

ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ НАВИГАЦИОННЫЕ НАПРАВИТЕЛИ ПРИ ИМПЛАНТАЦИИ ВИНТОВ В ПОЯСНИЧНОМ ОТДЕЛЕ ПО СУБКОРТИКАЛЬНОЙ ТРАЕКТОРИИ

DOI: 10.17691/stm2021.13.5.05
 УДК 616.711.6–089.843:004.891.3
 Поступила 19.03.2021 г.



Р.А. Коваленко, к.м.н., ассистент кафедры нейрохирургии;
В.А. Кашин, аспирант кафедры нейрохирургии;
В.Ю. Чербилло, д.м.н., профессор, зав. кафедрой нейрохирургии

Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. академика И.П. Павлова,
 ул. Льва Толстого, 6-8, С.-Петербург, 197022

Для субкортикальной установки винта в настоящий момент используют флюороскопию в прямой проекции или интраоперационную систему навигации O-arm. Появление новой методики спинальной навигации на основе индивидуальных навигационных направителей (матриц), созданных по технологии 3D-печати, диктует необходимость изучения безопасности и эффективности использования их при имплантации по субкортикальной траектории.

Цель исследования — оценить эффективность имплантации транспедикулярных винтов в поясничном отделе по субкортикальной траектории с использованием индивидуальных навигационных матриц в сравнении с интраоперационной флюороскопией.

Материалы и методы. Исследование основано на анализе результатов лечения 39 пациентов, которым выполнялась операция по технологии MidLIF с установкой 130 винтов по субкортикальной траектории. В 1-й группе применялись навигационные направители, во 2-й — интраоперационный флюороскопический контроль. Оценивали корректность имплантации, время имплантации, общее время операции и лучевой нагрузки.

Результаты. Средняя удаленность винта от кортикальной пластинки в группах зафиксирована в пределах 1,20–3,97 мм без статистически значимого различия ($p > 0,05$). Среднее время установки транспедикулярного винта в 1-й группе составило 137,0 [115,25; 161,50] с, во 2-й — 314,0 [183,50; 403,25] с. Зафиксировано сокращение общего времени операции с 173,0 [155,0; 192,25] мин во 2-й группе до 119,0 [108,0; 128,75] мин в 1-й группе. Для установки одного винта в 1-й группе в среднем было выполнено 1,0 [1,0; 2,0] рентгеновских снимка, во 2-й — 12,0 [10,0; 13,25] снимка. Различия между группами по времени имплантации и количеству выполненных снимков статистически значимы, $p < 0,05$.

Заключение. Использование индивидуальных навигационных направителей при субкортикальной траектории имплантации транспедикулярных винтов обеспечивает корректное позиционирование их при значительном уменьшении как времени операции, так и лучевой нагрузки с аналогичными показателями безопасности при сравнении с интраоперационной флюороскопией.

Ключевые слова: навигационная матрица; навигационный направитель; 3D-печать; субкортикальная траектория.

Как цитировать: Kovalenko R.A., Kashin V.A., Cherebillo V.Yu. Individual navigation templates for subcortical screw placement in lumbar spine. *Sovremennye tehnologii v medicine* 2021; 13(5): 41–46, <https://doi.org/10.17691/stm2021.13.5.05>

English

Individual Navigation Templates for Subcortical Screw Placement in Lumbar Spine

R.A. Kovalenko, MD, PhD, Assistant, Department of Neurosurgery;
V.A. Kashin, PhD Student, Department of Neurosurgery;
V.Yu. Cherebillo, MD, DSc, Professor, Head of the Department of Neurosurgery

Pavlov First Saint Petersburg State Medical University, 6-8 L'va Tolstogo St., Saint Petersburg, 197022, Russia

Subcortical screw placement is currently performed using frontal view fluoroscopy or intraoperative O-arm navigation system. The emergence of a novel technique for spinal navigation based on individual navigation templates created using 3D printing technology determines the need to study their safety and effectiveness in subcortical implantation.

