DOI 10.56618/2071–2693_2023_15_3_40
УДК 617–089.844

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВЫПОЛНЕНИЯ ТРАНСПЕДИКУЛЯРНОЙ ФИКСАЦИИ У ПАЦИЕНТОВ С ПОЗВОНОЧНО-СПИННОМОЗГОВОЙ ТРАВМОЙ МЕТОДОМ “СВОБОДНОЙ РУКИ” И С ПОМОЩЬЮ ОРИГИНАЛЬНОГО НАВИГАЦИОННОГО УСТРОЙСТВА

А. В. Иваненко[1], В. Д. Усиков[2], В. С. Куфтов[3], Д. Н. Монашенко[4], А. Ю. Улитин[1]

[1]РНХИ им. проф. А. Л. Поленова — филиал НМИЦ им. В. А. Алмазова,
Россия, Санкт-Петербург, ул. Маяковского, 12, 191014
[2] МТФ “Синтез”, Россия, г. Пенза, ул. Центральная 1В, 440004
[3]ГАУЗ Городская больница № 1, Россия, Брянск, ул. Камозина, 11, 241035
[4] ГБУЗ Городская больница № 26, Россия, Санкт-Петербург, ул. Костюшко, 2, 196066

РЕЗЮМЕ. Представлен ретроспективный анализ введения транспедикулярных винтов у 93 больных с повоночно-спинномозговой травмой (ПСМТ) на грудном и поясничном отделах. По технике установки винтов сформированы 2 группы: пациентам первой группы (50 человек) — установка транспедикулярных винтов проводилась методом “свободной руки” (free–hand), пациентам второй группы (43 человека) винты устанавливались с помощью разработанного нами оригинального навигационного устройства. Использование предлагаемого навигационного устройства позволило не только снизить лучевую нагрузку и время операции, но и повысить точность установки винтов до 94,2 % с минимальным отклонением от планируемых траекторий по отношению к методу “свободной руки” — 83,5 %.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: транспедикулярная фиксация, точность установки винтов, ошибки и осложнения.

Для цитирования: *Иваненко А. В., Усиков В. Д., Куфтов В. С., Монашенко Д. Н., Улитин А. Ю. Сравнительный анализ выполнения транспедикулярной фиксации у пациентов с позвоночно-спинномозговой травмой методом “свободной руки” и с помощью оригинального навигационного устройства. Российский нейрохирургический журнал им. проф. А. Л. Поленова. 2023;15(3):40–45. DOI 10.56618/2071–2693_2023_15_3_40*

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE PERFORMANCE OF TRANSPEDICULAR FIXATION IN PATIENTS WITH SPINAL CORD INJURY BY THE “FREE HAND” METHOD AND WITH THE HELP OF THE ORIGINAL NAVIGATION DEVICE

A. V. Ivanenko[1], V. D. Usykov[2], V. S. Kuftov[3], D. N. Monashenko[4], A. Yu. Ulitin[1]

[1] Russian Scientific Research Institute for Neurosurgery prof. A. L. Polenov branch Federal State Budgetary Institution «V.A. Almazov National Medical Research Center», Saint Petersburg, Mayakovskogo str. 12, 191014
[2] MTF “ Sintez”, Russia, Penza, Tsentralnaya str. 1B, 440004
[3] Bryansk City Hospital No. 1, 11 Kamozina str., Bryansk, 241035
[4] City Hospital No. 26, St. Petersburg, Kosciusko str., 2, 196066

ABSTRACT. A retrospective analysis of the introduction of transpedicular screws in 93 patients with spinal cord injury (PSMT) in the thoracic and lumbar regions is presented. According to the screw installation technique, 2 groups were formed: for patients of the first group (50 people), the installation of transpedicular screws was carried out by the “free–hand” method, for patients of the second group (43 people), the screws were installed using an original navigation device developed by us. The use of the proposed navigation device allowed not only to reduce the radiation load and the operation time, but also to increase the accuracy of the screws to 94.2 % with a minimum deviation from the planned trajectories in relation to the “free hand” method — 83.5 %.

KEY WORDS: transpedicular fixation, screw installation accuracy, errors and complications.

