 2.7% (14 out of 524). Lateral malpositions in the group 1 were 11.7% (71 out of 609), in the group 2 – 4.4% (24 out of 524). Anterior malpositions in group 1 – 8.05% (49 out of 609), in group 2 – 3.2% (17 out of 524). In group 1 there were 3 cases of neurological complications – 4.3%, in group 2 – in 1 case – 1.4%.

Conclusion. O-arm navigation and IONM made it possible to reduce the frequency of malpositions, and there was also a tendency to reduce the number of neurological complications in the group of patients where IONM and O-arm navigation were used.

Keywords: scoliosis, pedicle screw, posterior spinal fusion, O-arm, free-hand, neuromonitoring

For citation: Pimburskiy IP, Butenko AS, Samokhin KA, Chelpachenko OB, Zherdev KV, Yatsyk SP, Emelyanov AA. Use of neuronavigation technologies for severe forms of scoliosis in children. *Pediatrics. Consilium Medicum.* 2024;2:130–137. DOI: 10.26442/26586630.2024.2.202865

идиопатического сколиоза, по данным литературы, колеблется от менее чем 1 до 1,87% [7], однако эти данные не включают сколиозы нейрогенной этиологии, при которых отмечается более высокий уровень неврологических осложнений – 3,1–7,4% [8]. По данным Y. Shi и соавт. (2007 г.), при деформациях более 80° по Cobb частота неврологических осложнений может достигать 7% [9]. Неврологический дефицит, связанный с мальпозицией, может возникнуть в результате непосредственного повреждения нервных корешков или спинного мозга имплантатами, а также вследствие развития эпидуральной гематомы [10, 11]. M. Diab и соавт. (2007 г.) сообщили о 0,69% случаев неврологических осложнений, причем осложнения, связанные непосредственно с мальпозицией, встречались с частотой примерно 0,15%, что составило 22,2% в структуре неврологических осложнений [7].

Повреждение аорты – крайне редкое, но опасное осложнение, чаще встречающееся в грудном отделе позвоночника (ГОП) из-за анатомических особенностей топографии

органов грудной клетки при сколиозе [12]. К таким осложнениям относят перфорацию с развитием кровотечения, образование гематом, эрозию стенки или формирование псевдоаневризм [13, 14]. Обычно осложнения, связанные с повреждением аорты, проявляются в момент травмы, но довольно часто могут иметь отсроченный характер и обнаруживаться через годы или быть случайной находкой [15]. Повреждения магистральных сосудов при ТПФ встречаются с частотой 0,01%, повреждения аорты еще реже, тогда как летальность при этом составляет 15–65% [16]. Тактика может варьировать от динамического наблюдения до открытых ревизионных или эндоваскулярных вмешательств [17].

Частота мальпозиции при хирургическом лечении сколиоза варьирует от 3,2 до 65,0% [10, 18] при использовании технологии free-hand по L. Lenke. По данным исследований, в 1 случае из 300 при мальпозиции требуется ревизия и перепроведение винта [19–22]. Среди хирургов имеется значительное расхождение во мнениях относительно того,

Информация об авторах / Information about the authors

Жердев Константин Владимирович – д-р мед. наук, гл. науч. сотр., зав. нейроортопедическим отд-нием с ортопедией ФГАУ «НМИЦ здоровья детей», проф. каф. детской хирургии и урологии-андрологии им. проф. Л.П. Александрова ФГАУ ВО «Первый МГМУ им. И.М. Сеченова» (Сеченовский Университет). E-mail: drzherdev@mail.ru

Яцык Сергей Павлович – чл.-кор. РАН, д-р мед. наук, проф., рук. Института детской хирургии ФГАУ «НМИЦ здоровья детей». E-mail: macadamia@yandex.ru

Емельянов Андрей Алексеевич – студент IV курса ФГБОУ ВО РязГМУ. E-mail: a_em@ro.ru

Konstantin V. Zherdev – D. Sci. (Med.), National Medical Research Center for Children's Health, Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University). E-mail: drzherdev@mail.ru; ORCID: 0000-0003-3698-6011

Sergey P. Yatsyk – D. Sci. (Med.), Prof., Corr. Memb. RAS, National Medical Research Center for Children's Health. E-mail: macadamia@yandex.ru; ORCID: 0000-0001-6966-1040

Andrey A. Emelyanov – Student, Pavlov Ryazan State Medical University. E-mail: a_em@ro.ru; ORCID: 0009-0008-0084-1930

какую степень мальпозиции можно считать безопасной и можно ею пренебречь при отсутствии клинических проявлений, а какая требует ревизии и перепроведения винта [23]. В целом четких критериев необходимости ревизии не разработано.

Относительно высокая частота мальпозиции и связанных с этим осложнений требуют разработки новых методов контроля безопасности имплантации винтов. Недавно появившийся подкласс рентгеновских систем – мобильных интраоперационных конусно-лучевых компьютерных томографов – позволяет оптимизировать многие аспекты лечебно-диагностического процесса. Особенности данных систем являются возможностью быстрого интраоперационного получения трехмерного изображения анатомии пациента (не более 40 с), мобильность (благодаря роботизированной системе перемещения аппарата) и низкая лучевая нагрузка на оператора. Одна из таких мобильных систем – это навигационная система, совмещенная с O-arm, состоящая из подвижной платформы, программного обеспечения, хирургических инструментов и калибровочной системы. O-arm-навигация позволяет в режиме реального времени в 3 плоскостях оценивать ход проведения винтов, чего не обеспечивает обычная флюороскопическая картина.

