



ИЗБИРАТЕЛЬНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ НАВИГАЦИОННЫХ ШАБЛОНОВ ПРИ ИДИОПАТИЧЕСКОМ СКОЛИОЗЕ: ТЕХНИЧЕСКИЕ И ХРОНОМЕТРИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ

А.В. Косулин¹, Д.В. Елякин¹, Л.А. Корниевский¹, И.А. Булатова¹, А.Ю. Мушкин^{2,3}

¹Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт фтизиопульмонологии, Санкт-Петербург, Россия

³Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет
им. акад. И.П. Павлова, Санкт-Петербург, Россия

Цель исследования. Оценить непосредственные результаты избирательного применения навигационных шаблонов при оперативном лечении идиопатического сколиоза.

Материал и методы. Задняя инструментальная фиксация при идиопатическом сколиозе выполнена 12 пациентам 14–17 лет. У 6 больных для установки транспедикулярных винтов в позвонки с наименее благоприятными морфометрическими характеристиками применены двухуровневые навигационные шаблоны (группа А), у 6 — все винты установлены по методике free-hand (группа Б). Число установленных винтов у каждого пациента составило от 16 до 20. Группы сопоставимы по полу, возрасту, величине ведущей дуги, числу включенных в зону фиксации позвонков, числу и характеру опорных элементов. Проведено сравнение длительности операции и объема кровопотери между группами, а в группе с навигационными шаблонами выполнен учет времени, затрачиваемого на создание виртуальных объектов, а также оценена корректность стояния винтов по системе 2-миллиметровых инкрементов.

Результаты. Избирательное использование навигационных шаблонов, в сравнении с методикой тотальной free-hand имплантации винтов, обеспечивает достоверное сокращение продолжительности операции, не влияя на объем кровопотери и величину коррекции дуги. В группе А 48 винтов имплантированы с использованием шаблонов, 59 — по методике free-hand, при этом ширина корней дуг на уровнях навигации составила $4,28 \pm 1,43$ мм при $6,53 \pm 1,72$ мм на сравниваемых уровнях ($p < 0,05$). Корректное стояние винтов, имплантированных с использованием навигационных шаблонов и по методике free-hand, составило 93,7 и 88,0 % соответственно (различия недостоверны). Затраты времени на подготовку 3D-объектов для одной операции составили 1419 ± 190 мин, из которых собственно работа оператора занимает не более 10 %.

Заключение. Применение шаблонов, захватывающих две пары сегментов с наиболее узкими корнями дуг позвонков, позволяет значительно сократить продолжительность операции, в сравнении с методикой тотальной free-hand, при сопоставимой коррекции деформации и объеме кровопотери. Отказ от тотального использования шаблонов в пользу комбинации избирательной 3D-ассистированной имплантации и методики free-hand при идиопатическом сколиозе позволяет уменьшить время на предоперационную подготовку моделей, обеспечивая корректное стояние винтов с частотой, сопоставимой с использованием тотального 3D-моделирования позвоночника (по данным литературы — 92,5–97,6 %).

Ключевые слова: 3D-печать, навигационные шаблоны, транспедикулярные винты, идиопатический сколиоз.

Для цитирования: Косулин А.В., Елякин Д.В., Корниевский Л.А., Булатова И.А., Мушкин А.Ю. Избирательное применение навигационных шаблонов при идиопатическом сколиозе: технические и хронометрические особенности // Хирургия позвоночника. 2022. Т. 19. № 3. С. 6–13.

DOI: <http://dx.doi.org/10.14531/ss2022.3.6-13>.

SELECTIVE APPLICATION OF NAVIGATION TEMPLATES IN IDIOPATHIC SCOLIOSIS: TECHNICAL AND HRONOMETRIC FEATURES

A.V. Kosulin¹, D.V. Elyakin¹, L.A. Kornievskiy¹, I.A. Bulatova¹, A.Yu. Mushkin^{2,3}

¹Saint-Petersburg State Pediatric Medical University, Saint-Petersburg, Russia

²Saint-Petersburg Research Institute of Phthisiopulmonology, Saint-Petersburg, Russia

³Pavlov First Saint Petersburg State Medical University, Saint-Petersburg, Russia

Objective. To evaluate short-term result of selective navigation templates application in idiopathic scoliosis surgery.

Material and Methods. A total of 12 patients aged 14–17 years with idiopathic scoliosis were included in the study. Group A included 6 pa-

tients treated with selective application of navigation templates for pedicle screws insertion in the most difficult zones. Group B (control) included 6 patients in whom all the pedicle screws were placed with free-hand technique. Number of screws inserted was 16–20 per patient. There was no significant difference between the groups in sex, age, Cobb angle, number of vertebrae instrumented, number of pedicle screws and laminar hooks. Surgery duration, blood loss, absolute and relative correction were compared. In Group A, duration of the 3D-objects fabrication and printing, as well as pedicle screw accuracy based on 2-mm increment grading system were evaluated.