For citation: *Ivanenko A. V., Usykov V. D., Kuftov V. S., Monashenko D. N., Ulitin A. Yu. Comparative analysis of the performance of transpedicular fixation in patients with spinal cord injury by the “free hand” method and using an original navigation device. Rossiiskii neirokhirurgicheskii zhurnal imeni professora A. L. Polenova. 2023;15(3):40–45. DOI 10.56618/2071–2693_2023_15_3_40*

Введение.

Внутренняя фиксация, разработанная Рой-Камилом в 70-х гг. прошлого века заложила основополагающий этап в формировании одного из современных направлений транспедикулярной фиксации (ТПФ), в основе которой лежит проведение винтов через корни дуг позвонков [1]. Постепенно ТПФ легла в основу лечения нестабильных переломов позвоночника в грудном и поясничном отделах, как в нашей стране, так и за рубежом. Превосходство этой системы фиксации с точки зрения биомеханических свойств и создания благоприятных условий для сращения позвонка и возможности проведения ранней реабилитации неоднократно отмечалось авторами [2, 3]. В настоящее время — это золотой стандарт внутренней фиксации позвоночника, однако, несмотря на простоту методики, такие осложнения, как мальпозиции винтов отмечаются с довольно высокой частотой (1,7–20 %) и составляют одну из основных проблем ТПФ [4]. Неправильная установка педикулярного винта приводит к таким осложнениям, как разрыв твердой мозговой оболочки, повреждение нервов и сосудов [5]. Более того, неправильное положение винта может привести к потере фиксации, а также к нестабильности позвоночника [6].

Усовершенствование транспедикулярных конструкций и технологий их установки за счет лучшего понимания биомеханических характеристик привело к снижению частоты осложнений [7]. Хотя технические сложности могут оставаться и при тщательном предоперационном планировании, а применяемые для установки винтов навигационные шаблоны требуют определенных технических и временных ресурсов [8, 9]. Роботизированные навигационные системы значительно повышают точность введения винтов и снижают лучевую нагрузку, но они дороги в обслуживании и требуют большего времени и сил на установку по сравнению с традиционными методами [10].

Существует множество исследований, в которых сообщается о степени точного проведения педикулярных винтов [11, 12], но научных работ, изучающих и анализирующих их некорректное проведение, довольно мало.

Целью исследования является ретроспективный анализ сравнения точности установки винтов у больных с ПСМТ на грудном и поясничном отделах методом “свободной руки” и с помощью разработанного навигационного устройства.

Материал и методы.

Материалом для исследования послужил ретроспективный анализ лечения 93 пациентов (58 мужчин и 35 женщин) с осложненными переломами грудного и поясничного отделов позвоночника. Средний возраст больных 31,1±6,5 лет. Все повреждения носили нестабильный характер. Для изучения характера повреждений позвоночника и спинного мозга проводилось комплексное обследование всех пострадавших с выполнением СКТ до и после операции. У всех пациентов для фиксации применялся транспедикулярный остеосинтез. По технике установки винтов пациенты разделены на 2 группы: 50 пациентам (первая группа) — установка транспедикулярных винтов проводилась методом “свободной руки” с использованием обычных анатомических ориентиров; 43 пациентам (вторая группа) винты устанавливались с помощью оригинального навигационного устройства (патент РФ на изобретение № 211140). Группы сопоставимы по полу, возрасту, морфологическому повреждению, локализации и неврологическому статусу. По классификации AOSpine повреждения распределилась следующим образом: в первой группе с типом А3 — 5 пациентов, А4 — 34, В2 — 4, С — 7; во второй группе с типом повреждения А3 — 3, А4 — 30, В2 — 3, С — 7 пациентов. Повреждения в грудном отделе были у 11 пациентов в первой и у 10 — во второй группе. Оценка неврологического статуса при поступлении и в динамике оценивалась по шкале ASIA.

Точность установки винтов оценивалась на послеоперационной компьютерной томограмме, согласно классификации Герцбейна–Роббинса [13]: степень установки А — идеальная интрапедикулярная локализация без нарушения кортикального слоя ножки; степень В — выход винта из ножки < 2 мм; степень С выход винта из ножки < 4 мм; степень D — выход винта за кортикальный слой < 6 мм; и степень Е — винт не проходит через ножку либо нарушают кортикальный слой более 6мм в любом направлении. Если анатомические размеры корней дуг были меньше диаметра винтов при сохранении целостности внутреннего кортикального слоя корней дуг, то проведение винта относили к степени А. Статистическую обработку результатов выполняли при помощи статистического пакета программы SPSS Statistic ver. 23.

