

ХИРУРГИЧЕСКОЕ ЛЕЧЕНИЕ ПАЦИЕНТОВ С ПЕРВИЧНЫМИ И МЕТАСТАТИЧЕСКИМИ ОПУХОЛЯМИ ПОЗВОНОЧНИКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОБИЛЬНОГО ИНТРАОПЕРАЦИОННОГО КОМПЬЮТЕРНОГО ТОМОГРАФА O-ARM

А.А. Суфианов^{1,2}, В.И. Манащук³, Д.Н. Набиев¹, А.Г. Шапкин¹, М.К. Зайцев¹, Г.Э. Теблов²,
А.А. Х Аль Захрани², Р.С. Талыбов¹, Х.Л. Абриль Арена²

¹ФГБУ «Федеральный центр нейрохирургии» Минздрава России (Тюмень); Россия, 625032 Тюмень,
4-й км Червишевского тракта, 5;

²ФГАОУ ВО Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова Минздрава России;
Россия, 119991 Москва, ул. Большая Пироговская, 2, стр. 4;

³ООО «Европейский медицинский центр «УГМК-Здоровье»; Россия, 620144 Екатеринбург, ул. Шейнкмана, 113

Контакты: Андрей Григорьевич Шапкин neuro@inbox.ru

Цель исследования – представить опыт применения мобильного интраоперационного компьютерного томографа O-Arm, совмещенного с навигационной станцией Stealth Station Treon Plus (Medtronic Navigation), при проведении декомпрессивно-стабилизирующих операций у пациентов с первичными и метастатическими опухолями позвоночника.

Материалы и методы. Проанализированы результаты хирургического лечения 44 пациентов (24 мужчин и 20 женщин, средний возраст $4,3 \pm 1,8$ года). Все операции были выполнены в период с апреля 2011 г. по июнь 2017 г. Наиболее распространенными причинами поражения позвоночника были плазмноклеточная миелома (15 пациентов, 34,1 %) и метастатические опухоли (12 пациентов, 27,3 %). Декомпрессивно-стабилизирующие операции выполняли с использованием заднего доступа с целью тотального или субтотального удаления объемного образования. Радикальность удаления объемного образования, степень декомпрессии позвоночного канала и надежность транспедикулярной фиксации оценивали с помощью томографа O-Arm, совмещенного с навигационной станцией Stealth Station Treon Plus.

Результаты. У 79,5 % пациентов через 6–12 мес после оперативного вмешательства существенно улучшился неврологический статус (уменьшилась выраженность проводниковых и сенсорных расстройств). Уровень боли снизился в 3,6 раза. При использовании томографа O-Arm, совмещенного с навигационной станцией Stealth Station Treon Plus, правильное позиционирование винтов было осуществлено в 99,6 % случаев. Серьезными, но устранимыми проблемами при проведении навигации были сбой работы навигационной системы в ходе операции, основными причинами которого были: износ светоотражающих шариков (ведет к частой потере изображения инструмента), отдаленная установка и смещение референционной рамки; износ иглы Джамшиди, нарушение работы навигационной камеры, сбой передачи данных с навигационной станции.

Заключение. Мобильный интраоперационный томограф O-Arm позволяет проводить операции в режиме 3D-контроля и 3D-навигации, выполнять манипуляции в зонах сложной ориентации, обеспечивает повышенную точность имплантации транспедикулярных винтов и более радикальное удаление объемного образования при минимальной кровопотере и агрессивности хирургического вмешательства, что ведет к адекватной декомпрессии позвоночного канала и в конечном итоге дает хорошие анатомические и функциональные результаты, улучшает клинические исходы вмешательства.

Ключевые слова: мобильный интраоперационный томограф O-Arm, опухоли позвоночника, нейронавигация, транспедикулярный остеосинтез

Для цитирования: Суфианов А.А., Манащук В.И., Набиев Д.Н. и др. Хирургическое лечение пациентов с первичными и метастатическими опухолями позвоночника с использованием мобильного интраоперационного компьютерного томографа O-Arm. Нейрохирургия 2019;21(4):39–49.