Results. Selective application of navigation templates as compared with total free hand screws placement significantly reduced surgery duration. Difference in blood loss and deformity correction was not significant. A total of 107 pedicle screws were placed in Group A, 48 of them with navigation templates and 59 by free-hand technique. Average pedicle width in screw installation with navigation templates was 4.28 ± 1.43 mm, and in that with free-hand technique 6.53 ± 1.72 mm, with significant difference. Accurate screw placement with navigation templates and by free-hand technique were 93.7 % and 88.0 %, respectively, with no significant difference. Duration of 3D-objects manufacturing was 1419 ± 190 minutes. Active operator's involvement was required in about 10 % of the while.

Conclusion. Selective application of a pair of two-level navigation templates for most difficult pedicles in idiopathic scoliosis significantly reduces surgery duration. Difference in blood loss and deformity correction is insignificant. Refusal of total templates usage for combination of navigation templates for selected difficult pedicles and free-hand technique for the rest is an option for shortening the preoperative preparation, but provides screw placement accuracy comparable with total templates usage (92.5–97.6 % as reported).

Key Words: 3D-printing, navigation template, pedicle screw, idiopathic scoliosis.

Please cite this paper as: Kosulin AV, Elyakin DV, Kornievskiy LA, Bulatova IA, Mushkin AY. Selective application of navigation templates in idiopathic scoliosis: technical and chronometric features. *Hir. Pozvonoc.* 2022;19(3):6–13. In Russian.

DOI: <http://dx.doi.org/10.14531/ss2022.3.6-13>.

Высокая точность транспедикулярной имплантации при использовании персонифицированных навигационных шаблонов подтверждается многочисленными современными исследованиями [1–5]. Изготовление таких шаблонов требует определенных финансовых, технических и временных ресурсов [6–9]. Особое значение они имеют при планировании протяженной фиксации с многочисленными опорными элементами, при этом логично их изготавливать только для тех зон позвоночника, в которых установка транспедикулярных винтов может представлять техническую сложность.

Несмотря на подтвержденную в ряде публикаций корреляцию между малыми размерами корня дуги и мальпозицией транспедикулярных винтов [10, 11], единого представления о том, какая ширина корня дуги является для имплантации критической, в настоящее время не существует. Наиболее удобным критерием представляется сопоставление размеров педикулы и имплантируемого винта: если минимальный диаметр опорного элемента превосходит ширину корня дуги, имплантация считается трудной [12]. Морфометрические исследования позвонков при идиопатическом сколиозе

показали, что по мере приближения к вершине дуги происходит плавное уменьшение ширины «ножек» позвонков как на выпуклой, так и, в большей степени, на вогнутой стороне деформации [13, 14]. Таким образом, трудные для имплантации зоны чаще всего включают 2–3 сегмента (рис. 1).

В настоящем исследовании произведена оценка результатов оперативного лечения идиопатического сколиоза с использованием навигационных шаблонов с точки зрения определения трудных для имплантации транспедикулярных винтов, в том числе объективации затрат вре-

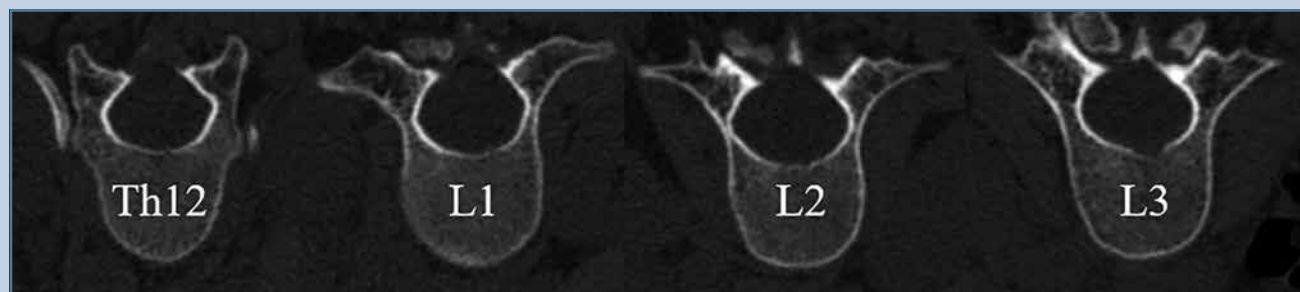


Рис. 1

Корни дуг четырех смежных позвонков, вовлеченных в зону инструментальной фиксации: трудные для имплантации зоны (ширина корня дуги менее 4,35 мм) – два смежных сегмента L₁ и L₂

Таблица 1

Исходные данные включенных в исследование пациентов

Параметры	Группа А	Группа Б	Уровень значимости р
Возраст, лет	16,00 ± 1,26	15,20 ± 1,33	0,292
Пол (м : ж), п	0 : 6	2 : 4	0,455
Величина ведущей дуги по Cobb, град.	45,0 (43,5–45,8)	47,5 (39,8–53,8)	0,872
Включенные в зону фиксации позвонки, п	9,67 ± 1,21	10,80 ± 0,75	0,073
Установленные транспедикулярные винты, п	17,80 ± 1,33	17,30 ± 1,97	0,617
Установленные ламинарные крючки, п	0,00 (0,00–0,00)	0,00 (0,00–0,00)*	0,405

* Два ламинарных крючка установлены при лечении одного пациента группы Б, в связи с чем медиана равна нулю.