Результаты.

Оперативные вмешательства выполнялись в максимально короткие сроки от момента травмы с одновременным решением нейрохирургической и ортопедической задач. Для устранения деформации позвоночника использовали репозиционную транспедикулярную систему с установкой одного или двух винтов в тело поврежденного позвонка. В первой группе пациентам установлено 278 винтов: у 25 больных — 5 винтовая конструкция, у 23–6 винтовая, по 1 пациенту с 7 и 8 винтовой конструкцией. Во второй группе установлено 242 винта: 5-и винтовая конструкция — у 13; 6-винтовая — у 28; 7-винтовая — у 2 пациентов. По данным СКТ в двух группах после мультипланарной реконструкции проводилось планирование оперативного вмешательства, заключающееся в планировании траектории введения и размеров винтов для каждого уровня (рисунок 1).

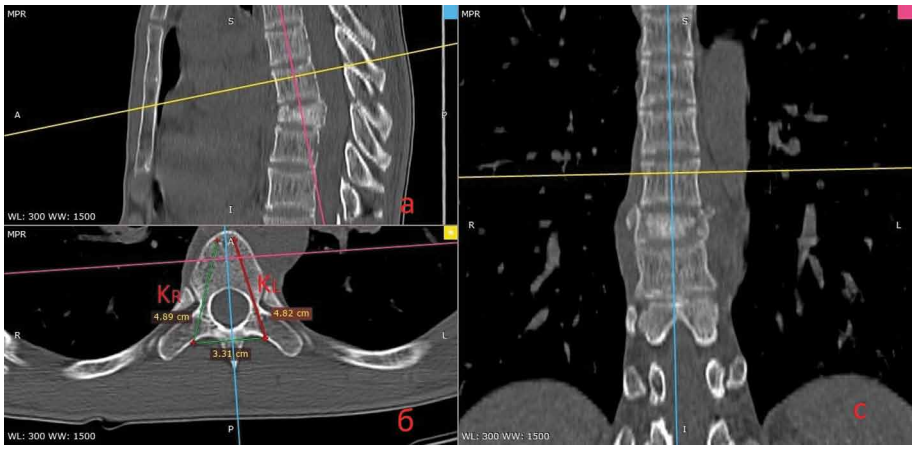

Рисунок 1. Планирование введения транспедикулярных винтов после мультипланарной реконструкции в сагиттальной а), аксиальной б) и фронтальной проекциях. Траектория введения и длина винтов: справа — расстояние KR, слева — KL.
Figure 1. Planning the introduction of transpedicular screws after multiplanar reconstruction in sagittal a), axial b) and frontal projections. The trajectory of the introduction and the length of the screws: on the right— the distance KR, on the left — KL.

Во второй группе для использования навигационного устройства создавали карту-разметку для каждого винта. Планирование угла введения транспедикулярных винтов в аксиальной проекции заключалось в проведении линии через центр позвонка и линий по траекториям введения винтов (рисунок 2). От линии, проходящей через точки введения винтов на расстоянии 7 и 12 см измерялись расстояния от средней линии до траектории введения справа (CR, DR) и слева (CL, DL). Это расстояния от основания до поперечных планок навигационного устройства.

В сагиттальной проекции планирование угла введения винтов заключалось в измерении расстояния E (рисунок 3).

Проводилась линия перпендикулярная дужкам соседних позвонков и линия — траектория введения винтов. На расстоянии 12 см от позвоночника между проведенными линиями измерялось расстояние E.

Данные параметры переносились на навигационное устройство для каждого уровня, что позволяло устанавливать траектории введения винтов в сагиттальной и аксиальной проекциях и одновременно проводить винты с двух сторон (рисунок 4).

