



# ПРИМЕНЕНИЕ ТРЕХМЕРНОЙ НАВИГАЦИИ В ХИРУРГИЧЕСКОМ ЛЕЧЕНИИ ДЕТЕЙ С ИДИОПАТИЧЕСКИМ СКОЛИОЗОМ

С.В. Виссарионов<sup>1</sup>, Дж.Е. Шредер<sup>2</sup>, С.Н. Новиков<sup>3</sup>, Д.Н. Кокушин<sup>1</sup>, С.М. Белянчиков<sup>1</sup>, Л. Каплан<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский детский ортопедический институт им. Г.И. Турнера, Санкт-Петербург

<sup>2</sup>Госпиталь специальной хирургии, Нью-Йорк, США

<sup>3</sup>НИИ онкологии им. Н.Н. Петрова, Санкт-Петербург

<sup>4</sup>Медицинский центр «Хадасса» Еврейского университета, Иерусалим, Израиль

**Цель исследования.** Оценка точности установки транспедикулярных винтов при использовании 3D-навигации на базе КТ с интраоперационным рентген-контролем и сравнение ее с точностью, достигаемой при установке винтов методом freehand.

**Материал и методы.** У 62 пациентов 12–18 лет с величиной деформации от 52 до 80° выполняли интраоперационную регистрацию референтных точек по анатомическим ориентирам задних костных структур позвонков на основе данных предоперационного 3D-КТ-обследования. При высокой точности регистрации осуществляли формирование костного канала для транспедикулярного винта под навигационным контролем. При погрешности более 1,0 мм выполняли регистрацию по поверхности задних костных структур позвонка. Проводили мониторинг времени установки нулевого трекера, регистрации и формирования костных каналов, количества сформированных костных каналов для транспедикулярных винтов. Результаты сравнивали с исходами случаев коррекции с установкой винтов методом freehand.

**Результаты.** В группе 3D-навигации установлено 710 транспедикулярных винтов. Для установки нулевого трекера в среднем требовалось 55,0 с. В группе freehand было установлено 470 транспедикулярных винтов. Установка винта требовала в среднем 135,2 с и осложнялась переломом ножки дуги при формировании 5,1 % каналов.

**Заключение.** Метод активной оптической 3D-КТ-навигации с использованием предоперационных КТ-изображений и регистрацией положения референтных точек по анатомическим ориентирам позволяет выполнять точную установку транспедикулярных винтов у пациентов детского возраста с идиопатическим сколиозом.

**Ключевые слова:** подростковый идиопатический сколиоз, хирургия с компьютерной ассистенцией, навигация.

THE UTILITY OF 3-DIMENSIONAL-NAVIGATION  
IN THE SURGICAL TREATMENT OF CHILDREN  
WITH IDIOPATHIC SCOLIOSIS

S.V. Vissarionov, J.E. Schroeder, S.N. Novikov, D.N. Kokushin,  
S.M. Belyanchikov, L. Kaplan

**Objective.** To evaluate the accuracy of screw placement using preoperative 3D CT-based navigation with intraoperative fluoroscopic guidance compared with freehand placement.

**Material and Methods.** Intraoperative registration of patient anatomy to preoperative 3D-CT using anatomic landmarks was performed in 62 patients aged 12–18 years with mean deformity 67° (range, 52° to 80°). When registration accuracy was high, screw tracts were drilled under navigation guidance. When the error was >1.0 mm, registration was performed using posterior vertebral bone structures. The times required for tracker placement, registration, and screw track formation, as well as the number of passes were documented. Results were compared with outcomes in cases operated on with freehand screw placement.

**Results.** In the navigation group, 710 pedicle screws were placed. Mean times were 55 seconds for tracker placement, 94.5 seconds per vertebra for patient registration, 131.1 seconds for screw tract formation on the concave side of the deformity, and 129.5 seconds on the convex side. In the freehand group, 470 pedicle screws were placed. Average time for screw placement was 135.2 seconds, pedicle integrity was breached in 5.1 % of trajectories.

**Conclusion.** Intraoperative optic fluoroscopic navigation based on anatomic landmark registration to preoperative 3D-CT spine images enables precise pedicle screw placement.

**Key Words:** adolescent idiopathic scoliosis, computer-assisted surgery, navigation, pedicle screw, spine deformity.

Для цитирования: Виссарионов С.В., Шредер Дж.Е., Новиков С.Н., Кокушин Д.Н., Белянчиков С.М., Каплан Л. Применение трехмерной навигации в хирургическом лечении детей с идиопатическим сколиозом // Хирургия позвоночника. 2015. Т. 12. № 1. С. 14–20.

DOI: <http://dx.doi.org/10.14531/ss2015.1.14-20>.