мени на подготовку соответствующих 3D-объектов.

Дизайн: ретроспективное когортное исследование.

Цель исследования – оценить непосредственные результаты избирательного применения навигационных шаблонов при оперативном лечении идиопатического сколиоза.

Материал и методы

Пациенты

В исследование вошли 12 пациентов с идиопатическим сколиозом в возрасте 14–17 лет, которым выполняли заднюю инструментальную фиксацию. Больных ретроспективно разделили на 2 группы.

Группа А – 6 пациентов, у которых для установки транспедикулярных винтов в позвонки с наименее благоприятными морфометрическими характеристиками применяли навигационные шаблоны.

Группа Б (контрольная) – 6 пациентов, отобранных методом псевдорандомизации среди оперированных с установкой транспедикулярных винтов без использования навигационных шаблонов.

Группы не имели статистически значимых различий по полу, возрасту, величине ведущей дуги по Cobb, числу включенных в зону фиксации позвонков, установленных транспедикулярных винтов и ламинарных крючков (табл. 1).

Методики

Для изготовления навигационных шаблонов выбирали 2 пары смежных

позвонков с размерами корня дуги менее 4,35 мм (минимальный диаметр винта; рис. 1). В программной среде Slicer 4.8.1 создавали виртуальные 3D-модели отобранных пар позвонков (зон интереса), затем в 3D-редакторе Blender 2.78 осуществляли планирование имплантации и построение двухуровневых навигационных шаблонов. Каждый шаблон представлял собой опорную площадку с четырьмя тубусами-направителями [12]. Физические трехмерные модели зон интереса и навигационные шаблоны распечатывали на 3D-принтере (технология FDM) из филамента PLA. В течение подготовительных работ выполняли учет времени, затрачиваемого на соз-

дание виртуальных объектов, а также времени работы 3D-принтера.

Распечатанные модели пар позвонков и навигационные шаблоны подвергали низкотемпературной стерилизации. В ходе операции после скелетирования задних структур навигационные шаблоны совмещали с дорсальной поверхностью позвонков. С помощью сверла формировали транспедикулярные каналы (рис. 2), по которым затем устанавливали винты. Все остальные опорные элементы имплантировали по методике free-hand. В послеоперационном периоде пациентам выполняли КТ.

Стояние винтов у пациентов группы А оценивали по системе 2-милли-



Рис. 2

Использование навигационного шаблона во время операции

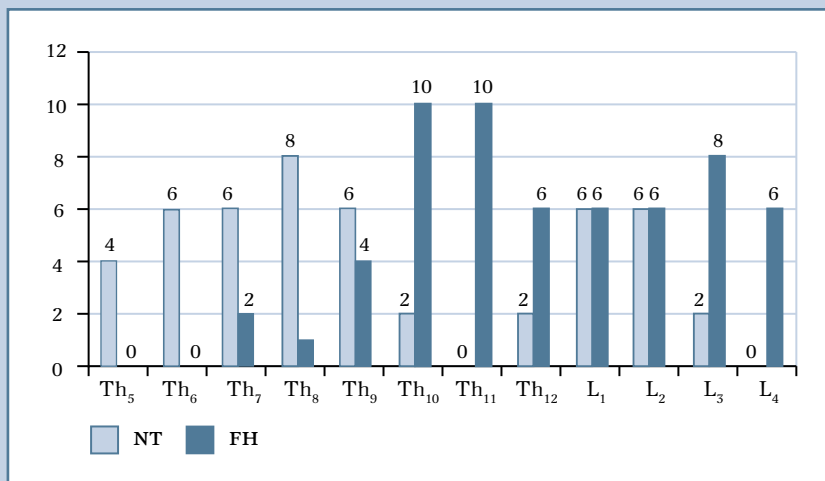


Рис. 3

Распределение транспедикулярных винтов в группе А по способу имплантации в зависимости от уровня: NT – навигационные шаблоны; FH – методика free-hand

метровых инкрементов [15]: корректно установленными считали винты, расположенные внутрикостно или перфорирующие кортикальный слой корня дуги не более чем на 2 мм. Для позвонков с шириной корня дуги меньше диаметра винта учитывали только медиальные перфорации.