Для устойчивости устройство прижимается к позвоночнику и фиксируется стержнями к основанию остистых отростков. При сохранении навигационных траекторий продолжается формирование каналов для винтов с ориентацией на длину каналов по расстояниям KR и KL. Затем в устройство вставляются винты на центральных штангах необходимой длины (с учетом расстояний KR и KL) и вкручиваются в подготовленные каналы. Тем самым навигационное устройство обеспечивает правильность и безопасность введения винтов за счет того, что их траекторию можно точно выставить в аксиальной проекции по расстояниям CR, CL, DR, DL; в сагиттальной проекции по расстоянию E.

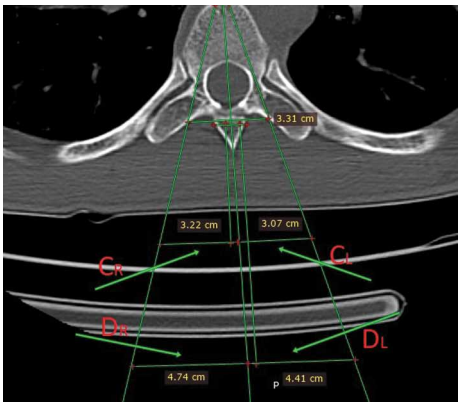

Рисунок 2. Планирование угла введения транспедикулярных винтов в аксиальной проекции с измерениями расстояний CR, CL, DR, DL для воспроизведения их на навигационном устройстве.
Figure 2. Planning the angle of insertion of transpedicular screws in an axial projection with distance measurements CR, CL, DR, DL to reproduce them on a navigation device.

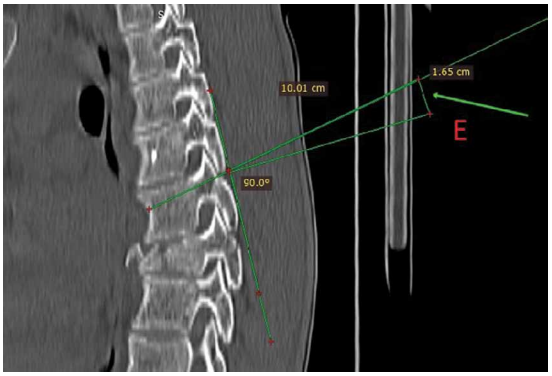

Рисунок 3. Планирование угла введения транспедикулярных винтов в сагиттальной проекции с измерением расстояния E для воспроизведения его на навигационном устройстве.
Figure 3. Planning the angle of insertion of transpedicular screws in the sagittal projection with measuring the distance E to reproduce it on the navigation device.

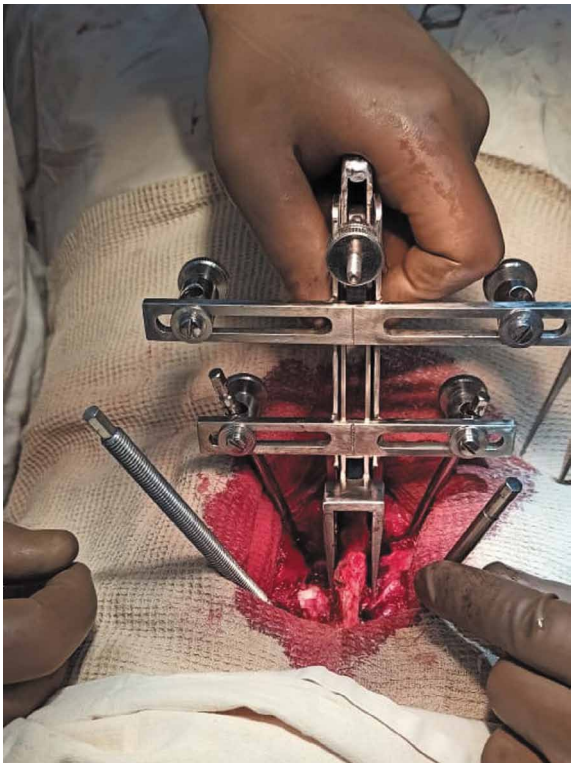

Рисунок 4. Использование навигационного устройства для введения транспедикулярных винтов.
Figure 4. The use of a navigation device for the introduction of transpedicular screws.