Please cite this paper as: Vissarionov SV, Schroeder JE, Novikov SN, Kokushin DN, Belyanchikov SM, Kaplan L. The utility of 3-dimensional navigation in the surgical treatment of children with idiopathic scoliosis. *Hir. Pozvonoc.* 2015;12(1):14–20. In Russian.

DOI: <http://dx.doi.org/10.14531/ss2015.1.14-20>.

Хирургическая коррекция идиопатического сколиоза у пациентов детского возраста с деформацией более 45° или с искривлением, не поддающимся лечению при помощи корсета, стала на западе стандартом лечения [1]. Коррекция деформации инструментарием с транспедикулярными винтами и ламинарными крючками заменила фиксацию стержнем с проволочками, что позволяет достигать лучшей коррекции, стабилизации и фиксации всех трех позвоночных столбов при снижении процента несостоятельности фиксации. Кроме того, доказано, что применение спинальных металлоконструкций с транспедикулярными винтами сокращает необходимость в осуществлении передних доступов, даже при крайне тяжелых формах деформации [2]. Но этот метод требует высокой квалификации хирурга, особенно при установке винтов в деформированные позвонки, входящие в сколиотическую дугу искривления. В литературе описаны случаи некорректной установки винтов более чем в 10 % наблюдений [3]. Неудачная установка винтов может приводить к серьезным осложнениям, в том числе к перфорации ножки дужки, миграции канала и травмированию нервных корешков, что заставляет хирургов использовать ламинарные и педикулярные крючки в качестве опорных элементов при фиксации грудного отдела позвоночника [4, 5].

Точность установки транспедикулярных винтов у детей с идиопатическим сколиозом могут повышать такие новые методы, как компьютерная навигация и роботизированные системы. Публикации последних лет свидетельствуют о том, что применение компьютерной навигации может повышать точность установки транспедикулярных винтов в 1,7–3 раза [6, 7]. Компьютерная навигация может выполняться на базе двумерной или трехмерной флюороскопии, трехмерной КТ с регистрацией по анатомическим ориентирам или интраоперационной 3D-КТ-навигации [8]. Доказано, что интраоперационная 3D-КТ-навигация обеспечивает наи-

большую точность и может считаться эталонным методом навигации для использования при установке транспедикулярных винтов во время операции [8, 9]. Однако высокая стоимость оборудования, ограниченная доступность систем интраоперационной КТ, высокий риск инфицирования операционного поля и увеличение воздействия на пациента ионизирующего облучения при использовании технологии многосрезовой КТ ограничивали ее применение.

Цель исследования – оценка точности установки транспедикулярных винтов при использовании 3D-навигации на базе КТ с интраоперационным рентген-контролем и сравнение ее с точностью, достигаемой при установке винтов методом freehand.

### Материал и методы

В исследование включали детей 12–18 лет, перенесших хирургическую коррекцию с января 2009 по февраль 2012 г. после несостоятельного консервативного лечения (корсет) по поводу идиопатического сколиоза грудной и грудопоясничной локализации с применением заднего инструментария только с транспедикулярными винтами. Пациенты были распределены в две когорты: в первую входили дети, оперированные с использованием 3D-КТ-навигации с интраоперационным рентгеноскопическим контролем установки винтов, во вторую – пациенты, которым винты устанавливали по методу freehand. Анализировали рентгенологические и клинические данные. Они включали результаты обследования и демографическую информацию о пациенте, а также подробное описание процедуры регистрации и ее результатов (время, потребовавшееся для регистрации, число и расположение инструментированных позвонков, число выполненных регистраций, время, потребовавшееся для формирования костного канала для транспедикулярного винта, погрешности регистрации, фиксируемые в опера-

ционной сотрудником, ответственным за навигацию). Данные записывали с помощью программы «Microsoft Excel 2010». Экспертный совет организации одобрил план исследования и отменил требование информированного согласия в связи с амбиспективным типом исследования.

### *Операции, выполняемые с использованием трехмерной навигации при установке винтов*

Пациентам, перенесшим операцию с трехмерной навигацией, выполняли предоперационную многосрезовую КТ позвоночника на уровнях от T<sub>1</sub> до S<sub>1</sub>. С целью максимальной приближенности пациента на операционном столе сканирование осуществляли в его положении на животе. Параметры исследования были следующие: толщина среза 1,0 мм, размер матрицы поля зрения – 512 на 512 пикселей. Данные КТ-исследования экспортировали в компьютерно-навигационную систему с программным обеспечением «SpineMar3D» (рис. 1) для их обработки, предоперационного планирования и регистрации во время операции.