DOI: 10.17650/1683-3295-2019-21-4-39-49

Surgical treatment of patients with primary and metastatic spinal tumor with
use of the O-Arm intraoperative portable computed tomography scanner

A.A. Sufianov^{1,2}, V.I. Manashchuk³, D.N. Nabiev¹, A.G. Shapkin¹, M.K. Zaytsev¹, G.E. Tebloev²,
A.A. X Al Zahrani², R.S. Talybov¹, H.L. Abril Arenas²

¹Federal Center of Neurosurgery (Tyumen), Ministry of Health of Russia; 5 4th km of Chervishevsky Tract, Tyumen 625032, Russia;

²I.M. Sechenov First Moscow State Medical University, Ministry of Health of Russia; Bld. 4, 2 Bolshaya Pirogovskaya St., Moscow 119991, Russia;

³European Medical Center "UMMC-Health"; 113 Sheynkmana St., Ekaterinburg 620144, Russia

The study objective is to demonstrate our experience of employment of O-Arm intraoperative portable computed tomography scanner combined with navigation system Stealth Station Treon Plus (Medtronic Navigation) during decompressive-stabilizing surgeries for patients with primary and metastatic spinal tumors.

Materials and methods. We have reviewed results of surgical treatment of 44 patients (24 males and 20 females, average age is 54.3 ± 1.8), who were hospitalized and operated in the department of spinal neurosurgery in Federal Centre of Neurosurgery (Tyumen). All surgeries were performed by one surgical team in the period of April 2011 to June 2017. All patients underwent full clinical examination according to diagnostic algorithm, including assessment of general condition, degree of bone and visceral dissemination, neurological status, quality of life, pain syndrome intensity. The most common cause of vertebral lesions was plasma cell myeloma (15 patients, 34.1 %), metastatic spinal lesions (12 patients, 27.3 %). Patients were subjected to posterior decompression and stabilization with total and subtotal excision of mass lesions. Assessment of degree of decompression and transpedicular fixation were carried out visually using O-Arm combined with navigation station.

Results. In 6 to 12 months after surgery 79.5 % of patients demonstrated significant improvement of neurological status, specifically a decrease of conduction and sensory disorders. Degree of pain syndrome was reduced by 3.6 times. Using O-Arm combined with navigation station we placed screws adequately in 99.6 % of the cases. The main technical problem that occurred during the surgery was the failure of navigation system caused by: defect of reflective spheres, distant installation and shift of referential frame, aging of Jamshidi needle, malfunction of navigation camera, failure of data transfer from navigation station.

Conclusion. The use of O-Arm combined with navigation station for decompressive and stabilizing surgeries in patients with spine and spinal cord tumors let us perform surgeries with 3D control and navigation, conduct surgeries in areas where it is hard to determine surgical landmarks, ensure precision of transpedicular screw implantation, accomplish total resection of mass lesions with minimal blood loss and less aggressive surgical intervention and properly decompress the spinal canal which, eventually, result in positive anatomical and functional characteristics, and contribute to good general outcome of surgical intervention.

Key words: computed tomography scanner O-Arm, spine tumor, navigation-assisted surgery, transpedicular osteosynthesis

For citation: Sufianov A.A., Manashchuk V.I., Nabiev D.N. et al. Surgical treatment of patients with primary and metastatic spinal tumor with use of the O-Arm intraoperative portable computed tomography scanner. *Neyrokhirurgiya = Russian Journal of Neurosurgery* 2019; 21(4):39–49. (In Russ.).