Между группой с избирательным использованием навигационных шаблонов и контрольной проводили сравнение продолжительности операции, кровопотери, абсолютной и относительной коррекции ведущей дуги. Так как пациенты контрольной группы отобраны ретроспективно, послеоперационная КТ у 5 из них не была доступна для анализа. В связи с этим сравнительную оценку корректности стояния транспедикулярных винтов между группами не проводили,

тем более что эти вопросы неоднократно освещались в ранее опубликованных работах [1–5].

Статистический анализ

Статистическую обработку данных осуществляли в программном пакете Jamovi 2.2.5. Сравнение качественных показателей в зависимости от минимального значения ожидаемого явления выполняли с помощью точного критерия Фишера или критерия χ^2 Пирсона с поправкой на непрерывность. Проверку количественных показателей на нормальность распределения проводили с использованием критериев Шапиро – Уилка (при $n < 50$) и Колмогорова – Смирнова (при $n > 50$). В случае нормального распределения сравнение осуществляли с использованием критерия Стьюдента, в случае распределения,

отличающегося от нормального, – критерия Манна – Уитни. Различия считали статистически значимыми при уровне значимости $p < 0,05$. С учетом малого числа наблюдений при выявлении значимых различий также вычисляли размер эффекта по формуле Хеджеса и оценивали мощность статистического критерия для данного объема выборки. Приемлемой считалась мощность 80 %.

Результаты

В ходе оперативных вмешательств установлены все запланированные опорные элементы. Распределение транспедикулярных винтов по способу имплантации в зависимости от уровня в группе А приведено на рис. 3. Осложнений, связанных с имплантацией, не отмечено.

Как уже отмечено выше, группы не имели значимых различий по величине ведущей дуги и числу установленных ламинарных крючков (критерий Манна – Уитни для ненормального распределения), по возрасту, числу включенных в зону фиксации позвонков, числу установленных транспедикулярных винтов (критерий Стьюдента для нормального распределения), а также по полу (точный критерий Фишера), что являлось условием формирования группы сравнения при псевдорандомизации (табл. 1).

Сравнение продолжительности операции, кровопотери, абсолютной и относительной коррекции между группами с помощью критерия Стьюдента подтвердило статистическую значимость различий только в отношении продолжительности операции, в то время как для остальных крите-

Таблица 2

Послеоперационные данные включенных в исследование пациентов

Параметр	Группа А	Группа Б	Уровень значимости p
Продолжительность операции, мин	357,0 ± 57,2	470,0 ± 35,8	0,002
Кровопотеря, % ОЦК	16,00 ± 2,90	18,80 ± 4,26	0,208
Абсолютная коррекция, град.	31,30 ± 5,85	26,70 ± 6,98	0,238
Относительная коррекция, %	65,5 ± 13,7	55,9 ± 13,1	0,244

Таблица 3

Затраты времени на подготовку к операции с использованием навигационных шаблонов

Этапы подготовительных работ	Продолжительность, мин
3D-моделирование	126,0 ± 19,2
3D-печать зон интереса	766,0 ± 175,0
3D-печать навигационных шаблонов	527,0 ± 28,8
Всего	1419,0 ± 190,0

риев различия не были существенны (табл. 2). Для продолжительности операции стандартизированный размер эффекта был равен 2,19. Статистическая мощность критерия Стьюдента для данного сравнения составила 97 %.

Затраты времени на подготовку 3D-объектов включали затраты на компьютерное 3D-моделирование, 3D-печать двух зон интереса и 3D-печать двух навигационных шаблонов. Результаты хронометрии каждого из указанных этапов учитывали раздельно (табл. 3).

Пациентам группы А установили 107 транспедикулярных винтов (от 16 до 20 на операцию), причем в каждом случае 8 винтов имплантировали с использованием двух 2-уровневых навигационных шаблонов. Таким образом, с их применением установили 48 винтов, по методике free-hand – 59. Значения ширины корня дуги по данным предоперационной КТ сгруппировали по способу имплантации. Ширина корней дуг, в которые имплантация осуществлялась с использованием навигационных шаблонов, составила $4,28 \pm 1,43$ мм (минимальный – 1,9 мм), что оказалось значимо меньше, чем ширина корней дуг позвонков, в которые винты установлены по методике free-hand ($6,53 \pm 1,72$ мм; $p < 0,05$ по критерию Стьюдента). Корректное стояние по данным послеоперационной КТ подтверждено для 96 (89,7 %) винтов, из которых с использованием навигационных шаблонов и по методике free-hand установлены без мальпозиции соответственно 45 и 51 винт (93,7 и 88,0 % соответственно). Сравнение корректности стояния винтов в зависимости от способа имплан-

тации с помощью критерия χ^2 Пирсона с поправкой на непрерывность не выявило статистически значимых различий.