Для контактов: Коваленко Роман Александрович, e-mail: romanvmeda@mail.ru

The aim of the study was to evaluate and compare the efficacy of subcortical implantation of pedicle screws in the lumbar spine using individual navigation templates versus intraoperative fluoroscopy.

Materials and Methods. The study was based on the analysis of treatment results in 39 patients who underwent surgery with subcortical implantation of 130 screws using the MidLIF technique. In group 1, navigation templates were used, in group 2 — intraoperative fluoroscopic control. Comparative analysis of implantation correctness and time, the total operation time, and radiation load was performed.

Results. The mean distance between the screw and the cortical plate recorded in the groups ranged within 1.20–3.97 mm, without statistically significant difference ($p>0.05$). The mean time of pedicle screw implantation was 137.0 [115.25; 161.50] s in group 1 and 314.0 [183.50; 403.25] s in group 2. The total operation time was reduced from 173.0 [155.0; 192.25] min in group 2 to 119.0 [108.0; 128.75] min in group 1. The average of 1.0 [1.0; 2.0] X-ray image was performed to place one screw in group 1, while it was 12.0 [10.0; 13.25] in group 2. The differences between the groups in terms of implantation time and radiation load were statistically significant ($p<0.05$).

Conclusion. Compared with intraoperative fluoroscopy, the use of individual navigation templates for subcortical implantation of pedicle screws provides their correct positioning with a significant reduction in both operation time and radiation load at similar safety.

Key words: navigation template; navigation guide; 3D printing; subcortical trajectory.

Введение

Основными преимуществами субкортикальной траектории, применяемой для установки транспедикулярных винтов, по сравнению с классической является более прочная фиксация и более медиальное расположение точки ввода, что позволяет уменьшить зону диссекции и делает доступ менее объемным и травматичным по сравнению с классическим срединным доступом. Считается, что более прочная фиксация достигается за счет близости винта к кортикальному слою кости на всем его протяжении [1–7]. Для субкортикальной установки винта в настоящий момент задействуют флюороскопию в прямой проекции или интраоперационную систему навигации O-arm.

Одним из направлений использования 3D-печати в хирургии позвоночника является применение индивидуальных навигационных направителей (ИНН), позволяющих выполнять имплантацию транспедикулярных винтов с высокой точностью и безопасностью. Некоторыми авторами [8–10] проводился анализ возможностей применения этой инновационной технологии при имплантации винтов по субкортикальной траектории, однако сравнения результатов использования данной методики и интраоперационной флюороскопии в рандомизированном исследовании нами не обнаружено.

Цель исследования — оценить эффективность имплантации транспедикулярных винтов в поясничном отделе по субкортикальной траектории с использованием индивидуальных навигационных направителей, созданных по технологии 3D-печати, в сравнении с интраоперационной флюороскопией.

Материалы и методы

Проанализированы результаты имплантации 130 транспедикулярных винтов, установленных 39 пациентам в возрасте от 37 лет до 71 года при декомпрессивно-стабилизирующих операциях в пояснично-крестцовом отделе позвоночника по технологии MidLIF.

Исследование выполнено в соответствии с принципами Хельсинкской декларации (2013) и одобрено Этическим комитетом Первого Санкт-Петербургского государственного медицинского университета им. академика И.П. Павлова. От всех пациентов получено информированное согласие.

Винты устанавливали по субкортикальной траектории: от нижнемедиального к верхнелатеральному направлению ножки позвонка (рис. 1).

Рандомизацией по методу случайных чисел сформированы две группы пациентов: 1-я группа — имплантация с помощью ИНН ($n=19$), 66 винтов; 2-я группа — имплантация с интраоперационным флюороскопическим контролем ($n=20$), 64 винта.

Для формирования хода в ножке позвонка применяли сверло диаметром 2 мм или высокооборотистую дрель с бором 1–2 мм. Имплантировали полиаксиальный винт диаметром 4,35 мм и длиной 35–40 мм. При использовании ИНН планирование траектории проводили по принципу максимальной близости винта к кортикальному слою ножки, с локализацией его верхушки под замыкательной пластиной в ее латеральной части.