ВВЕДЕНИЕ

Базовым методом лечения первичных и метастатических опухолей позвоночника и спинного мозга при нарастающем синдроме сдавления спинного мозга и корешков считается хирургическое вмешательство, при этом основная цель хирургического лечения, помимо максимально радикального удаления опухоли, заключается в обеспечении декомпрессии нервных структур и стабилизации позвоночника при минимальной агрессивности операции, что невозможно без использования современных систем визуализации и нейронавигации [1–6]. В хирургии опухолей позвоночника навигационная система может быть очень полезна для идентификации локализации и размеров опухоли и оценки степени ее резекции. Кроме того, компьютерные методы навигации повышают точность позиционирования винтов [1, 4, 6–10] и уменьшают объем травмы критически важных нейрососудистых структур [4, 11] при проведении стабилизирующих операций.

Традиционный метод лучевой визуализации и навигации – интраоперационная флюороскопия [1, 3, 10, 11]. К сожалению, использование интраоперационной флюороскопии без интраоперационного формирования трехмерного изображения позвоночника

(окончательного взаиморасположения позвонков) имеет существенные недостатки. Данный метод требует длительного сбора точек анатомических ориентиров для привязки к изображению, полученному накануне при компьютерной томографии (КТ), и достаточно часто совмещение двух изображений сопровождается погрешностями при изменении положения пациента на операционном столе [8, 9, 11–13]. Кроме того, существует высокий риск повышенной лучевой нагрузки на хирурга и операционную бригаду [14–17].

В последнее время интраоперационная стереотаксическая навигация стала более доступной в хирургии позвоночника. Стереотаксическая навигация с конусообразной флюороскопией и КТ, использование 3D-изображений, полученных с помощью мобильного интраоперационного томографа O-Arm (Medtronic Navigation), совмещенного с навигационной станцией, были хорошо изучены. Доказана их безопасность и возможность повышения точности размещения транспедикулярных винтов [2, 6, 12, 13, 17–19].

Цель исследования – представить опыт применения мобильного интраоперационного компьютерного томографа O-Arm, совмещенного с навигационной станцией Stealth Station Treon Plus, при проведении декомпрессивно-стабилизирующих операций у пациентов

с первичными и метастатическими опухолями позвоночника.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Проанализированы результаты хирургического лечения 44 пациентов (24 мужчин и 20 женщин, средний возраст $54,3 \pm 1,8$ года), оперированных в отделении спинальной нейрохирургии ФБГУ «Федеральный центр нейрохирургии» (Тюмень). Все хирургические вмешательства были выполнены одной операционной бригадой в период с апреля 2011 г. по июнь 2017 г.

Проведено полное клиническое обследование всех пациентов по диагностическому алгоритму, включавшему, кроме предоперационной магнитно-резонансной томографии и КТ, оценку общего состояния по шкале Karnofsky и ECOG (Eastern Cooperative Oncology Group, Восточная объединенная группа онкологов), степени костной и висцеральной диссеминации, неврологического статуса (по шкале Frankel), интенсивности болевого синдрома (по визуально-аналоговой шкале (ВАШ)). Распространенность метастатических опухолей в позвоночнике оценивали по классификации К. Tomita и соавт. [20, 21].

У всех пациентов выполнена декомпрессио-стабилизирующая операция с использованием заднего доступа, при которой осуществляли тотальное или субтотальное удаление объемного образования. Поскольку наиболее часто наблюдалось поражение только 1 или 2 позвонков, как правило, проводили 4- или 8-опорный спондилосинтез. У 10 (22,7 %) пациентов была установлена 4-опорная система транспедикулярной фиксации, у 29 (65,9 %) – 8-опорная, у 2 (4,5 %) – системы с 10 и 12 имплантируемыми винтами. Всего для фиксации различных отделов позвоночника было использовано 294 транспедикулярных винта. У 29 (65,9 %) пациентов для фиксации позвоночно-двигательного сегмента применяли систему стабилизации позвоночника CDH Legacy (Medtronic, США), у 10 (22,7 %) – систему Expedium Spine System (DePuy Spine, Inc., США), у 2 (4,5 %) – Viper II (DePuy Spine, Inc., США). У 3 (6,8 %) пациентов ввиду локализации патологического процесса в шейном отделе позвоночника была выбрана универсальная система фиксации шейно-затылочного отдела позвоночника Oasys.