Обсуждение

Большинство исследователей, применяющих 3D-печать при протяженной транспедикулярной фиксации, использует навигационные шаблоны для установки всех винтов в ходе одной операции [2–5, 16–20], обеспечивая при идиопатическом сколиозе их корректное стояние для 92,5–97,6 % винтов [17, 19]. В сравнительных исследованиях показаны такие преимущества тотальных навигационных шаблонов перед методикой free-hand, как меньшая частота мальпозиций [2–5], меньшая продолжительность операции [3], меньшее время, необходимое для установки одного винта [4]. Различия в абсолютной (разность пред- и послеоперационной величины ведущей дуги) [3] и относительной коррекции (отношение абсолютной коррекции к исходной величине ведущей дуги) [2] не имели статистической значимости.

При этом отмечается такой недостаток 3D-ассистированной имплантации, как значительная продолжительность подготовительных работ, состоящих из этапа, требующего активного участия оператора 3D-моделирования, и осуществляемой принтером автоматически 3D-печати: изготовление комплекта моделей в зависимости от количества запланированных винтов может занимать от 1 до 3 сут [2, 21]. Если для операции необходимо использовать несколько объектов, время на подготовку может быть сокраще-

но за счет моделирования одного объекта во время печати другого и/или использования нескольких принтеров. Существенно сократить продолжительность подготовительных работ может отказ от 3D-печати модели зоны интереса, что, однако, является нежелательным, так как модель облегчает ориентирование в операционной ране, а в случае изменения плана операции может служить высокоинформативным референтным объектом [22, 23].

Другим вариантом уменьшения времени на предоперационную подготовку может быть отказ от тотального использования шаблонов в пользу комбинации 3D-ассистированной имплантации и методики free-hand. Применение такой методики с изготовлением шаблонов для позвонков с наименее благоприятными характеристиками упоминается только в двух небольших клинических сериях [12, 21].

Наибольшая частота мальпозиций при установке транспедикулярных винтов связана с малыми поперечными размерами корня дуги [10, 11], которые при идиопатическом сколиозе встречаются чаще, чем при отсутствии деформации [14, 24]. Наиболее характерно наличие неблагоприятных для имплантации зон в грудном отделе на вогнутой стороне дуги [25, 26], а наиболее затруднительна имплантация в верхний инструментлируемый позвонок [27, 28]. Это совпадает и с нашими данными, но при этом различия в частоте мальпозиции между винтами, установленными двумя разными методами, оказались статистически незначимыми.

Полный цикл работ по изготовлению 3D-моделей в среднем занял 1419 ± 190 мин, причем активного участия оператора требовал только этап 3D-моделирования, не превысивший 10 % ($126,0 \pm 19,2$ мин) от общего затраченного времени.

В нашем исследовании избирательное использование навигационных шаблонов для имплантации в наименее благоприятные зоны позволило значимо сократить продолжительность операции по сравнению с тотальным

применением неассистированной имплантации. Таким образом, использование двух 2-уровневых навигационных шаблонов в ходе протяженной (8 и более уровней) транспедикулярной фиксации позволяет выполнить подготовку необходимых 3D-объектов в течение 1 сут и добиться значимого уменьшения операционного времени без повышения риска мальпозиции винтов, устанавливаемых без дополнительного оборудования.

Заключение

Избирательное применение навигационных шаблонов, захватывающих 2 пары сегментов с наиболее узкими корнями дуг позвонков, в сравнении

с методикой free-hand, при хирургическом лечении идиопатического сколиоза позволяет значительно сократить продолжительность операции, не оказывая существенного влияния на коррекцию деформации и объем кровопотери.

В сравнении с тотальным 3D-моделированием позвоночника, избирательное применение шаблонов также позволяет сократить затраты времени на их изготовление при сопоставимом уровне корректности положения винтов. Активного участия оператора требует не более 10 % от общих затрат времени на их моделирование и изготовление.

В задачи исследования не входил анализ финансовых затрат, однако *a priori* затраты на филament и исполь-

зование технологического оборудования при избирательной модели будут меньшими, чем при тотальной.

Ограничения достоверности исследования: небольшая выборка и ретроспективный дизайн; отсутствие КТ-контроля и оценки частоты мальпозиций в контрольной группе (free-hand – отражены в литературе); отсутствие второй группы контроля с тотальным применением навигационных шаблонов (использование данных литературы).