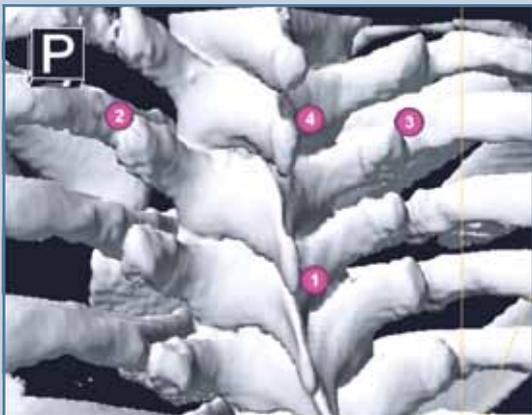
Пациента укладывали на операционный стол в положении на животе и под эндотрахеальным наркозом выполняли дорсальный хирургический доступ. Затем осуществляли установку навигационной системы. Инфракрасная следящая камера при этом размещалась со стороны нижних конечностей пациента. Трекер пациента (нулевой трекер) устанавливали на остистом отростке позвонка на расстоянии 1–2 позвонков каудальнее самого нижнего уровня установки педикулярных винтов (рис. 2). Выполняли интраоперационную регистрацию референтных точек по 3 или 4 анатомическим ориентирам с использованием предоперационных компьютерных томограмм. В качестве референтных точек в грудном отделе позвоночника использовали середину вершины остистого и поперечных отростков регистрируемого позвонка и середину вершины остистого отростка вышележащего позвонка (рис. 3). В поясничном



**Рис. 1**  
Навигационная система



**Рис. 2**  
Трекер пациента (нулевой трекер), установленный на остистый отросток в грудном отделе позвоночника



**Рис. 3**  
Предоперационное планирование референтных точек по анатомическим ориентирам

отделе в качестве точек для регистрации выбирали середину вершины остистого отростка планируемого позвонка, середину дугоотростчатого сустава между регистрируемым и вышележащим позвонками с обеих сторон, середину вершины остистого отростка вышележащего позвонка.

Предоперационное планирование выполняли на всех позвонках, подлежащих инструментализации. После этого, перед началом формирования костных каналов для установки транспедикулярных винтов, выполняли подтверждение анатомических костных ориентиров и коррекцию с учетом каких-либо различий в положении пациента, с целью достижения максимально возможной точности. Если точность регистрации оценивалась как высокая (среднеквадратическая погрешность менее 1,0 мм), приступали к формированию костных каналов для транспедикулярных винтов под навигационным контролем. Если среднеквадратическая погрешность была больше 1,0 мм, выполняли дополнительную регистрацию по поверхности задних костных структур позвонка.

Рассчитывали среднеквадратическую погрешность точности регистрации. Через основание дуг тела позвонков на всех уровнях маркировали рентгенологическими метками и выполняли рентгенограммы позвоночника в прямой и боковой проекциях. Фиксировали время, необходимое для регистрации и навигации, в том числе для установки нулевого трекера, проверки готовности инструментария и формирования костного канала в теле позвонка для установки транспедикулярного винта, а также созданных каналов.

#### *Операции, выполняемые с установкой винтов методом freehand*

В группе использования метода freehand для установки винтов в ножках дужек формировали отверстия с использованием стандартных анатомических ориентиров, с помощью шила и зонда для контроля сформированного костного канала, проводимого вручную. Регистрировали время, необходимое для подготовки костного канала для транспедикулярного винта, с момента установки шила в точку введения винта до окончания верификации канала зондом.

При использовании обоих методов целостность ножки дуги верифицировали с помощью зонда с шариковым наконечником. В случаях сомнительной проходимости канала по стенкам ножки дужки проходили миостимулятором, при этом величина стимулирующего импульса менее 7 мм свидетельствовала о наличии трещины. При подозрениях на перелом выполняли репозиционирование траектории вручную. Затем устанавливали транспедикулярные винты, фиксировали стержни и осуществляли коррекцию деформации с использованием стандартных методов.

#### *Статистические методы*

Авторы оценивали статистическую значимость результатов по критерию хи-квадрат или по точному критерию Фишера. Анализ выполняли с помощью программ «Microsoft Excel 2010» (Microsoft, Redmond, WA, USA), «OpenEpi calculator, version 2.3» ([www.openepi.com](http://www.openepi.com)) и «SPSS Software 22.0» (IBM, Chicago, IL, USA). Результаты статистического анализа считали значимыми при  $p < 0,05$ .

## Результаты

### Пациенты

В исследовании участвовали 62 пациента с идиопатическим сколиозом грудной и грудопоясничной локализации, из них 32 (52,6 %) пациента в группе навигации и 30 (48,4 %) в группе метода freehand. Среди пациентов было 54 (87,1 %) девушки и 8 (12,9 %) юношей, средний возраст 15,1 года (от 12 до 18 лет). Демографические характеристики в обеих группах были аналогичны. Средняя величина искривления достигала 70° (от 52 до 80°) в группе навигации и 65° (от 55 до 75°) в группе метода freehand (разница незначительна). Период послеоперационного наблюдения варьировал от 19 до 36 мес. (в среднем 31 мес.).