Контроль позиционирования винтов осуществляли интраоперационно сразу после установки системы транспедикулярной фиксации, дополнительно его оценивали по данным послеоперационной мультиспиральной КТ. Для оценки использовали модифицированную шкалу S.D. Gertzbein и соавт.: оптимальным считали отсутствие нарушений при позиционировании винтов, допустимым – нарушение ≤ 2 мм, неприемлемым – нарушение > 2 мм [7, 22].

Техника проведения операций с использованием мобильного томографа O-Arm, совмещенного с навигационной станцией. Хирургическое лечение проводилось

с целью устранения или предотвращения компрессии спинного мозга и его корешков и обеспечения стабильного положения позвоночных сегментов, удаления максимально возможного объема опухоли при минимальной кровопотере и травмировании спинного мозга и его корешков, а также с целью предотвращения развития неврологического дефицита, улучшения или сохранения удовлетворительного качества жизни и улучшения прогноза онкологического заболевания.

Хирургическое лечение включало декомпрессию нервных структур, тотальное или частичное удаление опухоли и реконструкцию позвоночника путем имплантации системы стабилизации.

В 27 (61,4 %) случаях была проведена радикальная операция – тотальное удаление объемного образования (резекция en bloc) [20, 21, 23]. В остальных случаях с учетом прогноза выживаемости пациента, степени чувствительности опухоли к химиотерапии, лучевой терапии и с учетом распространенности онкологического процесса, а также интраоперационных рисков оперативное лечение заключалось в выполнении вертебрэктомии путем удаления опухоли отдельными фрагментами. В ряде случаев для предупреждения кровотечения 1-м этапом оперативного лечения была эмболизация сосудов опухоли.

Хирургический доступ и вид стабилизирующей операции определяли в зависимости от особенностей патологической анатомии пораженного сегмента позвоночника и типа компрессии спинного мозга [20, 24, 25].

Оценку степени удаления объемного образования, степени декомпрессии позвоночного канала и транспедикулярную фиксацию осуществляли под визуальным контролем и с использованием мобильного компьютерного томографа O-Arm, совмещенного с навигационной станцией Stealth Station Treon Plus (рис. 1). Контроль проводимости спинного мозга проводили с помощью интраоперационного нейромонитора NIM Eclipse (Medtronic, США).

При проведении всех этапов операции навигационную стойку с оптической камерой, определяющей трехмерное расположение оптических маркеров, располагали у ног пациента, стойку визуализации с монитором, соединенную с базовой станцией O-Arm, – сбоку от пациента напротив оперирующего хирурга (рис. 2). Томограф O-Arm оборачивали стерильным целлофановым прозрачным чехлом и после первичного прицеливания в режиме 2D по зоне требуемых позвонков устанавливали на парковочное место (рис. 3).

Референционную рамку устанавливали либо непосредственно в остистый отросток или крыло подвздошной кости, либо в прочно закрепленную на позвоночнике конструкцию (например, пиновый дистрактор в цервикальном отделе) (рис. 4а). С помощью O-Arm проводили интраоперационное сканирование позвоночника в режиме 3D (см. рис. 3). Данные сканирования автоматически передавались