В 1-й группе в 5 случаях применяли монолатеральные одноуровневые ИНН, в 14 случаях — билатеральные одноуровневые ИНН. В качестве опорной площадки задействована часть дужки позвонка (рис. 2). Внутренний диаметр тубуса составил 3 мм, внешний — 5 мм. Два базовых элемента, состоящих из опорной площадки и тубуса-направителя, соединялись поперечной балкой.

Для оценки корректности позиции винта была разработана система анализа по следующим критериям: для каждого винта в аксиальной плоскости рассчитывали минимальную дистанцию до медиального края ножки в точке ввода и дистанцию от латерального края тела позвонка до верхушки винта, в сагиттальной плоскости рассчитывали удаленность винта от нижнего края ножки в точке ввода и верхнего края тела позвонка до верхушки винта (рис. 3).

Критериями оценки в сравниваемых группах служили безопасность имплантации на основании нару-

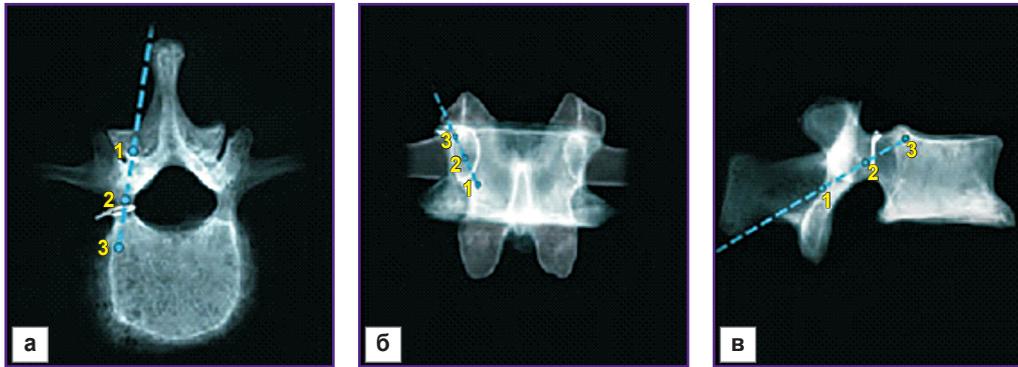


Рис. 1. Траектория введения транспедикулярного винта в поясничном отделе по субкортикальной траектории:
 а — аксиальная проекция; б — фронтальная проекция; в — сагиттальная проекция; 1 — точка ввода, 2 — середина ножки, 3 — позиция верхушки винта

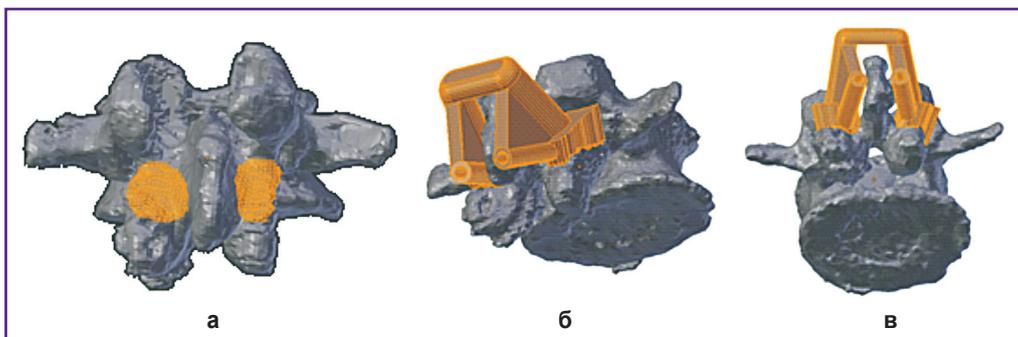


Рис. 2. Локализация опорной зоны (а) и дизайн навигационных направителей (б, в) при транспедикулярной фиксации по субкортикальной траектории

шения целостности кортикального слоя, частота осложнений, количество ревизионных вмешательств, удаленность винта от кортикального слоя, степень девиации при использовании ИНН, количество выполненных рентгеновских снимков и время, затраченное как на имплантацию, так и на всю операцию.