### Установка инструментария в группе навигации

Общее количество позвонков, подвергнутых инструментализации, – 367,

количество установленных транспедикулярных винтов – 710. Винты устанавливались в зоне от T<sub>2</sub> до L<sub>4</sub> позвонков, при этом краниальная граница установки локализовалась на T<sub>2</sub> позвонке у 2 пациентов, на T<sub>3</sub> – у 5, на T<sub>4</sub> – у 11, на T<sub>5</sub> – у 14. Каудальная граница фиксации находилась на уровне L<sub>1</sub> позвонка у 5 пациентов, L<sub>2</sub> – у 14, L<sub>3</sub> – у 8, и L<sub>4</sub> – у 5. Всего в верхнегрудном отделе позвоночника (T<sub>2</sub>–T<sub>7</sub>) установлено 49 (6,9 %) винтов, в среднегрудном (T<sub>7</sub>–T<sub>9</sub>) – 246 (34,7 %), в нижнегрудном (T<sub>9</sub>–T<sub>12</sub>) – 259 (36,5 %), в поясничном – 156 (22,0 %). Установка транспедикулярных винтов осуществляли в направлении от поясничного к грудному отделу позвоночника.

### Длительность и точность навигации

Установка нулевого трекера занимала в среднем 55 с (от 35 до 82 с). Время регистрации по анатомическим ориентирам – в среднем 94,5 с на один позвонок (от 30 до 176 с). Время

формирования костных каналов для транспедикулярных опорных элементов по вогнутой стороне дуги искривления – от 32 до 598 с (в среднем 131,1 с), по выпуклой стороне – от 30 до 380 с (в среднем 129,5 с; табл.).

Среднеквадратичная точность регистрации колебалась от 0,3 до 1,2 мм (в среднем 0,7 мм), при этом в верхнегрудном отделе позвоночника она составила 0,5 мм (от 0,3 до 1,1 мм), в среднегрудном – 0,7 мм (от 0,3 до 1,1 мм), в нижнегрудном – 0,8 мм (от 0,3 до 1,2 мм), в поясничном – 0,7 мм (от 0,5 до 1,1 мм).

В поясничном и в нижнегрудном отделах одна регистрация обеспечивала достаточную степень точности формирования каналов для установки транспедикулярных винтов на двух уровнях в 18 (56,3 %) случаях из 32, на трех уровнях в 9 (28,1), на четырех уровнях – в 4 (12,5 %). В среднегрудном отделе регистрация требовалась на каждом уровне у 25 (80,0 %) из 32

Таблица

Сравнение длительности регистрации и формирования канала при 3D-навигации и методе freehand

Позвонки	3D-навигация			Метод freehand		Разница (3D навигация – метод freehand)	
	Время регистрации, с	Время формирования канала, с (диапазон)		Время формирование канала, с (диапазон)		Средняя разница во времени	p
		Вогнутая сторона	Выпуклая сторона	Вогнутая сторона	Выпуклая сторона		
T <sub>2</sub>	30,0	71,0	42,0				
T <sub>3</sub>	49,0	106,4 (43–198)	120,6 (91–178)				
T <sub>4</sub>	153,3	118,2 (52–285)	199,8 (183–238)				
T <sub>5</sub>	114,9	94,5 (39–175)	182,9 (78–319)				
T <sub>6</sub>	87,2	153,3 (46–341)	160,5 (97–270)				
T <sub>7</sub>	128,6	146,1 (32–300)	146,3 (30–380)				
T <sub>8</sub>	86,3	153,5 (71–356)	146,0 (35–299)				
T <sub>9</sub>	144,5	137,8 (54–395)	103,3 (35–174)	180,1 (65–295)	131,5 (48–215)	37,00	<0,001
T <sub>10</sub>	81,7	132,1 (50–328)	112,2 (45–200)	155,3 (75–248)	144,8 (56–213)	12,95	Не имеет существенного значения
T <sub>11</sub>	176,3	92,9 (37–180)	158,6 (76–284)	140,9 (48–225)	164,6 (69–258)	61,15	<0,001
T <sub>12</sub>	71,8	123,9 (43–234)	157,0 (71–310)	84,9 (41–125)	171,0 (74–273)	48,40	<0,001
L <sub>1</sub>	90,3	129,7 (90–180)	137,8 (73–184)	131,7 (93–184)	137,9 (79–196)	44,10	<0,001
L <sub>2</sub>	83,4	279,0 (108–589)	88,0 (40–140)	183,4 (98–263)	145,4 (87–175)	60,80	<0,001
L <sub>3</sub>	75,3	135,4 (88–165)	98,0 (36–160)	136,7 (83–175)	99,5 (53–145)	36,25	<0,001
L <sub>4</sub>	45,0	92,4 (51–112)	89,6 (43–115)	81,2 (43–115)	73,7 (48–95)	36,05	<0,001
Среднее время	94,5	131,1	129,5	136,8	131,1	42,09	<0,001