При использовании данного навигационного устройства уменьшается лучевая нагрузка на пациента за счет уменьшения количества снимков (не более 8 на установку 6 винтов с учетом окончательного рентгенконтроля), а кроме этого, сокращается время операции и время работы С-дуги за счет того, что проводится одновременно разметка и проведение винтов с двух сторон.

В первой группе установка винтов, согласно классификации Герцбейна–Роббинса, были следующей: класс А — 86; В — 46; С — 33; В — 10; Е — 1. Во второй группе: класс А — 96; В — 132; С — 14; В — 0; Е — 0 (табл. 1).

Таблица 1. Оценка положения винтов по классификации Герцбейна-Роббинса.
Table 1. Evaluation of the position of the screws according to the classification Herzbein-Robbins.

	A	B	C	D	E
I группа	86	146	33	10	3
II группа	96	132	14	0	0
p-значения	0,23	0, 38	0,09	<0,01	<0,01

Статистически значимых различий результатов в группах с установкой винтов классов А, В, и С при 95 % доверительном интервале не получено (t=1,72; p=0,23), но во второй группе траектория проведения винта не отклонялась до классов D и Е. В первой группе отличная и хорошая установка винтов (класс А и В) составила 83,5 %, во второй группе — 94,2 %.

Проведение винтов мимо анатомических ориентиров отмечено в 3 случаях на средне-грудном отделе позвоночника у пациентов с неврологическим статусом типов А и В. Мы связали эти осложнения с первоначальной грубой деформацией позвоночника. Винты в одном случае прошли над корнем дуги и в двух случаях латерально, что привело к нарушению стабильности фиксации. Данное расположение винтов было выявлено при проведении послеоперационного СКТ-исследования, и в ближайшие дни пациенты были реоперированы.

Обсуждение.

При транспедикулярной фиксации с использованием техники “свободной руки” в сочетании с интраоперационной рентгеноскопией частота некорректно установленных винтов варьирует от 10,5 % до 21 % [14]. Технические сложности проведения винтов могут оставаться и при тщательном предоперационном планировании, которые связаны с размерами корней дуг, траекториями введения винтов в сагиттальной и аксиальной плоскостях [15]. Так, при диаметре корня дуги 5 мм, частота отклонения винта от ножки составляет 33 %, а при диаметре 5–7 мм частота отклонений приближается к 11 % [16]. Многочисленные морфометрические исследования ножек позвонков показали, что существуют значительные различия в их размерах между различными этническими группами, расами, полами, возрастами и изучаемыми областями позвоночника [17]. Это создает значительные трудности и приводит к увеличению частоты неправильной установки винтов. Так, A. Gonzalvo et al. обнаружили, что частота смещения винта составляет 33 % при диаметре ножки менее 5 мм и 11 % — при диаметре ножки 5–7 мм [18]. Планирование траектории введения транспедикулярных винтов должно проводиться с использованием предоперационных КТ-изображений, а при установке винтов необходимо придерживаться анатомических ориентиров [19]. При компьютерном анализе безопасности использования трех точек введения педикулярного винта в поясничном отделе в серии наблюдений китайских исследователей было выявлено, что метод Roy-Camille наиболее безопасен при применении в LI и LII позвонках и опасен в LIII — LV; метод Magerl может безопасно использоваться в LIII — LV позвонках, а метод Du обеспечивает более безопасную точку введения винтов в LI — LIV позвонки [20]. При достаточном опыте, точность установки винтов методом “свободной руки” в пределах безопасных зон достигает 91,4 % [21].

Даже при тщательном предоперационном планировании с проведением спондилометрии сложность оперативного вмешательства не уменьшается, так как в ходе операции возникают трудности с определением точки введения, а в момент пенетрации шилом дуги позвонка трудно соблюсти рассчитанный угол

проведения винтов. Использование для профилактики ятрогенной перфорации ножки позвонка электронного измерителя электропроводности или применение электромиографии не вполне эффективно [22].