Исследование не имело спонсорской поддержки. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература/References

1. Коваленко Р.А., Пташников Д.А., Чербилю В.Ю., Кашин В.А. Сравнительный анализ результатов имплантации транспедикулярных винтов в грудном отделе позвоночника с использованием индивидуальных навигационных матриц и методики free hand // Травматология и ортопедия России. 2020. Т. 26. № 3. С. 49–60. [Kovalenko RA, Ptashnikov DA, Cherebillo VYu, Kashin VA. Comparison of the accuracy and safety of pedicle screw placement in thoracic spine between 3D printed navigation templates and free hand technique. Traumatology and Orthopedics of Russia. 2020;26(3):49–60]. DOI: 10.21823/2311-2905-2020-26-3-49-60.
2. Pan Y, Lu GH, Kuang L, Wang B. Accuracy of thoracic pedicle screw placement in adolescent patients with severe spinal deformities: a retrospective study comparing drill guide template with free-hand technique. Eur Spine J. 2018;27:319–326. DOI: 10.1007/s00586-017-5410-2.
3. Luo M, Wang W, Yang N, Xia L. Does three-dimensional printing plus pedicle guider technology in severe congenital scoliosis facilitate accurate and efficient pedicle screw placement? Clin Orthop Relat Res. 2019;477:1904–1912. DOI: 10.1097/CORR.0000000000000739.
4. Cecchinato R, Berjano P, Zerbi A, Damielano M, Redaelli A, Lamartina C. Pedicle screw insertion with patient-specific 3D-printed guides based on low-dose CT scan is more accurate than free-hand technique in spine deformity patients: a prospective, randomized clinical trial. Eur Spine J. 2019;28:1712–1723. DOI: 10.1007/s00586-019-05978-3.
5. Garg B, Gupta M, Singh M, Kalyanasundaram D. Outcome and safety analysis of 3D-printed patient-specific pedicle screw jigs for complex spinal deformities: a comparative study. Spine J. 2019;19:56–64. DOI: 10.1016/j.spinee.2018.05.001.
6. Liang W, Han B, Hai JJ, Hai Y, Chen L, Kang N, Yin P. 3D-printed drill guide template, a promising tool to improve pedicle screw placement accuracy in spinal deformity surgery: A systematic review and meta-analysis. Eur Spine J. 2021;30:1173–1183. DOI: 10.1007/s00586-021-06739-x.
7. Wallace N, Butt BB, Aleem I, Patel R. Three-dimensional printed drill guides versus fluoroscopic-guided freehand technique for pedicle screw placement: a systematic review and meta-analysis of radiographic, operative, and clinical outcomes. Clin Spine Surg. 2020;33:314–322. DOI: 10.1097/BSD.0000000000001023.
8. Tian Y, Zhang J, Liu T, Tang S, Chen H, Ding K, Hao D. A comparative study of C2 pedicle or pars screw placement with assistance from a 3-dimensional (3D)-printed navigation template versus C-Arm based navigation. Med Sci Monit. 2019;25: 9981–9990. DOI: 10.12659/MSM.918440.
9. Zhao Y, Luo H, Ma Y, Liang J, Han G, Xu Y, Lu S. Accuracy of S2 alar-ilial screw placement under the guidance of a 3D-printed surgical guide template. World Neurosurg. 2021;146:e161–e167. DOI: 10.1016/j.wneu.2020.10.063.
10. Raasck K, Khoury J, Aoude A, Beland B, Munteanu A, Weber MH, Golan J. The effect of thoracolumbar pedicle isthmus on pedicle screw accuracy. Global Spine J. 2020;10:393–398. DOI: 10.1177/2192568219850143.
11. Gonzalvo A, Fitt G, Liew S, de la Harpe D, Vrodo N, McDonald M, Rogers MA, Wilde PH. Correlation between pedicle size and the rate of pedicle screw misplacement in the treatment of thoracic fractures: Can we predict how difficult the task will be? Br J Neurosurg. 2015;29:508–512. DOI: 10.3109/02688697.2015.1019414.
12. Косулин А.В., Елякин Д.В., Корчагина Д.О., Лукина Н.А., Шибутова Ю.И., Колесникова Е.С. Транспедикулярная фиксация позвоночника с использованием двухуровневых навигационных шаблонов при малых размерах корня дуги // Хирургия позвоночника. 2021. Т. 18. № 2. С. 26–33. [Kosulin AV, Elyakin DV, Korchagina DO, Lukina NA, Shibutova Yul, Kolesnikova ES. Transpedicular fixation of the spine with two-level navigation templates for narrow pedicles. Hir. Pozvonoc. 2021;18(2):26–33]. DOI: 10.14531/ss2021.2.26-33.
13. Liljenqvist UR, Link TM, Halm HF. Morphometric analysis of thoracic and lumbar vertebrae in idiopathic scoliosis. Spine. 2000;25:1247–1253. DOI: 10.1097/00007632-200005150-00008.
14. Parent S, Labelle H, Skalli W, Latimer B, de Guise J. Morphometric analysis of anatomic scoliotic specimens. Spine. 2002;27:2305–2311. DOI: 10.1097/00007632-200211010-00002.
15. Aoude AA, Fortin M, Figueiredo R, Jarzem P, Ouellet J, Weber MH. Methods to determine pedicle screw placement accuracy in spine surgery: a systematic review. Eur Spine J. 2015;24:990–1004. DOI: 10.1007/s00586-015-3853-x.