пациентов, на каждом втором уровне у 7 (20,0 %). В верхнегрудном отделе регистрация по анатомическим ориентирам для установки транспедикулярных винтов выполнялась на каждом уровне у всех 18 пациентов.

Для оценки точности траектории установки винтов на всех уровнях применяли интраоперационную рентгенографию в переднезадней и боковой проекциях с маркировкой ножек дужек. Целостность ножек дужки позвонка была нарушена при прохождении 11 из 710 траекторий (1,6 %: отношение шансов перелома 0,1577–0,6449 в сравнении с методом freehand). В 5 из 11 случаев перелома ножки дужки они были связаны с ее малыми размерами, в 4 – со склерозом, в 2 – с отклонением траектории при установке винта; при этом 7 переломов произошли на вогнутой стороне деформации. Среднее общее время выполнения процедуры составило 3,5 ч (от 2 до 7 ч). Неврологических или других осложнений и дестабилизации металлоконструкции в раннем послеоперационном и отдаленном периодах не отмечали ни у одного больного.

#### *Установка инструментария в группе метода freehand*

Всего было инструментировано 240 позвонков с установкой 470 транспедикулярных винтов, в том числе 234 (39,9 %) – в нижнегрудном отделе (Th<sub>9</sub>–T<sub>12</sub>), 236 (50,2 %) – в поясничном (L<sub>1</sub>–L<sub>4</sub>). Установку транспедикулярных винтов выполняли в направлении от поясничного к грудному отделу позвоночника.

#### *Время и точность*

Формирование канала для установки транспедикулярного винта вдоль вогнутой стороны деформации занимало в среднем 136,8 с (от 41 до 273 с;  $p < 0,0001$  в сравнении со средним значением 131,1 с в группе 3D-навигации), а формирование канала на выпуклой стороне занимало в среднем 133,6 с (от 48 до 273 с;  $p < 0,0001$  в сравнении 129,5 с в группе 3D-навигации; табл.). Целостность ножки дуги

позвонка была нарушена при прохождении 24 (5,1 %) из 470 траекторий ( $p < 0,0001$  в сравнении с 1,6 % при 3D-навигации); 8 случаев перелома произошло в поясничном отделе, 16 – в грудном. На вогнутой стороне деформации было 16 случаев переломов. Среднее общее время выполнения процедуры составило 3,2 ч (от 2 до 6 ч; разница с группой навигации незначительна). Неврологических, инфекционных осложнений и дестабилизации металлоконструкции в раннем послеоперационном и отдаленном периодах не отмечали ни у одного больного.

#### *Коррекция искривления позвоночника*

Средняя послеоперационная коррекция искривления составила 72,0 % в среднем до величины 19,2° (от 10 до 35°) в группе навигации, 67,5% в среднем до величины 22,7° (от 15° до 35°) в группе freehand (разница незначима). Ни в одной из групп не отмечалось потери коррекции в отдаленном периоде наблюдения.

#### **Обсуждение**

Хирургия идиопатического сколиоза у детей осложняется комбинацией деформационных и торсионных изменений анатомии позвонков и малым диаметром ножки дуги. Точность установки транспедикулярных винтов при выполнении хирургической коррекции идиопатического сколиоза относительно низка в сравнении с точностью, достигаемой при лечении травм и дегенеративных заболеваний позвоночника [10]. Коррекция сколиоза в грудном отделе позвоночника еще более трудна. Кроме крайне деформированной анатомии позвоночника и торсионных изменений, хирург часто сталкивается с малыми размерами ножек дуг позвонков и их склерозом, в основном на высоте искривления. Сами по себе малые размеры ножек дуг у детей являются причиной частых случаев нарушения их целостности [11]. Отклонение фактической траектории канала от планируемой приводит к мальпозиции винта, что может вызывать поврежде-

ния спинного мозга и нервных корешков или нестабильность металлоконструкции [12]. В данном исследовании смещение траекторий транспедикулярных винтов наблюдалось в 5,1 % выполненных каналов при установке винтов методом freehand.