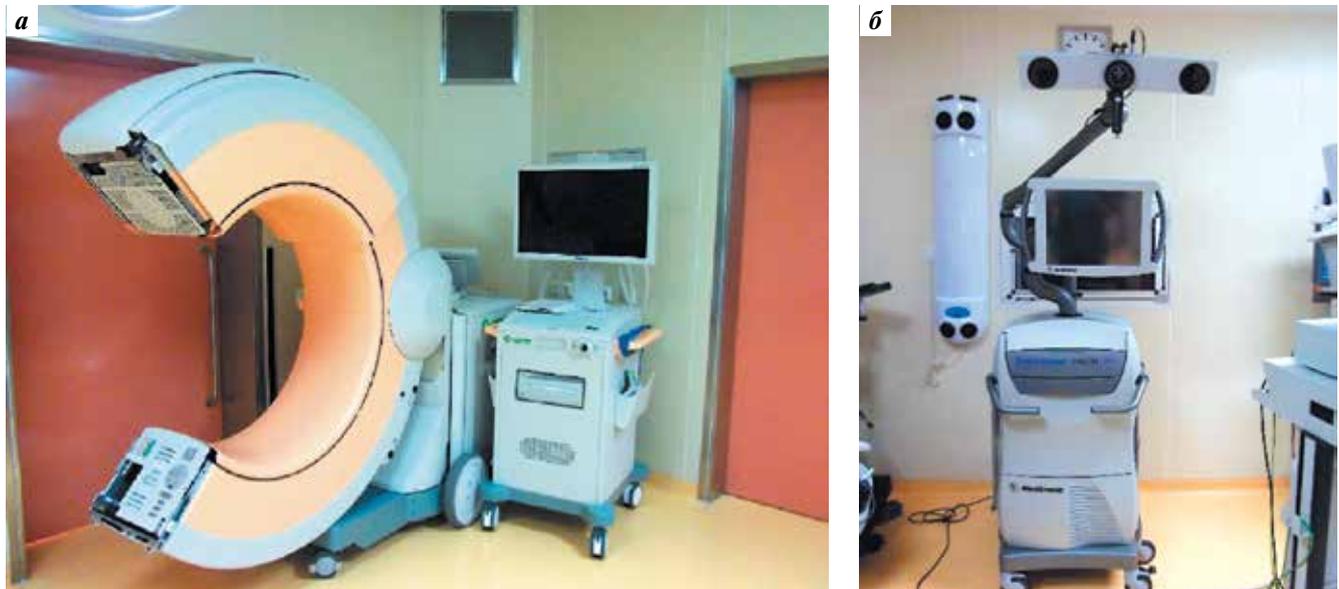


Рис. 1. Мобильный компьютерный томограф O-Arm (а), совмещенный с навигационной станцией Stealth Station Treon Plus (б) компании Medtronic Navigation

Fig. 1. O-Arm mobile computed tomography scanner (a), with Stealth Station Treon Plus navigation system (б) of Medtronic Navigation