Неправильно установленные винты могут привести к повреждению нервных корешков или сосудов, и, как следствие, к ревизионным вмешательствам в 2,8–6,6 % случаев [23]. В своем исследовании T. Laine et al. сообщили, что ни один винт не вызывал неврологических проблем при медиальном смещении от ножки меньше 4,0 мм [24]. Смещение винта более 6 мм медиально создает высокий риск повреждения нервного корешка [25]. Осложнения, связанные с применением транспедикулярной фиксации чаще обусловлены характером повреждения и анатомией позвоночника, а также опытом хирурга. Исследования показали, что стажерам в хирургии позвоночника требуется установить от 80 до 300 винтов для достижения адекватного уровня мастерства [26].

Профилактика данных осложнений, по мнению авторов, заключается в интраоперационном использовании трехмерных навигационных систем, которые обеспечивают высокую точность позиционирования педикулярных винтов [27, 28]. Метаанализ 130 исследований с введением 37 337 педикулярных винтов продемонстрировал точность установки 95,2 % с навигационными системами и 90,3 % без навигации [29]. Точность установки педикулярных винтов составляет 28–85 % при использовании обычной 2D рентгеноскопии, 88–96 % при применении КТ-навигационной системы и 93–99 % при использовании навигационной системы Q-arm [30].

Результаты нашей работы показывает, что в среднем 83,5 % педикулярных винтов, установленных методом “свободной руки”, находятся в пределах безопасной зоны, по сравнению со средним показателем 94,2 % при использовании разработанного нами навигационного устройства. Исследование имело несколько ограничений: 1) это был ретроспективный анализ с участием относительно небольшого числа пациентов, у которых к тому же не приводятся размеры корней дуг и уровни их установки; 2) не анализировалась экономическая эффективность использования предложенного устройства. Эти моменты следует рассмотреть в будущих исследованиях.

Заключение: таким образом, использование для установки транспедикулярных винтов при позвоночно-спинномозговой травме на грудном и поясничном отделах предлагаемого навигационного устройства позволило не только снизить лучевую нагрузку и время операции, но и повысить точность проведения винтов до 94,2 % с минимальным отклонением от планируемых траекторий по отношению к методу “свободной руки” — 83,5 %.

***Конфликт интересов**. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. **Conflict of interest.** The author declares no conflict of interest.*

***Финансирование.** Исследование проведено без спонсорской поддержки. **Financing.** The study was performed without external funding.*

***Соблюдение прав пациентов и правил биоэтики:** Все пациенты подписали информированное согласие на участие в исследовании. **Compliance with patient rights and principles of bioethics.** All patients gave written informed consent to participate in the study*

ORCID авторов / ORCID of authors

Усиков Владимир Дмитриевич/Usykov Vladimir Dmitrievich
https://orcid.org/0000-0001-7350-6772

Куфтов Владимир Сергеевич/
Kuftov Vladimir Sergeevich
https://orcid.org/0000-0002-0548-8944

Монашенко Дмитрий Николаевич/
Monashenko Dmitry Nikolaevich
https://orcid.org/0000-0002-8571-1447

Иваненко Андрей Валентинович/
Ivanenko Andrey Valentinovich
https://orcid.org/0000-0002-9712-4661

Улитин Алексей Юрьевич/
Ulitin Alexey Yurievich
https://orcid.org/0000-0002-8343-4917

Литература

1. Roy-Camille R, Saillant G, Mazel C. Internal fixation of the lumbar spine with pedicle screw plating. Clin Orthop Relat Res. 1986 Feb;(203):7–17. PMID: 3955999.
2. Усиков В. Д. Руководство по транспедикулярному остеосинтезу позвоночника: Часть I. Повреждения позвоночника и спинного мозга. — СПб.: Гиппократ, 2006.— 176 с [Usikov V. D. Rukovodstvo po transpedikulyarnomu osteosintezu pozvonochnika: Chast' I. Povrezhdeniya pozvonochnika i spinnogo mozga. — SPb.: Gippokrat, 2006. (In Russ.).]
3. Макаревич С. В. Исторические аспекты транспедикулярной фиксации позвоночника: обзор литературы. Хирургия позвоночника. 2018;15(4):95–106. https://doi.org/10.14531/2018.4.95–106 [Makarevich S. V. Historical aspects of transpedicular fixation of the spine: literature review. Khirurgiya pozvonochnika. 2018;15(4):95–106. (In Russ.).] *https://doi.org/10.14531/2018.4.95–106*
4. Афаунов А. А., Кузьменко А. В. Транспедикулярная фиксация при повреждениях грудного и поясничного отделов позвоночника, сопровождающихся травматическим стенозом позвоночного канала. Хирургия позвоночника. 2011;(4):008–017. *https://doi.org/10.14531/ss2011.4.8–17* [Afaunov A. A., Kuzmenko A. V. Transpedicular fixation for thoracic and lumbar spine injury with posttraumatic spinal stenosis. Khirurgiya pozvonochnika. 2011;(4):008–017. (In Russ.).] https://doi.org/10.14531/ss2011.4.8–17
5. Hicks JM, Singla A, Shen FH, Arlet V. Complications of pedicle screw fixation in scoliosis surgery: a systematic review. Spine (Phila Pa 1976). 2010 May 15;35(11): E 465–70. doi: 10.1097/BRS.0b013e3181d1021a
6. Huang W, Luo T. Efficacy analysis of pedicle screw internal fixation of fractured vertebrae in the treatment of thoracolumbar fractures. Exp Ther Med. 2013 Mar;5(3):678–682. doi: 10.3892/etm.2013.914