Фиксацию времени имплантации проводили от момента окончания оперативного доступа до установки всех винтов. В случаях, когда после прикладывания матрицы из-за неудовлетворительного контакта приходилось выполнять дополнительное скелетирование поверхности, этот период также засчитывался во время, затраченное на имплантацию.

Статистическая обработка. Полученные данные были обработаны в программе Statistica 10.0. Все используемые выборки представлены ненормальными распределениями, что подтверждено как графическими методами, так и с помощью критериев Колмогорова–Смирнова и Шапиро–Уилка. В связи с этим данные представлены в виде медианы, 1-го и 3-го квартилей. Различия между группами оценивали с помо-

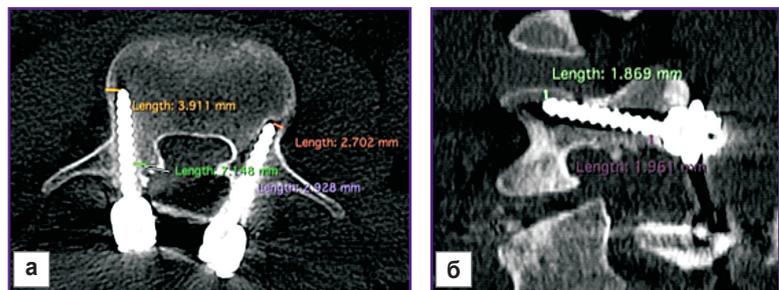


Рис. 3. Оценка корректности положения транспедикулярного винта по субкортикальной траектории:
 а — дистанция от кортикального слоя до винта в аксиальной плоскости;
 б — дистанция в сагиттальной плоскости

щью U-критерия Манна–Уитни и критерия Краскела–Уоллиса для двух независимых выборок, при этом различия считали статистически значимыми при уровне $p < 0,05$.

Результаты

По данным анализа безопасности имплантации, в 1-й группе (ИНН) выявлены четыре случая

перфорации кортикального слоя кости, один случай — краниальной перфорации ножки, два случая — перфорации латеральной стенки тела позвонка верхушкой винта, также один случай — перфорации замыкательной пластинки верхушкой винта. У одного пациента, по данным КТ, выполнена ревизия с реимплантацией (переустановкой) винта (перфорация замыкательной пластинки со значимым выходом винта в полость вышележащего межпозвонкового диска). При каудальной миграции на уровне ножки у пациента не отмечено радикальных симптомов после операции, в связи с чем винт не переустанавливался.

Во 2-й группе (флюороскопия) выявлено 5 случаев перфораций. На уровне ножки отмечено три перфорации кортикального слоя: краниальная, каудальная и латеральная. В двух случаях зафиксирован выход верхушки винта за пределы кости на уровне тела позвонка: нарушение целостности замыкательной пластинки и латеральный выход винта. Различия между группами по числу перфораций статистически не значимы. Повторные операции с целью переустановки винтов во 2-й группе не выполнялись. Различия в числе повторных операций в связи с некорректной имплантацией статистически не значимы, $p > 0,05$.

Повреждений невральных структур в обеих группах не зафиксировано.

Оценка удаленности винта от кортикального слоя в контрольных точках представлена в таблице. Отклонение точки ввода в аксиальной плоскости в латеральном направлении во многом обусловлено невозможностью введения винта в максимально медиальной точке и сохранения при этом необходимого аксиального вектора имплантации без резекции остистого отростка.

В аксиальной плоскости в области верхушки винта (см. таблицу, точка 2) получены статистически значимые различия дистанции с меньшим значением при использовании ИНН. Аналогичная тенденция отмечена и в третьей контрольной точке: в сагиттальной плоскости винт находился дальше от нижнего края ножки во 2-й группе. В конечной точке в сагиттальной плоскости значимых различий между группами не выявлено, в большинстве случаев верхушка винта рас-

полагалась в непосредственной близости к замыкательной пластинке.