Несмотря на преимущества применения, данная технология имеет свои ограничения. M. Oertel с соавт. (2011 г.) обнаружили погрешность $2,8 \pm 1,9^\circ$ между виртуальным изображением и реальным положением винта во время операции. Это может быть вызвано неправильной фиксацией рабочего инструмента к имплантату. Другой причиной может быть нестабильная фиксация навигационной рамки к остистому отростку позвонка или гребню подвздошной кости, что приводит к его смещению во время выполнения операционного действия [24].

Интраоперационная компьютерная томография (КТ) в сочетании с навигационной системой, по данным большинства исследований, позволяет повысить точность установки ТПС. В среднем при использовании O-arm-навигации мальпозиция встречается в 7,7% случаев [25–28]. Однако существуют данные об отсутствии значимой разницы при использовании указанной технологии. Так, H. Kudo и соавт. (2021 г.) сообщили о результатах исследования положения 553 винтов у 31 пациента, прооперированного по поводу сколиоза. В группе, где использовалась O-arm-навигация, авторы получили результат в 6,5% мальпозиций, в группе с только флюороскопическим контролем – 6,3%. Авторы пришли к выводу о том, что нет значимой разницы в используемом типе навигации, однако отметили, что при применении флюороскопии несколько выше процент значимых мальпозиций (>4 мм) – 2,5% против 0,7% при применении O-arm-навигации. В исследовании также сообщается о 2-кратном увеличении времени операции и объема кровотечения при применении O-arm-навигации [29].

Таким образом, высокие риски осложнений при хирургическом лечении сколиозов, а также существующие противоречивые данные об эффективности применения навигационных технологий актуализируют необходимость повышения эффективности и безопасности хирургической коррекции сколиозов (ХКС).

Цель исследования – повышение эффективности и безопасности ХКС у детей с применением O-arm-навигации и интраоперационного нейромониторинга (ИОНМ).

Материалы и методы

Исследование проводили в нейроортопедическом отделении с ортопедией НИИ детской хирургии ФГАУ «НМИЦ здоровья детей». Под наблюдением находились 136 пациентов с деформациями ГОП и поясничного отдела позвоночника (2013–2024 гг.). В основу работы положен анализ частоты неврологических осложнений и положения транспедикулярных винтов (ТПВ) после оперативного вмешательства по данным КТ.

Все 136 пациентов разделены на 2 группы, в исследуемую 1-ю группу включены 69 пациентов, оперированных с применением технологии free-hand, в исследуемую 2-ю группу вошли 67 пациентов, прооперированных с использованием O-arm-навигации. Для оценки частоты мальпозиций были доступны послеоперационные КТ-исследования у 30 (609 винтов) пациентов из 1-й группы и 25 (524 винтов) – из 2-й. В исследуемых группах проводили анализ частоты и структуры неврологических осложнений. Пациенты исследуемых групп репрезентативны по полу, возрасту. Средний возраст больных был $13,1 \pm 4,61$ года. Средний угол по Cobb составил $66,9 \pm 28,1^\circ$ в 1-й группе и $82,4 \pm 25,8^\circ$ – во 2-й. Среднее количество уровней инструментации составило в 1-й группе $9,9 \pm 3,8$, во 2-й – $9,5 \pm 2,4$.

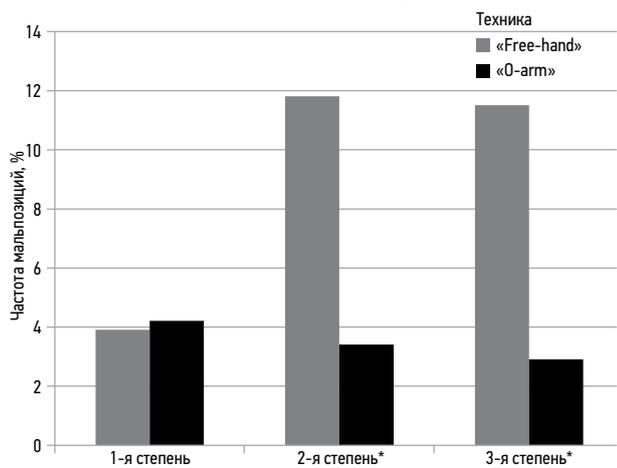
В 1-й группе пациентов, оперированных по технологии free-hand по L. Lenke, хирургический доступ при ТПФ выполняли поднадкостнично, до вершины поперечных отростков, при этом осуществляли фасетэктомию на всем протяжении зоны инструментации. Для установки винта шилом перфорировали кортикальную пластинку в проекции корня дуги позвонка, проводили формирование педикулярного канала, что сопровождалось инструментальной пальпацией стенок и дна «филлером». Определяли длину хода винта, метчиком проводили нарезку резьбы под винт, после чего винт устанавливали в сформированный педикулярный канал. Подтверждение корректности положения ТПВ интраоперационно оценивали при помощи флюороскопического метода.

Во 2-й группе больных, оперированных с помощью O-arm-навигации, интраоперационно, после проведения хирургического доступа перед установкой опорных элементов производили установку референсной рамки на целевую область (каркас рамки может крепиться к остистым отросткам позвонков или гребню подвздошной кости). Далее выполняли сканирование целевой области. Навигационная система, используя технологию motion capture, выполняла распознавание положения навигируемых инструментов в пространстве. На экран выводились КТ-сканы в различных плоскостях. С помощью навигируемых инструментов производили определение точки входа, подготовку канала с помощью навигируемого пробойника и навигируемой отвертки. Навигация в реальном времени позволяла отслеживать положение инструмента и ТПВ.