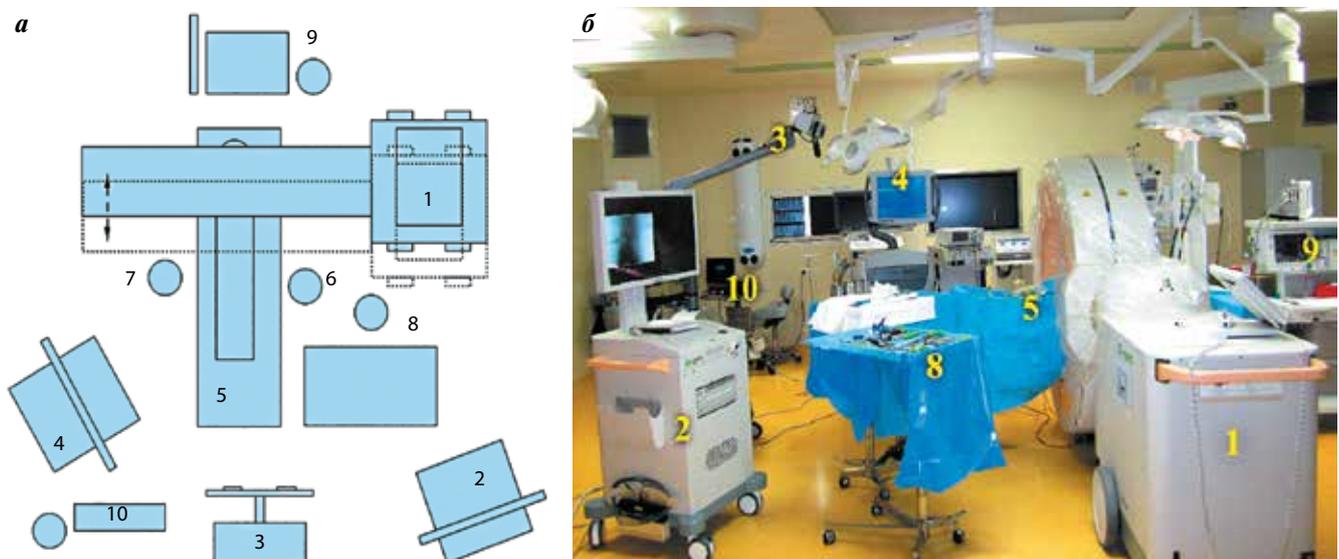


Рис. 2. Схема (а) и фотография (б) расположения в операционной мобильного компьютерного томографа O-Arm (1), монитора O-Arm (2), навигационной станции Stealth Station Treon Plus (3), монитора станции (4), операционного стола (5), главного хирурга (6), ассистента (7), операционной сестры (8), рабочего места анестезиологической бригады (9), нейрофизиолога и аппарата для нейромониторинга (10)

Fig. 2. A scheme (a) and an image (б) of O-Arm computed tomography scanner in the operating room (1), as well as O-Arm monitor (2), Stealth Station Treon Plus navigation station (3), the station's monitor (4), an operating table (5), head surgeon (6), an assistant (7), an operating sister (8), workplace of an anesthesiology team (9), neurophysiologist and apparatus for neuromonitoring (10)

на навигационную станцию. Через верификационное гнездо осуществлялась автоматическая регистрация прямого навигационного инструмента, управляемого щупа либо других инструментов с закрепленными на них рамками со светоотражающими шариками (рис. 4б). Управляемый щуп позволял на этапе доступа определить границы декомпрессии, а в ходе основного этапа операции – степень декомпрессии.

Всегда в первую очередь проводили спондилосинтез (установку транспедикулярных винтов и формирование стержней без их фиксации к винтам), поскольку на следующих, более агрессивных этапах операции возможна значительная кровопотеря и появление интраоперационных осложнений, далее удаляли опухоль с учетом объема кровопотери, устанавливали стержни и фиксировали их к винтам.



Рис. 3. Интраоперационные фотографии мобильного компьютерного томографа O-Arm в ходе сканирования позвоночника в режиме 3D (а) и в парковочной позиции (б)

Fig. 3. Intraoperative photographs of the O-Arm computed tomography scanner while scanning the spine in 3D mode (a) and in the parking position (b)

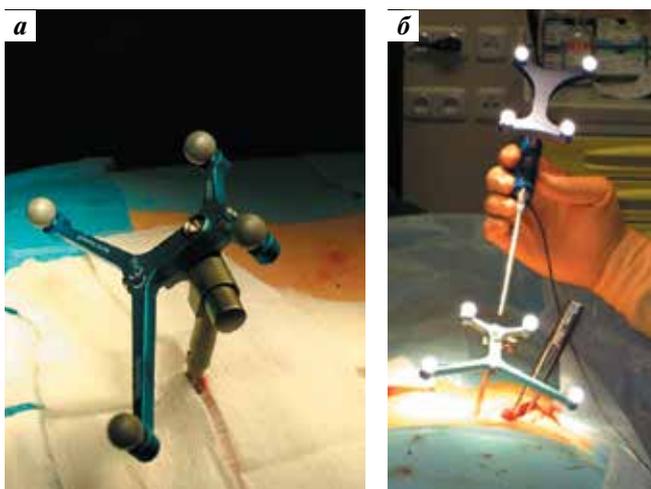


Рис. 4. Интраоперационные фотографии. Установка референционной рамки (а) и автоматическая регистрация инструмента с закрепленной на нем рамкой со светоотражающими шариками (б)