Анализ девиации во всех контрольных точках показал среднее отклонение от планируемой траектории в пределах 0,9–6,3 мм, что можно расценить как приемлемый показатель с учетом морфометрических параметров ножек в поясничном отделе позвоночника. В точке ввода девиация в большей степени зарегистрирована в сагиттальной плоскости, в конечной точке — в аксиальной, разница между группами статистически не значима ($p > 0,05$).

Среднее время установки транспедикулярного винта в 1-й группе составило 137,0 [115,25; 161,50] с, во 2-й — 314,0 [183,50; 403,25] с. Среднее время операции в 1-й группе составило 119,0 [108,0; 128,75] мин, во 2-й — 173,0 [155,0; 192,25] мин ($p < 0,05$).

При установке одного винта в 1-й группе в среднем было выполнено 1,0 [1,0; 2,0] рентгеновских снимка, во 2-й группе — 12,0 [10,0; 13,25] снимка ($p < 0,05$).

Обсуждение

Субкортикальная имплантация транспедикулярных винтов в поясничном отделе позвоночника становится все более популярной ввиду меньшей инвазивности и большей прочности в сравнении с традиционной транспедикулярной фиксацией [1, 11, 12].

В настоящий момент наиболее распространено проведение винта с использованием интраоперационной флюороскопии в прямой и боковой проекциях или КТ-навигации [13]. Однако данные методики подвергают как пациента, так и медперсонал дополнительной лучевой нагрузке. Кроме того, использование интраоперационной КТ-навигации ограничено высокой стоимостью необходимого оборудования.

Активное развитие методики ИНН, изготавливаемых с помощью технологий 3D-печати, привело к множественным исследованиям ее применения во всех отделах позвоночника [14–21]. Использование направителей в поясничном отделе ограничено анатомическими особенностями данной зоны, а именно массивом паравертебральных мышц, препятствующим адекватному позиционированию ИНН при выборе классической транспедикулярной траектории имплантации [22, 23].

В связи с этим вектор применения ИНН для поясничного отдела был переориентирован на использование неклассических траекторий. Так, Z.X. Shao с соавт. [23] был предложен вариант ИНН для проведения транспедикулярно-трансдискальных винтов при фиксации одного позвоночно-двигательного сегмента. Y. Sao с соавт. [24] предложена конструкция ИНН для контралатеральной трансламинарно-трансартикулярной фиксации.

Наряду с этими исследованиями перспективным направлением является изучение использования субкортикальной траектории, при которой минимизируется давление паравертебральных мышц и, как

Удаленность имплантированного винта от кортикального слоя кости, мм (Me [Q1; Q3])

Контрольные точки	1-я группа (66 винтов)	2-я группа (64 винта)
Точка 1 — аксиальная плоскость, вход в ножку	4,64 [3,32; 5,97]	4,22 [2,57; 6,50]
Точка 2 — аксиальная плоскость, верхушка винта	0,92 [0,55; 1,23]	3,89 [2,87; 6,03]
Точка 3 — сагиттальная плоскость, вход в ножку	2,43 [1,23; 3,21]	6,26 [4,67; 7,87]
Точка 4 — сагиттальная плоскость, верхушка винта	1,04 [0,45; 1,95]	0,94 [0,45; 1,42]

следствие этого, повышается корректность аппликации ИНН.

Т. Kaito с соавт. [8] провели кадавер-исследование, которое показало высокую эффективность применения ИНН при субкортикальной имплантации. 91,4% винтов находились полностью в костных структурах, в то же время во всех случаях перфорация кортикального слоя составляла менее 2 мм.

В 2018 г. J. Kim с соавт. [9] представили клинический случай установки субкортикальных винтов, отмечая удобство данной методики и важность предоперационного планирования, указывая на важность дальнейшего изучения эффективности и точности этой методики в больших выборках.

Клиническое исследование результатов односегментарной фиксации у 11 пациентов (44 винта) демонстрируют N. Marenco с соавт. [10]. Средняя девиация траектории составила 0,91 мм, при этом отклонение степени А (<2 мм) отмечено только в двух случаях.