Мальпозиции на КТ-изображениях оценены с использованием классификации, первоначально описанной S. Gertzbein и соавт. [30] в модификации G. Rao и соавт. [31] (0-я степень: нет нарушения; 1-я степень: перфорация <2 мм; 2-я степень: 2–4 мм; 3-я степень: перфорация >4 мм). Мальпозиции разделены на 3 группы: передние (ПМ), медиальные (ММ) и латеральные (ЛМ). ПМ считались мальпозициями при перфорации винтами переднего кортикального слоя позвонка, ММ – в случае повреждения кортикального слоя ножки дуги позвонка с медиальной стороны

Рис. 1. Распределение частоты мальпозиций по степеням, %.

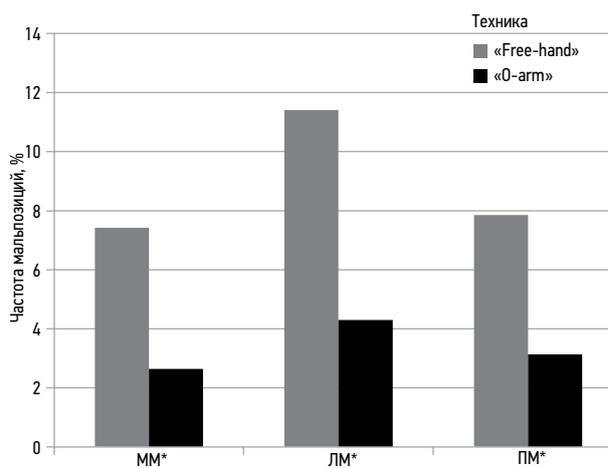
Fig. 1. Distribution of malposition frequency by grade, %.



Примечание. Здесь и далее на рис. 2: * $p < 0,05$.

Рис. 2. Распределение частоты мальпозиций по локализации, %.

Fig. 2. Distribution of malposition frequency by location, %.



с выстоянием винта в позвоночный канал, ЛМ – при перфорации кортикального слоя ножки в латеральном направлении. Мальпозиции 2 и 3-й степени считались критическими, т.е. с высоким риском осложнений.

Результаты

Анализ послеоперационных КТ-изображений выявил статистически значимые различия в исследуемых группах. На рис. 1, 2 и табл. 1 представлены данные распределения частоты мальпозиций всех степеней по группам исследования. В 1-й группе (free-hand-техника установки ТПВ) общая частота мальпозиций составила 27,3% (166 из 609 винтов). Во 2-й группе (имплантация винтов под контролем ИОНМ и O-arm-навигации) – 10,5% (55 из 524 винтов). В 1-й группе частота мальпозиций 1-й степени составила 3,9% (24 из 609), 2-й степени – 11,8% (72 из 609), 3-й степени – 11,5% (70 из 609). Во 2-й группе: 1-я степень встречалась в 4,2% (22 из 524) случаев, 2-я степень – в 3,4% (18 из 524) и 3-я степень – в 2,9% (15 из 524). Частота ММ в 1-й исследуемой группе – 7,6% (46 из 609), во 2-й – 2,7% (14 из 524). Частота встречаемости ЛМ в 1-й группе составила 11,7% (71 из 609), во 2-й – 4,4% (24 из 524). Число ПМ по исследуемым группам: в 1-й группе – 8,05% (49 из 609), во 2-й – 3,2% (17 из 524).

В табл. 2 представлены подробные данные частоты встречаемости критических мальпозиций, к которым были отнесены мальпозиции 2 и 3-й степени по Rao в 1-й исследуемой группе и их распределение по уровням локализации. По нашим данным, чаще всего наличие мальпозиций в 1-й группе отмечено на уровнях: Th_{III} – с частотой 43,6%, Th_{IV} – 42,9%, Th_V – 33,3%, Th_{IX} – 44,4% и Th_X – 52,4%.

В табл. 3 представлены данные о частоте распределения критических мальпозиций (2 и 3-й степени по Rao) по локализации во 2-й группе пациентов. Наибольшая частота мальпозиций в этой группе исследования отмечена на уровнях позвонков Th_{III} с частотой 11,1%, Th_{IV} – 11,9%, Th_V – 9,5%, Th_{IX} – 8,3%, Th_X – 11,1%, Th_{XII} – 7,7%, L_I – 8,8%. На рис. 3 представлен сравнительный анализ общей частоты встречаемости мальпозиций на уровнях позвоночника, красным цветом отмечены уровни, где были выявлены достоверные различия в исследуемых группах. Наибольшая частота мальпозиций винтов отмечена на уровне позвонков Th_{III}–Th_V и на вершине сколиотической деформации.

Таблица 1. Распределение мальпозиций, абс. (%)

Table 1. Distribution of malpositions, abs. (%)

Метод	Общая частота мальпозиций	Степень			ММ	ЛМ	ПМ
		1-я	2-я	3-я			
Free-hand	166 (27,3)	24 (3,9)	72 (11,8)	70 (11,5)	46 (7,6)	71 (11,7)	49 (8,05)
O-arm	55 (10,5)	22 (4,2)	18 (3,4)	15 (2,9)	14 (2,7)	24 (4,4)	17 (3,2)

Таблица 2. Распределение частоты критических мальпозиций (2 и 3-й степени по Rao) ТПВ, установленных с применением free-hand-техники

Table 2. Distribution of the frequency of critical malpositions (Rao grades 2 and 3) of the pedicle screw installed using the free-hand technique