16. Lu S, Zhang YZ, Wang Z, Shi JH, Chen YB, Xu XM, Xu YQ. Accuracy and efficacy of thoracic pedicle screws in scoliosis with patient-specific drill template. *Med Biol Eng Comput*. 2012;50:751–758. DOI: 10.1007/s11517-012-0900-1.
17. Alpizar-Aguirre A, Cabrera-Aldana EE, Rosales-Olivares LM, Zarate-Kalfopoulos B, Gomez-Crespo S, Reyes-Sanchez AA. A new technique of pedicle screw placement with the use of sequential multilevel navigation templates based on patient-specific 3D CT reconstruction model: applicability in spine deformity. *Acta Orthop Mex*. 2017;31:312–318.
18. Chen PC, Chang CC, Chen HT, Lin CY, Ho TY, Chen YJ, Tsai CH, Tsou HK, Lin CS, Chen YW, Hsu HC. The accuracy of 3D printing assistance in the spinal deformity surgery. *Biomed Res Int*. 2019;2019:7196528. DOI: 10.1155/2019/7196528.
19. Senkoylu A, Cetinkaya M, Daldal I, Necefov E, Eren A, Samartzis D. Personalized three-dimensional printing pedicle screw guide innovation for the surgical management of patients with adolescent idiopathic scoliosis. *World Neurosurg*. 2020;144:e513–e522. DOI: 10.1016/j.wneu.2020.08.212.
20. Putzier M, Strube P, Cecchinato R, Lamartina C, Hoff EK. A new navigational tool for pedicle screw placement in patients with severe scoliosis: a pilot study to prove feasibility, accuracy, and identify operative challenges. *Clin Spine Surg*. 2017;30:E430–E439. DOI: 10.1097/BSD.0000000000000220.
21. Liu K, Zhang Q, Li X, Zhao C, Quan X, Zhao R, Chen Z, Li Y. Preliminary application of a multi-level 3D printing drill guide template for pedicle screw placement in severe and rigid scoliosis. *Eur Spine J*. 2017;26:1684–1689. DOI: 10.1007/s00586-016-4926-1.
22. Косулин А.В., Елякин Д.В., Дмитриева Н.Н., Абзалиева А.Д., Блаженко А.А., Волченко Л.В. Случай хирургического лечения запущенного врожденного кифосколиоза // Педиатр. 2018. Т. 9. № 3. С. 118–123. [Kosulin AV, Elyakin DV, Dmitrieva NN, Abzalieva AD, Blazhenko AA, Volchenko LV. Surgical treatment of advanced congenital kyphoscoliosis: a case report. *Pediatrician (St. Petersburg)*. 2018;9(3):118–123]. DOI: 10.17816/PED93118-123.
23. Снетков А.А., Горбатюк Д.С., Пантелеев А.А., Еськин Н.А., Колесов С.В. Анализ применения 3D-прототипирования при хирургической коррекции врожденных кифосколиозов // Хирургия позвоночника. 2020. Т. 17. № 1. С. 42–53. [Snetkov AA, Gorbatiuk DS, Panteleyev AA, Eskin NA, Kolesov SV. Analysis of the 3D prototyping in the surgical correction of congenital kyphoscoliosis. *Hir. Pozvonoc*. 2020;17(1):42–53]. DOI: 10.14531/ss2020.142-53.
24. Sarwahi V, Sugarman EP, Wollowick AL, Amaral TD, Lo Y, Thornhill B. Prevalence, distribution, and surgical relevance of abnormal pedicles in spines with adolescent idiopathic scoliosis vs. no deformity: a CT-based study. *J Bone Joint Surg Am*. 2014;96:e92. DOI: 10.2106/JBJS.M.01058.
25. Кокушин Д.Н., Виссарионов С.В., Баиндурашвили А.Г., Барт В.А., Богатырев Т.Б. Анализ анатомо-антропометрических параметров позвонков у детей с идиопатическим сколиозом типа Lenke V с применением 3D-КТ-навигации // Хирургия позвоночника. 2016. Т. 13. № 3. С. 49–59. [Kokushin DN, Vissarionov SV, Baindurashvili AG, Bart VA, Bogatyrev TV. 3D-CT analysis of anatomical and anthropometric parameters of vertebrae in children with Lenke type V idiopathic scoliosis. *Hir. Pozvonoc*. 2016;13(3):49–59]. DOI: 10.14531/ss2016.3.49-59.
26. Виссарионов С.В., Кокушин Д.Н., Филиппова А.Н., Баиндурашвили А.Г., Барт В.А., Хусанов Н.О. Анатомо-антропометрические особенности костных структур тел позвонков у детей с идиопатическим сколиозом типа Lenke III // Травматология и ортопедия России. 2019. Т. 25. № 1. С. 92–103. [Vissarionov SV, Kokushin DN, Filippova AN, Baindurashvili AG, Bart VA, Khusainov NO. Anatomical and anthropometric features of bone bodies structures in children with idiopathic scoliosis of Lenke III type. *Travmatologiya i ortopediya Rossii*. 2019;25(1):92–103]. DOI: 10.21823/2311-2905-2019-25-1-92-103.
27. Senaran H, Shah SA, Gabos PG, Littleton AG, Neiss G, Guille JT. Difficult thoracic pedicle screw placement in adolescent idiopathic scoliosis. *J Spinal Disord Tech*. 2008;21:187–191. DOI: 10.1097/BSD.0b013e318073cc1d.
28. Sarwahi V, Wendolowski SF, Lo Y, Thornhill B, Amaral T. End vertebra versus apical vertebra: where are we more likely to misplace in spine deformity? *J Pediatr Orthop*. 2020;40:53–59. DOI: 10.1097/BPO.0000000000001102.