Это диктует крайнюю необходимость в разработке методов, которые могли бы помочь повысить точность введения транспедикулярных винтов, что позволит снизить риск осложнений и повысить стабильность и надежность фиксации. В данном исследовании навигация выполнялась на основе предоперационного 3D-КТ-сканирования, выполняемого пациенту в положении лежа на животе, и совмещалась с интраоперационным рентген-контролем для повышения точности установки транспедикулярных винтов и для подтверждения достигаемой точности. При таком подходе авторам удалось правильно подготовить траекторию для 699 (98,9 %) из 710 планируемых каналов ( $p < 0,001$  в сравнении с 94,9 % при использовании техники freehand). Электромиостимуляция, применяемая для проверки сомнительных траекторий введения транспедикулярных винтов, обладала высокой степенью отрицательной корреляции с медальной мальпозицией винтов [13, 14].

Чаще всего для верификации проведения транспедикулярных винтов используется двумерный рентген-контроль по методу freehand, благодаря его простоте и широкой доступности интраоперационных систем. Однако этот метод имеет ряд недостатков. Самым главным из них является относительно высокая лучевая нагрузка, связанная с необходимостью верификации введения винтов, что особенно важно в популяции детей с идиопатическим сколиозом. Кроме того, опубликованные данные о точности установки винтов с применением флюоронавигации сильно различаются. По данным Belmont et al. [15], Amiot et al. [16] и Nottmeier et al. [17], случаи с мальпозициями транспедикулярных винтов колеблются от 7 до 54 %, а случаи с неврологическими осложнени-

ями – от 5 до 7 % [15–17]. Оптические системы навигации способствуют значительному повышению точности введения транспедикулярных винтов. Двумерная флюоронавигация сокращает лучевую нагрузку в 10–12 раз в сравнении с рентген-контролем [18]. Кроме того, она позволяет осуществлять в реальном времени контроль за введением винтов в нескольких плоскостях, что повышает точность и экономит время. Существенным недостатком 2D-флюоронавигации является двумерный характер получаемой информации, что снижает возможности интраоперационного планирования траекторий введения винтов.

В последнее время наиболее широкую популярность в клинической практике получили методы 3D-навигации. Согласно метаанализу, выполненному Tian, Xu [15] в 2011 г., методы 3D-навигации обладают достоверными преимуществами с точки зрения точности проведения транспедикулярных опорных элементов конструкции перед установкой винтов под 2D-флюороскопическим контролем. Точность установки винтов с 3D-навигационной ассистенцией достигала 96,7 %. Такой уровень точности согласуется с данными, полученными авторами в представленном исследовании, когда правильная подготовка канала достигалась в 98,4 % наблюдений.

Еще большую ценность преимущества 3D-навигации приобретают при установке транспедикулярных винтов в грудном отделе позвоночника. В 2000 г. Amiot et al. [16] показали, что 3D-навигация обеспечивала точное введение в ножку дуги грудного позвонка 95 % винтов, по сравнению с 85 % винтов, вводимых методом freehand под рентген-контролем. Аналогичное улучшение описано в работе Laine et al [19] с сокращением встречаемости перфорации ножки дуги с 13,4 % при рентген-контроле до 4,6 % при использовании 3D-навигации. Kotani et al. [20] сообщали о подобном сокращении случаев перфорации с 11,0 до 1,8 % с помощью

применения 3D-навигации. Основным недостатком 3D-навигации является субоптимальное качество интраоперационных изображений, особенно у пациентов с остеопорозом, избыточным весом или тяжелыми формами деформации позвоночника [21]. К тому же, в связи с малым диаметром искателя в 3D-системах низкого качества, в случаях установки винтов на большом количестве уровней требуется многократное сканирование, что приводит к увеличению длительности операции и лучевой нагрузки на пациентов с идиопатическим сколиозом [22]. Конструктивные особенности систем существенно затрудняют проведение сбора информации в режиме 3D у пациентов с большой массой тела или тяжелыми формами деформации [23].

Трехмерная навигация при совместном использовании интраоперационной КТ особенно эффективна. Так как КТ выполняется после укладки пациента для операции, тщательная регистрация может обеспечивать высокий уровень точности введения винтов. Однако высокая стоимость системы и ограниченные возможности установки томографа непосредственно в операционной ограничивают применение интраоперационной КТ [24]. Хорошей альтернативой может быть 3D-КТ-навигация на основе данных предоперационной КТ позвоночника. Однако даже малейшие различия между положениями пациента на столе КТ и на операционном столе могут приводить к погрешностям навигации и неточностям при введении винтов. Применение 3D-навигации на основе предоперационной КТ диктует необходимость обязательной регистрации по анатомическим ориентирам, что может существенно увеличить время операции. По опыту авторов, общее увеличение длительности операции в результате интраоперационной регистрации уравнивается экономией времени при выполнении каналов под навигационным контролем, в сравнении с freehand методом, что в итоге оставляет неизменной

длительность всей хирургической процедуры.