Уровень	Всего винтов	Мальпозиция						Общее число	
		ММ		ЛМ		ПМ		абс.	%
		абс.	%	абс.	%	абс.	%		
Th _{II}	1	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Th _{III}	39	4	10,26	9	23,08	4	10,26	17	43,59
Th _{IV}	42	2	4,76	10	23,81	6	14,29	18	42,86
Th _V	36	0	0,00	9	25,00	3	8,33	12	33,33
Th _{VI}	24	4	16,67	2	8,33	1	4,17	7	29,17
Th _{VII}	24	2	8,33	3	12,50	1	4,17	6	25,00
Th _{VIII}	17	2	11,76	2	11,76	1	5,88	5	29,41
Th _{IX}	18	3	16,67	2	11,11	3	16,67	8	44,44
Th _X	21	3	14,29	3	14,29	5	23,81	11	52,38
Th _{XI}	44	4	9,09	5	11,36	7	15,91	16	36,36
Th _{XII}	64	4	6,25	9	14,06	4	6,25	17	26,56
L _I	68	3	4,41	2	2,94	2	2,94	7	10,29
L _{II}	59	3	5,08	2	3,39	1	1,69	6	10,17
L _{III}	65	5	7,69	1	1,54	2	3,08	8	12,31
L _{IV}	57	2	3,51	1	1,75	0	0,00	3	5,26
L _V	30	1	3,33	0	0,00	0	0,00	1	3,33
Всего	609	42	6,90	60	9,85	40	6,57	142	23,32

Таблица 3. Распределение частоты критических мальпозиций (2 и 3-й степени по Rao) винтов, установленных с использованием O-arm-навигации
Table 3. Distribution of the frequency of critical malpositions (grades 2 and 3 according to Rao) of screws installed using O-arm navigation

Уровень	Всего винтов	Мальпозиция							
		ММ		ЛМ		ПМ		Общее число	
		абс.	%	абс.	%	абс.	%	абс.	%
Th _{II}	6	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Th _{III}	18	0	0,0	1	5,56	1	5,56	2	11,11
Th _{IV}	42	0	0,0	3	7,14	2	4,76	5	11,90
Th _V	42	1	2,38	2	4,76	1	2,38	4	9,52
Th _{VI}	46	0	0,0	2	4,35	1	2,17	3	6,52
Th _{VII}	34	0	0,0	1	2,94	0	0,0	1	2,94
Th _{VIII}	12	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Th _{IX}	12	0	0,0	0	0,0	1	8,33	1	8,33
Th _X	18	1	5,56	0	0,0	1	5,56	2	11,11
Th _{XI}	22	0	0,0	0	0,0	1	4,55	1	4,55
Th _{XII}	26	1	3,85	0	0,0	1	3,85	2	7,69
L _I	34	1	2,94	1	2,94	1	2,94	3	8,82
L _{II}	56	2	3,57	1	1,79	0	0,0	3	5,36
L _{III}	60	0	0,0	2	3,33	0	0,0	2	3,33
L _{IV}	56	1	1,79	0	0,0	1	1,79	2	3,57
L _V	40	2	5,00	0	0,0	0	0,0	2	5,00
Всего	524	9	1,53	13	2,47	11	2,10	33	6,30

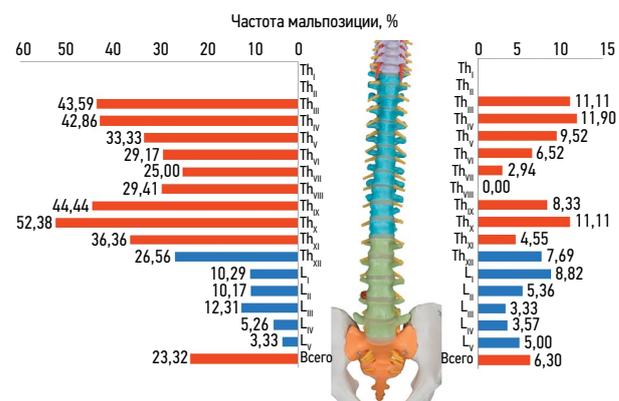
Нами проведен анализ неврологических осложнений в послеоперационный период у 69 пациентов, у которых применяли free-hand-технику имплантации винтов (1-я группа), и у 67 пациентов, у которых использовали O-arm-навигацию и ИОНМ (2-я группа). В 1-й группе отмечены 3 эпизода неврологических осложнений – 4,3%: только в 1 случае по причине ММ-винта, в остальных 2 случаях – в результате тракционной миелопатии. Во 2-й группе только в 1 (1,4%) случае сформировался неврологический дефицит – в результате интраоперационного острого нарушения спинномозгового кровообращения. Необходимо отметить, что интраоперационно во 2-й группе отмечено 2 эпизода снижения амплитуды моторно-вызванных потенциалов от мышц нижних конечностей по данным ИОНМ на этапе проведения корректирующего маневра, принято решение о снижении степени ХКС, после чего ответ полностью восстановился, в послеоперационном периоде неврологический дефицит не развился.

Обсуждение

Мальпозиции 2 или 3-й степени считались критическими, поскольку потенциально могут привести к осложнениям, связанным с повреждением нервных и иных структур.

Самая высокая частота критических ЛМ в 1-й группе наблюдалась на уровнях Th_{III} – 23,1%, Th_{IV} – 23,8%, Th_V – 25%.

Рис. 3. Распределение частоты мальпозиции по локализации.
Fig. 3. Distribution of malposition frequency by location.