По данным проведенного нами исследования, применение ИНН при имплантации винтов в поясничном отделе не сопровождается повышением безопасности имплантации и не влияет на число повторных операций, связанных с некорректной установкой винтов по сравнению с использованием интраоперационной флюороскопии. Установка винтов с помощью навигационных направителей способствует достижению более корректной траектории и более близкого расположения винта к кортикальному слою кости, что гипотетически должно благоприятно сказываться на стабильности конструкции и уменьшать риск последующей резорбции кости вокруг винта. Наш опыт показал, что при использовании флюороскопического контроля (даже в случае бипланарной флюороскопии) крайне затруднительно сформировать такую траекторию имплантации, чтобы обеспечить расположение верхушки винта в непосредственной близости от кортикального слоя в двух плоскостях. Следовательно, корректность имплантации должна быть выше, чем при интраоперационной КТ-навигации, позволяющей до начала ввода оценить траекторию введения в трех плоскостях.

При планировании траектории перед хирургом встает выбор между тремя различными вариантами:

более медиальное расположение точки ввода с максимально корректными осями имплантации в совокупности с удалением части остистого отростка (рис. 4, А);

более медиальное расположение точки ввода без резекции остистого отростка, сопровождающееся уменьшением аксиального угла имплантации, т.е. более «прямолинейным» вводом винта с большей дистанцией от кортикального слоя в конечной точке (рис. 4, В);

латеральное смещение точки ввода с соблюдением корректности имплантации по другим контрольным точкам (рис. 4, С).

В ходе исследования возможностей использования

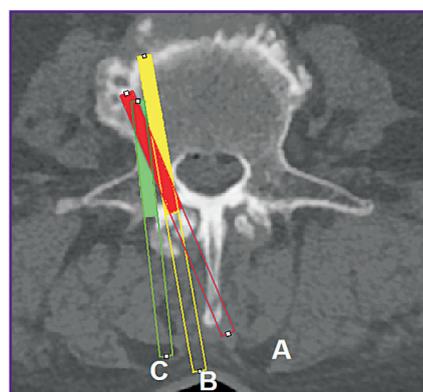


Рис. 4. Различные варианты планирования субкортикальной траектории в аксиальной плоскости в поясничном отделе позвоночника

ИНН нами были опробованы все три варианта имплантации, из которых последнему было отдано предпочтение, поскольку резекция остистого отростка может служить неблагоприятным биомеханическим фактором из-за удаления связочного аппарата, а более прямолинейная траектория связана с большей удаленностью от кортикального слоя в конечной точке.

Применение ИНН в поясничном отделе позвоночника для транспедикулярной фиксации по субкортикальной траектории сопровождается также статистически значимым уменьшением времени имплантации и лучевой нагрузки и способствует достижению более корректной траектории винта.

Заключение

Использование индивидуальных навигационных направителей при субкортикальной траектории имплантации является эффективной методикой, которая обеспечивает корректное позиционирование винтов при значительном уменьшении как времени операции, так и лучевой нагрузки с аналогичными показателями безопасности по сравнению с интраоперационной флюороскопией.

Финансирование исследования и конфликт интересов. Исследование не финансировалось какими-либо источниками, и конфликты интересов, связанные с данным исследованием, отсутствуют.

Литература/References

1. Santoni B.G., Hynes R.A., McGilvray K.C., Rodriguez-Canessa G., Lyons A.S., Henson M.A., Womack W.J., Puttlitz C.M. Cortical bone trajectory for lumbar pedicle screws. *Spine J* 2009; 9(5): 366–373, <https://doi.org/10.1016/j.spinee.2008.07.008>.
2. Mobbs R.J. The “medio-latero-superior trajectory technique”: an alternative cortical trajectory for pedicle fixation. *Orthop Surg* 2013; 5(1): 56–59, <https://doi.org/10.1111/os.12027>.
3. Dabbous B., Brown D., Tsitlakidis A., Arzoglou V. Clinical outcomes during the learning curve of MIDline