Обнадеживающе выглядят полученные данные о точности регистрации по четырем анатомическим ориентирам на основе предоперационной КТ с использованием системы оптической навигации с нулевым треке-ром: среднеквадратичная погрешность при вмешательствах на грудном отделе позвоночника составила 0,3–1,1 мм (в среднем 0,5 мм), на поясничном – 0,5–1,1 мм (в среднем 0,7 мм).

Навигационная ассистенция на основе предоперационной КТ обладает следующими принципиальными достоинствами: создает условия для ощутимого снижения интраоперационной лучевой нагрузки, не увеличивает риска инфекционных осложнений, связанных с контаминацией операционного поля при выполнении интраоперационной КТ, отличается чрезвычайно высокой экономичностью за счет отсутствия затрат на дополнительные КТ-системы. Негативным аспектом предоперационного обследования является излишняя лучевая нагрузка на пациента. Решению этой существенной проблемы должно помочь применение современных КТ-сканеров с минимальным излучением и разумное использование рентгенографии в операционной [25].

Представленное исследование имеет ряд ограничений, так как носит амбиспективный характер. Число пациентов сравнительно небольшое, данные о величине деформаций осредненные. Кроме того, не представлены данные послеоперационного КТ-сканирования для верификации установки винтов и доказательства улучшенных отдаленных исходов. Несмотря на эти недостатки, тот факт, что с применением описанного метода значительное повышение точности было достигнуто при установке более чем 700 винтов, показывает его преимущества.

## Заключение

Применение оптической навигации с использованием предоперационных

3D-КТ-изображений и регистрацией по анатомическим ориентирам позвоночника позволяет достигать высо-

кой точности установки транспедикулярных винтов при ограничении лучевой нагрузки и с незначительным

увеличением длительности операции для пациентов детского возраста с идиопатическим сколиозом.