7. Hussain I, Cosar M, Kirnaz S, Schmidt FA, Wipplinger C, Wong T, Härtl R. Evolving Navigation, Robotics, and Augmented Reality in Minimally Invasive Spine Surgery. Global Spine J. 2020 Apr;10(2 Suppl):22S-33S. doi: 10.1177/2192568220907896
8. 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;19(3):6–13 *https://doi.org/10.14531/ss2022.3.6–13* [Kosulin A. V., Elyakin D. V., Kornievskii L. A., Bulatova I. A., Mushkin A. Yu. Selective application of navigation templates in idiopathic scoliosis: technical and hronometric features. Khirurgiya pozvonochnika. 2022;19(3):6–13. (In Russ.).] *https://doi.org/10.14531/ss2022.3.6–13*
9. Коваленко Р. А., Пташников Д. А., Черебилло 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;26(3):49–60. https://doi.org/10.21823/2311-2905-2020-26-3-49-60 [Kovalenko R. A., Ptashnikov D. A., Cherebillo V. Yu., Kashin V. A. Comparison of the Accuracy and Safety of Pedicle Screw Placement in Thoracic Spine Between 3D Printed Navigation Templates and Free Hand Technique. Travmatologiya i ortopediya Rossii. 2020;26(3):49–60. (In Russ.).] https://doi.org/10.21823/2311-2905-2020-26-3-49-60
10. Vaccaro AR, Harris JA, Hussain MM, Wadhwa R, Chang VW, Schroerlucke SR, Samora WP, Passias PG, Patel RD, Panchal RR, D'Agostino S, Whitney NL, Crawford NR, Bucklen BS. Assessment of Surgical Procedural Time, Pedicle Screw Accuracy, and Clinician Radiation Exposure of a Novel Robotic Navigation System Compared With Conventional Open and Percutaneous Freehand Techniques: A Cadaveric Investigation. Global Spine J. 2020 Oct;10(7):814–825. doi: 10.1177/2192568219879083
11. Tinelli M, Töpfer F, Kreinest M, Matschke S, Grützner PA, Suda AJ. Minimally invasive reduction and percutaneous posterior fixation of one-level traumatic thoraco-lumbar and lumbar spine fractures. Eur J Orthop Surg Traumatol. 2018 Dec;28(8):1581–1587. doi: 10.1007/s00590-018-2224-9
12. Heintel TM, Berglehner A, Meffert R. Accuracy of percutaneous pedicle screws for thoracic and lumbar spine fractures: a prospective trial. Eur Spine J. 2013 Mar;22(3):495–502. doi: 10.1007/s00586-012-2476-8
13. Gertzbein SD, Robbins SE. Accuracy of pedicular screw placement in vivo. Spine (Phila Pa 1976). 1990 Jan;15(1):11–4. doi: 10.1097/00007632-199001000-00004
15. Hussain I, Cosar M, Kirnaz S, Schmidt FA, Wipplinger C, Wong T, Härtl R. Evolving Navigation, Robotics, and Augmented Reality in Minimally Invasive Spine Surgery. Global Spine J. 2020 Apr;10(2 Suppl):22S-33S. doi: 10.1177/2192568220907896
16. Gonzalvo A, Fitt G, Liew S, de la Harpe D, Vrodos 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(4):508–12. doi: 10.3109/02688697.2015.1019414
17. Mohanty SP, Pai Kanhangad M, Bhat SN, Chawla S. Morphometry of the lower thoracic and lumbar pedicles and its relevance in pedicle fixation. Musculoskelet Surg. 2018 Dec;102(3):299–305. doi: 10.1007/s12306–018–0534-z