Адрес для переписки:

Косулин Артем Владимирович
194100, Россия, Санкт-Петербург, ул. Литовская, 2,
Санкт-Петербургский государственный педиатрический
медицинский университет,
hackenlad@mail.ru

Address correspondence to:

Kosulin Artem Vladimirovich
Saint-Petersburg State Pediatric Medical University,
2 Litovskaya str., Saint-Petersburg, 194100, Russia,
hackenlad@mail.ru

Статья поступила в редакцию 21.07.2022

Рецензирование пройдено 06.08.2022

Подписано в печать 11.08.2022

Received 21.07.2022

Review completed 06.08.2022

Passed for printing 11.08.2022

Артем Владимирович Косулин, ассистент кафедры оперативной хирургии и топографической анатомии им. проф. Ф.И. Валькера, Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Россия, 194100, Санкт-Петербург, ул. Литовская, 2, ORCID: 0000-0002-9505-222X, hackenlad@mail.ru;

Дмитрий Викторович Елякин, врач-детский хирург хирургического отделения № 2, Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Россия, 194100, Санкт-Петербург, ул. Литовская, 2, ORCID: 0000-0002-6575-7464, dimaelkins@mail.ru;

Леонид Александрович Корниевский, ассистент кафедры оториноларингологии, Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Россия, 194100, Санкт-Петербург, ул. Литовская, 2, ORCID: 0000-0002-8635-1666, korni-leonid@yandex.ru;

Ирина Анатольевна Булатова, канд. мед. наук, доцент кафедры оперативной хирургии и топографической анатомии им. проф. Ф.И. Валькера, Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Россия, 194100, Санкт-Петербург, ул. Литовская, 2, ORCID: 0000-0002-1112-6966, irbulat@mail.ru;

Александр Юрьевич Мушкин, д-р мед. наук, проф., главный научный сотрудник, руководитель центра патологии позвоночника, руководитель клиники детской хирургии и ортопедии, Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт фтизиопульмонологии, Россия, 194064, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 32; профессор кафедры травматологии и ортопедии, Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И.П. Павлова, Россия, 197022, Санкт-Петербург, ул. Льва Толстого, 6–8, ORCID: 0000-0002-1342-3278, aymsbkin@mail.ru.

Artem Vladimirovich Kosulin, assistant professor, Department of Operative Surgery and Topographic Anatomy n.a. F.I. Valker, Saint-Petersburg State Pediatric Medical University, 2 Litovskaya str., Saint-Petersburg, 194100, Russia, ORCID: 0000-0002-9505-222X, backenlad@mail.ru;

Dmitriy Viktorovich Elyakin, pediatric surgeon, Surgical Department No. 2, Saint-Petersburg State Pediatric Medical University, 2 Litovskaya str., Saint-Petersburg, 194100, Russia, ORCID: 0000-0002-6575-7464, dimaelkins@mail.ru;

Leonid Aleksandrovich Kornievskiy, assistant professor, Department of Otorhinolaryngology, Saint-Petersburg State Pediatric Medical University, 2 Litovskaya str., Saint-Petersburg, 194100, Russia, ORCID: 0000-0002-8635-1666, korni-leonid@yandex.ru;

Irina Anatolyevna Bulatova, MD, PhD, associate professor, Department of Operative Surgery and Topographic Anatomy n.a. F.I. Valker, Saint-Petersburg State Pediatric Medical University, 2 Litovskaya str., Saint-Petersburg, 194100, Russia, ORCID: 0000-0002-1112-6966, irbulat@mail.ru;

Aleksandr Yuryevich Musbkin, DMSc, Prof., chief researcher, Head of the Scientific and Clinical Centre for Spinal Pathology, Head of the Clinic of Pediatric Surgery and Orthopedics, Saint-Petersburg Research Institute of Phthisiopulmonology, 32 Politekhnicheskaya str., Saint-Petersburg, 194064, Russia; Professor of the Department of traumatology and orthopedics, Pavlov First Saint Petersburg State Medical University, 6–8 Lva Tolstogo str., Saint-Petersburg, 197022, Russia, ORCID: 0000-0002-1342-3278, aymsbkin@mail.ru.