- Lumbar Fusion (MIDLF®) using the cortical bone trajectory. *Acta Neurochir (Wien)* 2016; 158(7): 1413–1420, <https://doi.org/10.1007/s00701-016-2810-8>.
4. Khanna N., Deol G., Poulter G., Ahuja A. Medialized, muscle-splitting approach for posterior lumbar interbody fusion: technique and multicenter perioperative results. *Spine (Phila Pa 1976)* 2016; 41 (Suppl 8): S90–S96, <https://doi.org/10.1097/brs.0000000000001475>.
 5. Lee G.W., Son J.H., Ahn M.W., Kim H.J., Yeom J.S. The comparison of pedicle screw and cortical screw in posterior lumbar interbody fusion: a prospective randomized noninferiority trial. *Spine J* 2015; 15(7): 1519–1526, <https://doi.org/10.1016/j.spinee.2015.02.038>.
 6. Takenaka S., Mukai Y., Tateishi K., Hosono N., Fuji T., Kaito T. Clinical outcomes after posterior lumbar interbody fusion: comparison of cortical bone trajectory and conventional pedicle screw insertion. *Clin Spine Surg* 2017; 30(10): E1411–E1418, <https://doi.org/10.1097/bsd.0000000000000514>.
 7. Matsukawa K., Yato Y., Imabayashi H., Hosogane N., Abe Y., Asazuma T., Chiba K. Biomechanical evaluation of fixation strength among different sizes of pedicle screws using the cortical bone trajectory: what is the ideal screw size for optimal fixation? *Acta Neurochir (Wien)* 2016; 158(3): 465–471, <https://doi.org/10.1007/s00701-016-2705-8>.
 8. Kaito T., Matsukawa K., Abe Y., Fiechter M., Zhu X., Fantigrossi A. Cortical pedicle screw placement in lumbar spinal surgery with a patient-matched targeting guide: a cadaveric study. *J Orthop Sci* 2018; 23(6): 865–869, <https://doi.org/10.1016/j.jos.2018.06.005>.
 9. Kim J., Rajadurai J., Choy W.J., Cassar L., Phan K., Harris L., Fiechter M., Mobbs R.J. Three-dimensional patient-specific guides for intraoperative navigation for cortical screw trajectory pedicle fixation. *World Neurosurg* 2019; 122: 674–679, <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2018.11.159>.
 10. Marengo N., Matsukawa K., Monticelli M., Ajello M., Pacca P., Cofano F., Penner F., Zenga F., Ducati A., Garbossa D. Cortical bone trajectory screw placement accuracy with a patient-matched 3-dimensional printed guide in lumbar spinal surgery: a clinical study. *World Neurosurg* 2019; 130: e98–e104, <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2019.05.241>.
 11. Phan K., Ramachandran V., Tran T.M., Shah K.P., Fadhil M., Lackey A., Chang N., Wu A.M., Mobbs R.J. Systematic review of cortical bone trajectory versus pedicle screw techniques for lumbosacral spine fusion. *J Spine Surg* 2017; 3(4): 679–688, <https://doi.org/10.21037/jss.2017.11.03>.
 12. Phan K., Hogan J., Maharaj M., Mobbs R.J. Cortical bone trajectory for lumbar pedicle screw placement: a review of published reports. *Orthop Surg* 2015; 7(3): 213–221, <https://doi.org/10.1111/os.12185>.
 13. Rodriguez A., Neal M.T., Liu A., Somasundaram A., Hsu W., Branch C.L. Jr. Novel placement of cortical bone trajectory screws in previously instrumented pedicles for adjacent-segment lumbar disease using CT image-guided navigation. *Neurosurg Focus* 2014; 36(3): E9, <https://doi.org/10.3171/2014.1.focus13521>.
 14. Azimi P., Yazdaniyan T., Benzel E.C., Azimi A., Montazeri A. 3D-printed navigation template in cervical spine fusion: a systematic review and meta-analysis. *Eur Spine J* 2021; 30(2): 389–401, <https://doi.org/10.1007/s00586-020-06601-6>.