Примечание. Уровень статистической значимости различий между группами исследования по критерию χ^2 :

Уро-вень	Крите-рий χ^2	Значи-мость	p	Уро-вень	Крите-рий χ^2	Значи-мость	p
Th _{II}	5,846	0,016	<0,05	Th _{XI}	7,765	0,006	<0,05
Th _{IV}	10,118	0,002	<0,05	Th _{XII}	3,953	0,047	<0,05
Th _V	6,740	0,010	<0,05	L _I	0,055	0,814	>0,05
Th _{VI}	6,605	0,011	<0,05	L _{II}	3,011	0,083	>0,05
Th _{VII}	6,451	0,012	<0,05	L _{III}	3,414	0,065	>0,05
Th _{VIII}	4,265	0,039	<0,05	L _{IV}	0,158	0,691	>0,05
Th _X	4,471	0,035	<0,05	L _V	0,116	0,734	>0,05
Th _X	7,429	0,007	<0,05	Всего	62,467	<0,001	<0,001

Этот феномен возник из-за использования экстрапедикулярной техники имплантации винтов в этой области из-за высокой частоты дистрофии ножек дуг позвонков. Во 2-й группе прослеживается аналогичная тенденция с высокой частотой ЛМ на уровнях Th_{III} (5,6%), Th_{IV} (7,1%), Th_V (4,8%), также отмечается снижение частоты мальпозиций по сравнению с 1-й группой.

На основании представленных данных нами выявлено, что наибольшая частота мальпозиций отмечена на уровне Th_{III}–Th_V позвонков и на вершине сколиотической деформации. Таким образом, сделан вывод о том, что O-arm-навигация позволяет достоверно снизить риск мальпозиции опорных элементов на вышеуказанных уровнях.

Большинство ЛМ в ГОП считаются некритическими, поскольку они прикрыты реберно-позвоночными суставами. В поясничном отделе позвоночника ЛМ являются относительно безопасными.

В 1-й группе наибольшая частота мальпозиций встречалась на уровнях Th_{IX} и Th_X, а во 2-й – на уровнях Th_{IX}, Th_X, Th_{XII}, L_I что, по-видимому, связано с самым частым нахождением вершины деформации у обследованных пациентов на этих уровнях.

ПМ в ГОП >4 мм считали критическими, поскольку V. Sarwahi и соавт. (2017 г.) в исследовании сообщил, что передние или переднебоковые перфорации <4 мм не представляют существенного риска повреждения окружающих структур [32]. Потенциальному повреждению в ГОП подвержены пищевод, аорта и паренхима легких [5, 33]. Примеры мальпозиций, которые могут свидетельствовать о потенциальном повреждении указанных структур, проиллюстрированы на рис. 4, 5, 7, 8.

Рис. 4. ПМ 2-й степени слева в ГОП.

Fig. 4. Anterior malposition (AMP) of the grade 2 on the left in the thoracic spine (TS).

**Рис. 6. ММ 3-й степени справа в ГОП.**

Fig. 6. Medial malposition of the grade 3 on the right in the TS.

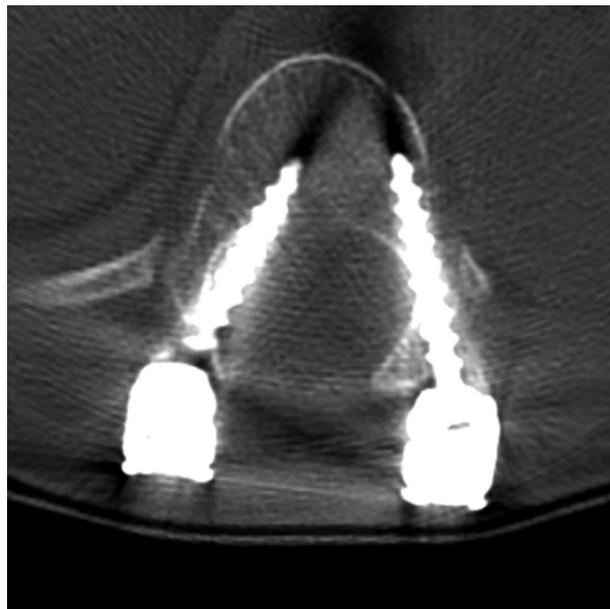
**Рис. 5. Переднелатеральная мальпозиция 3-й степени справа в ГОП.**

Fig. 5. Anterolateral malposition of the grade 3 on the right in the TS.

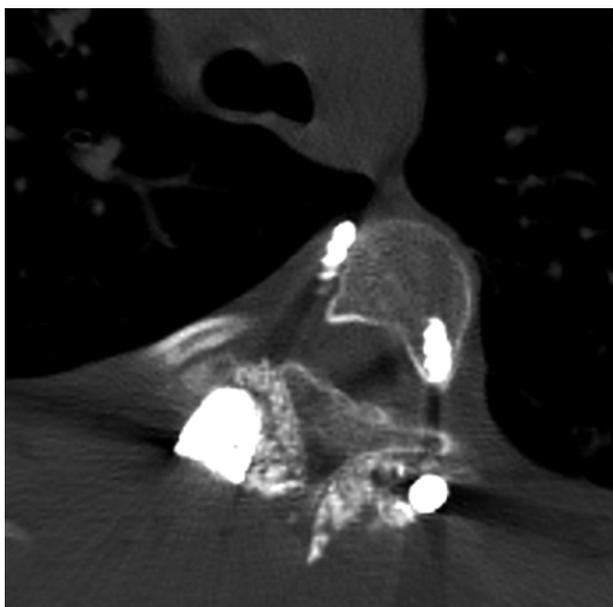
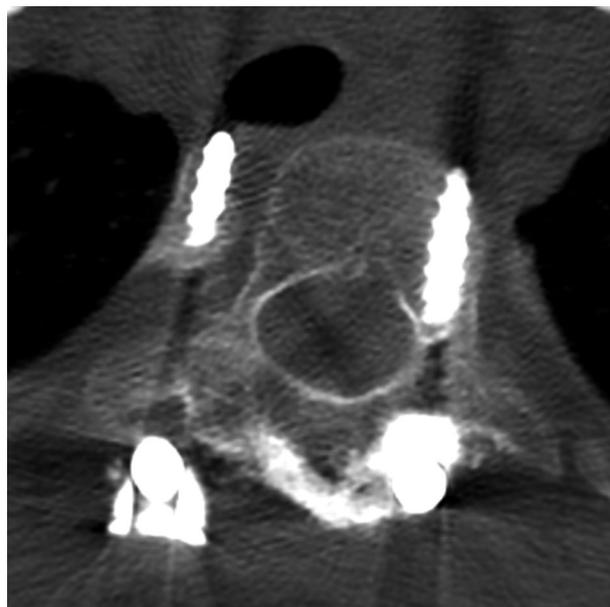
**Рис. 7. Пример критической переднелатеральной мальпозиции 3-й степени на уровне позвонка Th_v.**

Fig. 7. Example of critical grade 3 anterolateral malposition at the Th_v vertebra level.