18. Gonzalvo A, Fitt G, Liew S, de la Harpe D, Vrodos 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(4):508–12. doi: 10.3109/02688697.2015.1019414
19. Daemi, N., Ahmadian, A., Mirbagheri, A., Ahmadian, A.H., Saberi, H., Amidi, F., et al. (2015) Planning Screw Insertion Trajectory in Lumbar Spinal Fusion Using Pre-Operative CT Images. Proceedings of the 2015 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Milan, 25–29 August 2015, 3639–3642.https://doi.org/10.1109/EMBC.2015.7319181
20. Hailong Y, Wei L, Zhensheng M, Hongxun S. Computer analysis of the safety of using three different pedicular screw insertion points in the lumbar spine in the Chinese population. Eur Spine J. 2007 May;16(5):619–23. doi: 10.1007/s00586-006-0243-4
21. 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 May;24(5):990–1004. doi: 10.1007/s00586–015–3853-x
22. Ravindra VM, Kalra RR, Dailey AT. Electromyography stimulation compared with intraoperative O-arm imaging for evaluating pedicle screw breaches in lumbar spine surgery: a prospective analysis of 1006 screws in 164 patients // Spine J. 2019 Feb;19(2):206–211. doi: 10.1016/j.spinee.2018.06.353
23. Schizas C, Michel J, Kosmopoulos V, Theumann N. Computer tomography assessment of pedicle screw insertion in percutaneous posterior transpedicular stabilization. Eur Spine J. 2007 May;16(5):613–7. doi: 10.1007/s00586–006–0221-x
24. Laine T, Mäkitalo K, Schlenzka D, Tallroth K, Poussa M, Alho A. Accuracy of pedicle screw insertion: a prospective CT study in 30 low back patients. Eur Spine J. 1997;6(6):402–5. doi: 10.1007/BF01834068
25. Castro WH, Halm H, Jerosch J, Malms J, Steinbeck J, Blasius S. Accuracy of pedicle screw placement in lumbar vertebrae. Spine (Phila Pa 1976). 1996 Jun 1;21(11):1320–4. doi: 10.1097/00007632-199606010-00008
26. Gonzalvo A, Fitt G, Liew S, de la Harpe D, Turner P, Ton L, Rogers MA, Wilde PH. The learning curve of pedicle screw placement: how many screws are enough? Spine (Phila Pa 1976). 2009 Oct 1;34(21): E761–5. doi: 10.1097/BRS.0b013e3181b2f928
27. Li J, Zhang H, Li Q, Yu S, Chen W, Wan S, Chen D, Liu R, Ding F. Treating Lumbar Fracture Using the Mixed Reality Technique. Biomed Res Int. 2021 Mar 29;2021:6620746. doi: 10.1155/2021/6620746
28. Richter PH, Gebhard F. Einsatz von Navigation in der Traumatologie an der Wirbelsäule [Application of navigation in the fractured spine]. Oper Orthop Traumatol. 2022 Nov 28. German. doi: 10.1007/s00064-022-00790-7
29. Kosmopoulos V., Schizas C. Pedicle screw placement accuracy: a meta-analysis. Spine (Phila Pa 1976). 2007 Feb 1;32(3): E111–20. doi: 10.1097/01.brs.0000254048.79024.8b
30. Shin MH, Hur JW, Ryu KS, Park CK. Prospective Comparison Study Between the Fluoroscopy-guided and Navigation Coupled With O-arm-guided Pedicle Screw Placement in the Thoracic and Lumbosacral Spines. J Spinal Disord Tech. 2015 Jul;28(6): E347–51. doi: 10.1097/BSD.0b013e31829047a7