 15. Elford J.H., Oxley B., Behr S. Accuracy of placement of pedicle screws in the thoracolumbar spine of dogs with spinal deformities with three-dimensionally printed patient-specific drill guides. *Vet Surg* 2020; 49(2): 347–353, <https://doi.org/10.1111/vsu.13333>.
 16. Zhang M., Li J., Fang T., Zhao J., Pan W., Wang X., Xu J., Zhou Q. Evaluation of a three-dimensional printed guide and a polyoxymethylene thermoplastic regulator for percutaneous pedicle screw fixation in patients with thoracolumbar fracture. *Med Sci Monit* 2020; 26: e920578, <https://doi.org/10.12659/msm.920578>.
 17. Бурцев А.В., Павлова О.М., Рябых С.О., Губин А.В. Компьютерное 3D-моделирование с изготовлением индивидуальных лекал для навигирования введения винтов в шейном отделе позвоночника. *Хирургия позвоночника* 2018; 15(2): 33–38, <https://doi.org/10.14531/ss2018.2.33-38>.
 18. Burtsev A.V., Pavlova O.M., Ryabikh S.O., Gubin A.V. Computer 3D-modeling of patient-specific navigational template for cervical screw insertion. *Hirurgia pozvonocnika* 2018; 15(2): 33–38, <https://doi.org/10.14531/ss2018.2.33-38>.
 19. Косулин А.В., Елякин Д.В., Корниевский Л.А., Дарковская А.М., Булатова И.А., Пашко А.А. Применение трехуровневого навигационного шаблона при грудных полупозвонках у детей старшего возраста. *Хирургия позвоночника* 2020; 17(1): 54–60, <https://doi.org/10.14531/ss2020.1.54-60>.
 20. Kosulin A.V., Elyakin D.V., Kornievskiy L.A., Darkovskaya A.M., Bulatova I.A., Pashko A.A. Application of three-level navigation template in surgery for hemivertebrae in adolescents. *Hirurgia pozvonocnika* 2020; 17(1): 54–60, <https://doi.org/10.14531/ss2020.1.54-60>.
 21. Косулин А.В., Елякин Д.В., Лебедева К.Д., Сухомлинова А.Е., Козлова Е.А., Орехова А.Е. Применение навигационного шаблона для прохождения ножки позвонка при транспедикулярной фиксации. *Педиатр* 2019; 10(3): 45–50, <https://doi.org/10.17816/ped10345-50>.
 22. Kosulin A.V., Elyakin D.V., Lebedeva K.D., Sukhomlinova A.E., Kozlova E.A., Orekhova A.E. Navigation template for vertebral pedicle passage in transpedicular screw fixation. *Pediatr* 2019; 10(3): 45–50, <https://doi.org/10.17816/ped10345-50>.
 23. Merc M., Recnik G., Krajnc Z. Lumbar and sacral pedicle screw placement using a template does not improve the midterm pain and disability outcome in comparison with free-hand method. *Eur J Orthop Surg Traumatol* 2017; 27(5): 583–589, <https://doi.org/10.1007/s00590-017-1904-1>.
 24. Lu S., Xu Y.Q., Zhang Y.Z., Li Y.B., Shi J.H., Chen G.P., Chen Y.B. Rapid prototyping drill guide template for lumbar pedicle screw placement. *Chin J Traumatol* 2009; 12(3): 177–180.
 25. Merc M., Drstvensek I., Vogrin M., Brajljih T., Recnik G. A multi-level rapid prototyping drill guide template reduces the perforation risk of pedicle screw placement in the lumbar and sacral spine. *Arch Orthop Trauma Surg* 2013; 133(7): 893–899, <https://doi.org/10.1007/s00402-013-1755-0>.
 26. Shao Z.X., Wang J.S., Lin Z.K., Ni W.F., Wang X.Y., Wu A.M. Improving the trajectory of transpedicular transdiscal lumbar screw fixation with a computer-assisted 3D-printed custom drill guide. *PeerJ* 2017; 5: e3564, <https://doi.org/10.7717/peerj.3564>.
 27. Cao Y., Zhang W., Liang Y., Feng Z., Jiang C., Chen Z., Jiang X. Translaminar facet joint screw insertion with a rapid prototyping guide template: a cadaver study. *Comput Assist Surg (Abingdon)* 2019; 24(1): 1–6, <https://doi.org/10.1080/24699322.2018.1542027>.