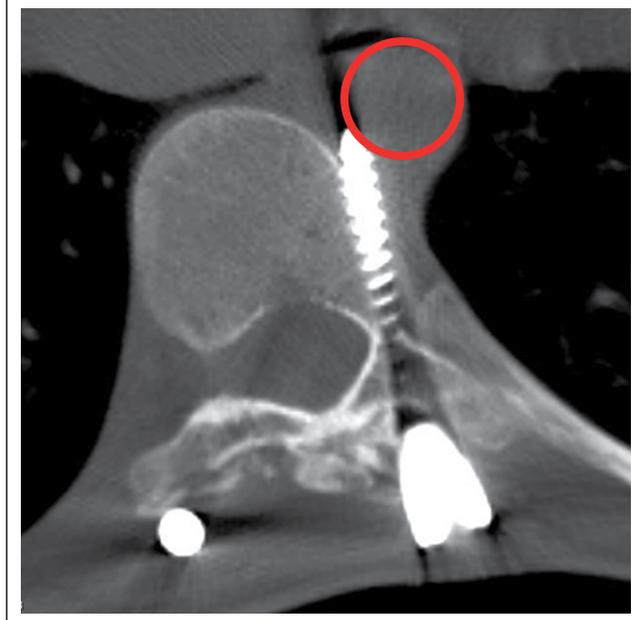
Н. Jiang и соавт. (2012 г.) провели анализ взаиморасположения аорты с телом позвонка при сколиозе на различных уровнях и сообщили, что наибольший риск повреждения аорты был на уровне позвонков Th_v и Th_x [34]. J. Liu и соавт. (2012 г.) в своем исследовании пришли к выводу, что наибольший риск повреждения аорты соответствует уровням позвонков Th_v и Th_x [35]. Это согласуется с нашими данными, где критическая ПМ с прилеганием к аорте зафиксирована на уровне позвонка Th_x (рис. 8). Примеры критических мальпозиций винтов продемонстрированы на рис. 4–8.

Согласно литературным источникам, ММ может не приводить к неврологическим осложнениям, если она

соответствует safe zone (мальпозиция ≤4 мм) по выпуклой стороне деформации. Данное правило может быть применимо в ГОП, где 2 мм приходится на эпидуральное пространство, 2 мм – на субарахноидальное. Есть также сведения о том, что стеноз позвоночного канала до 50% может не приводить к неврологическим осложнениям, но подобное положение считается недопустимым, требующим ревизионного вмешательства [36]. По нашим данным, ММ чаще встречаются на вершине деформации – на уровнях Th_{viii}–Th_x в 1-й группе, на уровнях Th_x и Th_{xii} – во 2-й группе. На рис. 6 представлен пример критической ММ с выстоянием винта в позвоночный канал.

Рис. 8. ПМ 3-й степени справа на уровне Th_x в непосредственной близости от аорты.

Fig. 8. Grade 3 AMP on the right at Th_x level close to the aorta.



Таким образом, общая частота мальпозиций составила 27,3% (166 из 609 винтов) в 1-й группе и 10,5% (55 из 524 винтов) – во 2-й, частота критических мальпозиций 2 и 3-й степени – 23,3% в 1-й группе и 6,3% – во 2-й.

В проведенном исследовании были некоторые ограничения и пробелы. Не всем больным, оперированным по поводу сколиоза в нашем центре, проведена КТ в послеоперационном периоде, и поэтому данные пациенты не включены в исследование. Анализ факторов, связанных с повышенным риском мальпозиции, остался за рамками текущего исследования. Техническая сложность имплантации ТПВ зависит от морфометрии ножек дуги позвонка, ротации и торсии позвонков и других факторов, которые необходимо проанализировать в будущем, чтобы выявить факторы риска мальпозиции.

Заключение

Применение современных технологий визуализации (O-arm), навигации и ИОНМ позволяет существенно повысить точность позиционирования опорных элементов металлоконструкции, что способствует снижению частоты неврологических и иных осложнений в хирургии деформации позвоночника у детей. Это, в свою очередь, повышает стабильность спондилосинтеза и создает благоприятные условия для формирования спондилодеза. Таким образом, применение нейронавигационных технологий способствует повышению эффективности и безопасности ХКС у детей.

Раскрытие интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Disclosure of interest. The authors declare that they have no competing interests.

Вклад авторов. Авторы декларируют соответствие своего авторства международным критериям ICMJE. Все авторы в равной степени участвовали в подготовке публикации: разработка концепции статьи, получение и анализ

фактических данных, написание и редактирование текста статьи, проверка и утверждение текста статьи.

Authors' contribution. The authors declare the compliance of their authorship according to the international ICMJE criteria. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

Информированное согласие на публикацию. Авторы получили письменное согласие законных представителей пациентов на анализ и публикацию медицинских данных и фотографий.

Consent for publication. The authors obtained the written consent of the patients' legal representatives for the analysis and publication of medical data and photographs.