Fig. 4. Intraoperative photographs. Reference frame (a) setting and automatic registration of the instrument with a fixed frame with reflective spheres (b)

В большинстве случаев выполняли 4- или 8-опорный спондилосинтез. Использование 8-опорной системы стабилизации обеспечивало достаточную стабильность позвоночника даже без дополнительной передней стабилизации и позволяло достаточно быстро передать пациента на следующий этап онкологического лечения (т.е. приступить к химио-, лучевой терапии либо к хирургическому удалению источника метастазирования – основного опухолевого очага), а при дальнейшем метастазировании и ослаблении опороспособности одного из винтов – сохраняло общую стабильность системы (рис. 5).

Для установки спицы при спондилосинтезе использовали троакар-иглу PAK Needle. Управляемый педикулярный шуп и метчик позволяли корректно



Рис. 5. Контрольная компьютерная томография. Визуализация 8-опорной системы транспедикулярной фиксации позвонков Th₁₁-L₁-L₃-L₄ системой Expedium через 14 мес после резекции позвонка L₂ по поводу метастаза рака щитовидной железы (пациент Ф., 42 лет). Вокруг правого нижнего винта в позвонке L₄ выявлен новый участок остеолитического под действием нового метастаза, но опороспособность системы сохранена (клинические проявления также отсутствуют)

Fig. 5. Control computed tomography. Visualizing the 8-base system of transpedicular Th₁₁-L₁-L₃-L₄ fixation by the Expedium system 14 months after L₂ resection due to thyroid cancer metastasis (patient Ф., 42 years old). Around the right lower screw inside L₄ there is a new osteolysis site because of a new metastasis, however system support ability is preserved (no clinical manifestations as well)

здать направление имплантации винта. При этом интраоперационное использование 3D-визуализации облегчало выбор длины и диаметра винтов и оценку приближающейся резистентности при имплантации винта. На дисплее навигационной станции одновременно выводились изображения во фронтальной, сагиттальной и аксиальной проекциях (рис. 6). Дальнейшее