## Литература/References

1. **Westrick ER, Ward WT.** Adolescent idiopathic scoliosis: 5-year to 20-year evidence-based surgical results. *J Pediatr Orthop* 2011;31(1 Suppl):S61–8.
2. **Suk SI, Kim JH, Kim SS, et al.** Pedicle screw instrumentation in adolescent idiopathic scoliosis (AIS). *Eur Spine J* 2012;21:13–22.
3. **Li G, Lv G, Passias P, et al.** Complications associated with thoracic pedicle screws in spinal deformity. *Eur Spine J* 2010;19:1576–84.
4. **Liljenqvist UR, Halm HF, Link TM.** Pedicle screw instrumentation of the thoracic spine in idiopathic scoliosis. *Spine (Phila Pa 1976)* 1997;22:2239–45.
5. **Yingsakmongkol W, Hangsaphuk N, Lerdlam S.** The accuracy of pedicle screw placement in thoracic spine using the Funnel technique in idiopathic scoliosis. *J Med Assoc Thai* 2007;90:96–105.
6. **Ishikawa Y, Kanemura T, Yoshida G, et al.** Clinical accuracy of threedimensional fluoroscopy-based computer-assisted cervical pedicle screw placement: a retrospective comparative study of conventional versus computer-assisted cervical pedicle screw placement. *J Neurosurg Spine* 2010;13:606–11.
7. **Tian NF, Xu HZ.** Image-guided pedicle screw insertion accuracy: a meta-analysis. *Int Orthop* 2009;33:895–903.
8. **Tian NF, Huang QS, Zhou P, et al.** Pedicle screw insertion accuracy with different assisted methods: a systematic review and metaanalysis of comparative studies. *Eur Spine J* 2011;20:846–59.
9. **Tormenti MJ, Kostov DB, Gardner PA, et al.** Intraoperative computed tomography image-guided navigation for posterior thoracolumbar spinal instrumentation in spinal deformity surgery. *Neurosurg Focus* 2010;28:E11.
10. **Zhu F, Sun X, Qiao J, et al.** Misplacement pattern of pedicle screws in pediatric patients with spinal deformity: a computed tomography study. *J Spinal Disord Tech* 2013 Nov 5 [Epub ahead of print].
11. **Larson AN, Santos ER, Polly Jr DW, et al.** Pediatric pedicle screw placement using intraoperative computed tomography and 3-dimensional image-guided navigation. *Spine (Phila Pa 1976)* 2012;37:E188–94.
12. **Mac-Thiong JM, Parent S, Poitras B, et al.** Neurological outcome and management of pedicle screws misplaced totally within the spinal canal. *Spine (Phila Pa 1976)* 2013;38:229–37.
13. **Raynor BL, Lenke LG, Kim Y, et al.** Can triggered electromyograph thresholds predict safe thoracic pedicle screw placement? *Spine (Phila Pa 1976)* 2002;27:2030–5.
14. **Shi YB, Binette M, Martin WH, et al.** Electrical stimulation for intraoperative evaluation of thoracic pedicle screw placement. *Spine (Phila Pa 1976)* 2003;28:595–601.
15. **Belmont Jr PJ, Klemme WR, Dhawan A, et al.** In vivo accuracy of thoracic pedicle screws. *Spine (Phila Pa 1976)* 2001;26:2340–6.
16. **Amiot LP, Lang K, Putzier M, et al.** Comparative results between conventional and computer-assisted pedicle screw installation in the thoracic, lumbar, and sacral spine. *Spine (Phila Pa 1976)* 2000;25:606–14.
17. **Nottmeier EW, Seemer W, Young PM.** Placement of thoracolumbar pedicle screws using three-dimensional image guidance: experience in a large patient cohort. *J Neurosurg Spine* 2009;10:33–9.
18. **Luther N, Iorgulescu JB, Geannette C, et al.** Comparison of navigated versus non-navigated pedicle screw placement in 260 patients and 1434 screws: screw accuracy, screw size, and the complexity of surgery. *J Spinal Disord Tech* 2013 Nov 6 [Epub ahead of print].
19. **Laine T, Lund T, Ylikoski M, et al.** Accuracy of pedicle screw insertion with and without computer assistance: a randomised controlled clinical study in 100 consecutive patients. *Eur Spine J* 2000;9:235–40.
20. **Kotani Y, Abumi K, Ito M, et al.** Improved accuracy of computer-assisted cervical pedicle screw insertion. *J Neurosurg* 2003;99(3Suppl):257–63.
21. **Jarvers JS, Katscher S, Franck A, et al.** 3D-based navigation in posterior stabilisations of the cervical and thoracic spine: problems and benefits: results of 451 screws. *Eur J Trauma Emerg Surg* 2011;37:109–19.
22. **Larson AN, Polly Jr DW, Guidera KJ, et al.** The accuracy of navigation and 3D image-guided placement for the placement of pedicle screws in congenital spine deformity. *J Pediatr Orthop* 2012;32:e23–9.
23. **Rajan VV, Kamath V, Shetty AP, et al.** Iso-C3D navigation assisted pedicle screw placement in deformities of the cervical and thoracic spine. *Indian J Orthop* 2010;44:163–8.
24. **Marcus HJ, Cundy TP, Nandi D, et al.** Robot-assisted and fluoroscopy-guided pedicle screw placement: a systematic review. *Eur Spine J* 2014;23:291–7.
25. **Tumur O, Soon K, Brown F, et al.** New scanning technique using adaptive statistical iterative reconstruction (ASIR) significantly reduced the radiation dose of cardiac CT. *J Med Imaging Radiat Oncol* 2013;57:292–6.

### Адрес для переписки:

Виссарионов Сергей Валентинович  
196603, Санкт-Петербург, Пушкин,  
ул. Парковая, 64–68,  
НИДОИ им. Г.И. Турнера,  
turner01@mail.ru

### Address correspondence to:

Vissarionov Sergey Valentinovich  
The Turner Scientific and Research Institute  
for Children's Orthopaedics,  
Parkovaya str., 64–68,  
Pushkin, Saint-Petersburg 196603, Russia,  
turner01@mail.ru

Статья поступила в редакцию 02.06.2014

Сергей Валентинович Виссарионов, д-р мед. наук; Дмитрий Николаевич Кокушин, науч. сотрудник; Сергей Михайлович Белянчиков, канд. мед. наук, Научно-исследовательский детский ортопедический институт им. Г.И. Турнера, Санкт-Петербург; Джошуа Е. Шредер, Госпиталь специальной хирургии, Нью-Йорк, США; Сергей Николаевич Новиков, д-р мед. наук, НИИ онкологии им. Н.Н. Петрова, Санкт-Петербург; Леон Каплан, рук. центра спинальной хирургии, Медицинский центр «Хадасса» Еврейского университета, Иерусалим, Израиль.

Sergey Valentinovich Vissarionov, MD, DMSc; Dmitry Nikolayevich Kokushin, researcher; Sergey Mikhailovich Belyanchikov, MD, PhD, The Turner Research Institute for Children's Orthopaedics, St. Petersburg, Russia; Joshua E. Schroeder, MD Department of Spine Surgery, Hospital for Special Surgery, New York, NY, USA; Sergey Nikolayevich Novikov, MD, DMSc, N.N. Petrov Institute of Oncology, St. Petersburg, Russia; Leon Kaplan, MD, Spine Surgery Unit, Department of Orthopedic Surgery, Hadassah-Hebrew University Medical Center, Jerusalem, Israel.