Источник финансирования. Авторы декларируют отсутствие внешнего финансирования для проведения исследования и публикации статьи.

Funding source. The authors declare that there is no external funding for the exploration and analysis work.

Соответствие принципам этики. Протокол исследования был одобрен локальным этическим комитетом ФГАУ «НМИЦ здоровья детей» (протокол №9 от 28.09.2023). Одобрение и процедуру проведения протокола получали по принципам Хельсинкской декларации.

Compliance with the principles of ethics. The study was approved by the local ethics committee of National Medical Research Center for Children's Health (protocol №9 dated 28.09.2023). The approval and procedure for the protocol were obtained in accordance with the principles of the Declaration of Helsinki.

Литература/References

- Cotrel Y, Dubouset J, Guillaumat M. New universal instrumentation in spinal surgery. *Clin Orthop Relat Res.* 1988;227:10-23. PMID:3338200
- Kwan MK, Chiu CK, Gani SMA, Wei CCY. Accuracy and Safety of Pedicle Screw Placement in Adolescent Idiopathic Scoliosis Patients: A Review of 2020 Screws Using Computed Tomography Assessment. *Spine (Phila Pa 1976).* 2017;42(5):326-35. DOI:10.1097/BRS.0000000000001738
- Lenke LG, Kuklo TR, Ondra S, Polly DW Jr. Rationale behind the current state-of-the-art treatment of scoliosis (in the pedicle screw era). *Spine (Phila Pa 1976).* 2008;33(10):1051-4. DOI:10.1097/BRS.0b013e31816f2865
- Suk SI, Lee SM, Chung ER, et al. Selective thoracic fusion with segmental pedicle screw fixation in the treatment of thoracic idiopathic scoliosis: More than 5-year follow-up. *Spine (Phila Pa 1976).* 2005;30(14):1602-9. DOI:10.1097/01.brs.0000169452.50705.61
- Suk SI, Kim JH, Kim SS, Lim DJ. Pedicle screw instrumentation in adolescent idiopathic scoliosis (AIS). *Eur Spine J.* 2012;21(1):13-22. DOI:10.1007/s00586-011-1986-0
- Liljenqvist UR, Halm HF, Link TM. Pedicle screw instrumentation of the thoracic spine in idiopathic scoliosis. *Spine (Phila Pa 1976).* 1997;22(19):2239-45. DOI:10.1097/00007632-199710010-00008
- Diab M, Smith AR, Kuklo TR; Spinal Deformity Study Group. Neural complications in the surgical treatment of adolescent idiopathic scoliosis. *Spine (Phila Pa 1976).* 2007;32(24):2759-63. DOI:10.1097/BRS.0b013e31815a5970
- Удалова И.Г., Михайловский М.В. Неврологические осложнения в хирургии сколиоза. *Хирургия позвоночника.* 2013;(3):038-43 [Udalova IG, Mikhailovsky MV. Neurological complications in scoliosis surgery. *Russian Journal of Spine Surgery (Khirurgiya Pozvonochnika).* 2013;(3):038-43 (in Russian)]. DOI:10.14531/ss2013.3.38-43
- Shi YM, Hou SX, Li L, et al. Prevention and management of the neurological complications during the treatment of severe scoliosis. *Zhonghua Wai Ke Za Zhi.* 2007;45(8):517-9. PMID:17686320 (in Chinese).

10. Suk SI, Kim WJ, Lee SM, et al. Thoracic pedicle screw fixation in spinal deformities: are they really safe? *Spine (Phila Pa 1976)*. 2001;26(18):2049-57. DOI:10.1097/00007632-200109150-00022
11. Hicks JM, Singla A, Shen FH, Arlet V. Complications of pedicle screw fixation in scoliosis surgery: A systematic review. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2010;35(11):E465-70. DOI:10.1097/BRS.0b013e3181d1021a
12. Аганесов А.Г., Алексанян М.М., Абугов С.А., Марданян Г.В. Тактика лечения потенциальных и истинных повреждений грудного отдела аорты транспедикулярными винтами при отсутствии острого кровотечения: анализ малой клинической серии и данных литературы. *Хирургия позвоночника*. 2022;19(4):46-51 [Aganesov AG, Aleksanyan MM, Abugov SA, Mardanyan GV. Tactics for the treatment of potential and true thoracic aorta injuries by pedicle screws in the absence of acute bleeding: Analysis of a small clinical series and literature data. *Hir Pozvonoc*. 2022;19(4):46-51 (in Russian)]. DOI:10.14531/ss2022.4.46-51
13. Blocher M, Mayer M, Resch H, Ortmaier R. Leriche-like syndrome as a delayed complication following posterior instrumentation of a traumatic L1 fracture: A case report and literature review. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2015;40(22):E1195-7. DOI:10.1097/BRS.0000000000001057
14. Choi JB, Han JO, Jeong JW. False aneurysm of the thoracic aorta associated with an aorto-chest wall fistula after spinal instrumentation. *J Trauma*. 2001;50(1):140-3. DOI:10.1097/00005373-200101000-00029
15. Rabellino M, Garcia-Monaco R, Cesareo V, et al. Endovascular treatment of iatrogenic aortic injury after spinal surgery. *Minim Invasive Ther Allied Technol*. 2013;22(1):56-60. DOI:10.3109/13645706.2012.692332
16. Sandhu HK, Charlton-Ouw KM, Azzadeh A, et al. Spinal screw penetration of the aorta. *J Vasc Surg*. 2013;57(6):1668-70. DOI:10.1016/j.jvs.2012.10.087
17. Kakkos SK, Shepard AD. Delayed presentation of aortic injury by pedicle screws: report of two cases and review of the literature. *J Vasc Surg*. 2008;47(5):1074-82. DOI:10.1016/j.jvs.2007.11.005
18. Halm H, Niemeyer T, Link T, Liljenqvist U. Segmental pedicle screw instrumentation in idiopathic thoracolumbar and lumbar scoliosis. *Eur Spine J*. 2000;9(3):191-7. DOI:10.1007/s005860000139
19. Parker SL, McGirt MJ, Farber SH, et al. Accuracy of free-hand pedicle screws in the thoracic and lumbar spine: Analysis of 6816 consecutive screws. *Neurosurgery*. 2011;68(1):170-8; discussion 178. DOI:10.1227/NEU.0b013e3181fdaf4
20. Kosmopoulos V, Schizas C. Pedicle screw placement accuracy: A meta-analysis. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2007;32(3):E111-20. DOI:10.1097/01.brs.0000254048.79024.8b
21. Sarlak AY, Tosun B, Atmaca H, et al. Evaluation of thoracic pedicle screw placement in adolescent idiopathic scoliosis. *Eur Spine J*. 2009;18(12):1892-7. DOI:10.1007/s00586-009-1065-y
22. Kim YJ, Lenke LG, Cheh G, Riew KD. Evaluation of pedicle screw placement in the deformed spine using intraoperative plain radiographs: A comparison with computerized tomography. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2005;30(18):2084-8. DOI:10.1097/01.brs.0000178818.92105.ec
23. Floccari LV, Larson AN, Crawford CH 3rd, et al.; Minimize Implants Maximize Outcomes Study Group. Which malpositioned pedicle screws should be revised? *J Pediatr Orthop*. 2018;38(2):110-5. DOI:10.1097/BPO.0000000000000753
24. Oertel MF, Hobart J, Stein M, et al. Clinical and methodological precision of spinal navigation assisted by 3D intraoperative O-arm radiographic imaging. *J Neurosurg Spine*. 2011;14(4):532-6. DOI:10.3171/2010.10.SPINE091032
25. Baky FJ, Milbrandt T, Echternacht S, et al. Intraoperative computed tomography-guided navigation for pediatric spine patients reduced return to operating room for screw malposition compared with freehand/fluoroscopic techniques. *Spine Deform*. 2019;7(4):577-81. DOI:10.1016/j.jspd.2018.11.012
26. Jin M, Liu Z, Liu X, et al. Does intraoperative navigation improve the accuracy of pedicle screw placement in the apical region of dystrophic scoliosis secondary to neurofibromatosis type I: comparison between O-arm navigation and free-hand technique. *Eur Spine J*. 2016;25(6):1729-37. DOI:10.1007/s00586-015-4012-0
27. Van de Kelft E, Costa F, Van der Planken D, Schils F. 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. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2012;37(25):E1580-7. DOI:10.1097/BRS.0b013e318271b1fa
28. Feng W, Wang W, Chen S, et al. O-arm navigation versus C-arm guidance for pedicle screw placement in spine surgery: A systematic review and meta-analysis. *Int Orthop*. 2020;44(5):919-26. DOI:10.1007/s00264-019-04470-3
29. Kudo H, Wada K, Kumagai G, et al. Accuracy of pedicle screw placement by fluoroscopy, a three-dimensional printed model, local electrical conductivity measurement device, and intraoperative computed tomography navigation in scoliosis patients. *Eur J Orthop Surg Traumatol*. 2021;31(3):563-9. DOI:10.1007/s00590-020-02803-2
30. Gertzbein SD, Robbins SE. Accuracy of pedicular screw placement in vivo. *Spine (Phila Pa 1976)*. 1990;15(1):11-4. DOI:10.1097/00007632-199001000-00004
31. Rao G, Brodke DS, Rondina M, Dailey AT. Comparison of computerized tomography and direct visualization in thoracic pedicle screw placement. *J Neurosurg*. 2002;97(Suppl. 2):223-6. DOI:10.3171/spi.2002.97.2.0223
32. Sarwahi V, Payares M, Wendolowski S, et al. Pedicle screw safety: How much anterior breach is safe? A Cadaveric and CT-Based Study. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2017;42(22):E1305-10. DOI:10.1097/BRS.0000000000002153
33. Ogura Y, Watanabe K, Hosogane N, et al. Acute respiratory failure due to hemothorax after posterior correction surgery for adolescent idiopathic scoliosis: A case report. *BMC Musculoskelet Disord*. 2013;14:132. DOI:10.1186/1471-2474-14-132
34. Jiang H, Qiu X, Wang W, et al. The position of the aorta changes with altered body position in single right thoracic adolescent idiopathic scoliosis: A magnetic resonance imaging study. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2012;37(17):E1054-61.
35. Liu J, Shen J, Zhang J, et al. The position of the aorta relative to the spine for pedicle screw placement in the correction of idiopathic scoliosis. *J Spinal Disord Tech*. 2012;25(4):E103-7. DOI:10.1097/BSD.0b013e31824a7bc3
36. Губин А.В., Рябых С.О., Бурцев А.В. Ретроспективный анализ мальпозиции винтов после инструментальной коррекции деформаций грудного и поясничного отделов позвоночника. *Хирургия позвоночника*. 2015;12(1):8-13 [Gubin AV, Ryabykh SO, Burtsev AV. Retrospective analysis of screw malposition following instrumented correction of thoracic and lumbar spine deformities. *Hir Pozvonoc*. 2015;12(1):8-13 (in Russian)]. DOI:10.14531/ss2015.1.8-13

Статья поступила в редакцию / The article received: 26.02.2024

Статья принята к печати / The article approved for publication: 03.09.2024



OMNIDOCTOR.RU