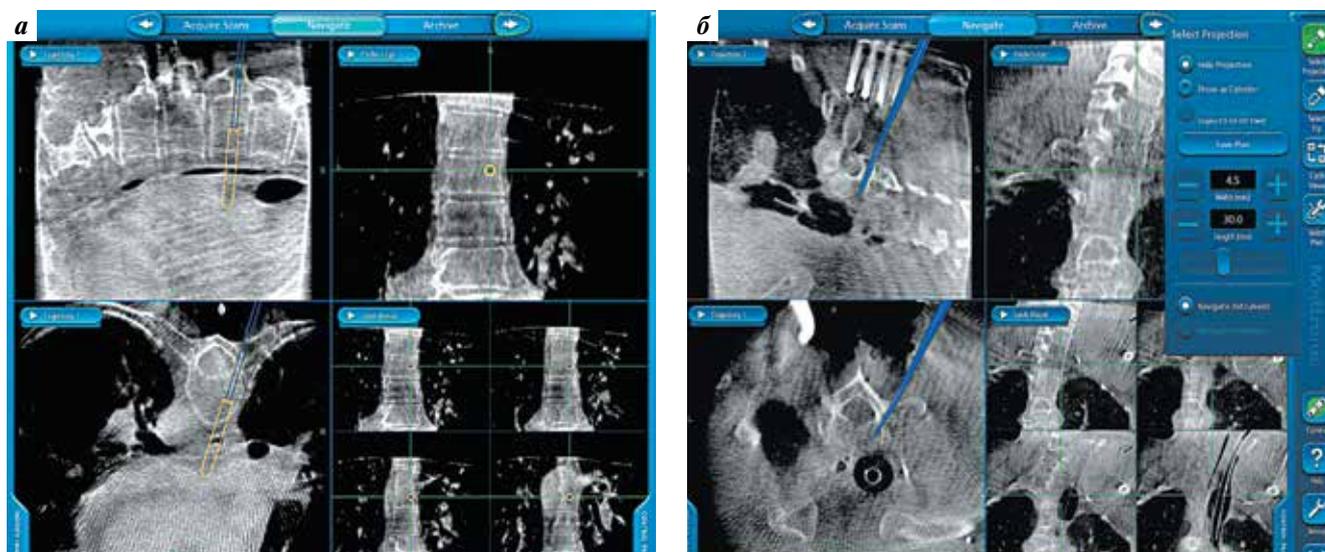


Рис. 6. Трехмерная визуализация траектории прохождения винта и навигационная прорисовка инструментов при проведении стандартной спондилосинтеза: а – проведение иглы (PAK Needle) через корень дужки позвонка (в грудном отделе); б – установка винта в верхнегрудном отделе

Fig. 6. Three-dimensional visualization of the screw trajectory and navigational instruments drawing during standard spondylosynthesis: а – passing a PAK Needle through the root of the vertebral arch (thoracic region); б – screw installation in the upper chest

проведение иглы осуществляли под строгим контролем в 3 плоскостях, особенно аксиальной и сагитальной.

Установка транспедикулярных винтов на всех этапах проводилась с использованием навигации без флюороскопического контроля (см. рис. 6), хотя именно на этом этапе лучевая нагрузка наиболее высока [15–17]. После установки всех винтов и стержней, не удаляя порты, выполняли контрольную интраоперационную КТ для проверки правильности расположения всех винтов, оценки результатов репозиции.

Интраоперационный контроль правильности установки стабилизирующей системы включал:

1. Непрерывный нейрофизиологический мониторинг в режиме спонтанных двигательных потенциалов, вызываемых с мышц, которые иннервируются корешками. Мониторинг проводили с использованием аппарата Medtronic NIM Eclipse на этапах имплантации винтов, удаления опухоли и контроля степени тракции дурального мешка.
2. Стимуляционную миографию в режиме screw test, при которой используется стандартный монополярный зонд с шариком на конце, устанавливаемый в центр головки винта.
3. Использование иглы PAK Needle при первом формировании канала для установки направляющей спицы.
4. Повторное сканирование O-Arm (MVS) для оценки правильности расположения элементов стабилизирующих систем (рис. 7).

После завершения спондилосинтеза начинался основной этап операции – удаление опухоли. На данном этапе использование O-Arm позволяло оценить

радикальность удаления объемного образования и степень декомпрессии позвоночного канала (рис. 8а). Перед удалением опухоли проводили ламинэктомию выше и ниже ее до неизменных элементов дурального мешка и корешков. Корешок, сдавленный опухолью, визуализировали на всем протяжении от места отхождения до выхода в межпозвонковое отверстие – это основное условие для послеоперационного регресса выраженного болевого корешкового синдрома (рис. 8б). Особое внимание при удалении опухоли обращали на то, что корешок мог быть истончен и распластан на ней, поэтому даже при экстравертебральном рассечении капсулы опухоли он может быть поврежден. Это особо актуально для поясничного отдела, где повреждение корешка могло вызвать утрату двигательной функции. В грудном отделе была возможна резекция 1–2 корешков без утраты функций, если необходимость этого была продиктована самим ходом операции, но, как правило, выделение корешка было технически возможным.

Статистический анализ. Статистическую и математическую обработку результатов проводили с помощью пакета программ Microsoft Office 365 (2019) и Matlab 7. Для оценки статистической значимости полученных результатов использовали непараметрический U-критерий Уилкоксона–Манна–Уитни. Результаты представлены в виде $M \pm m$, где M – среднее арифметическое, а m – ошибка среднего. Различия считали значимыми при $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

У большинства пациентов ($n = 34$; 77,3 %) появление болевого синдрома было первым признаком

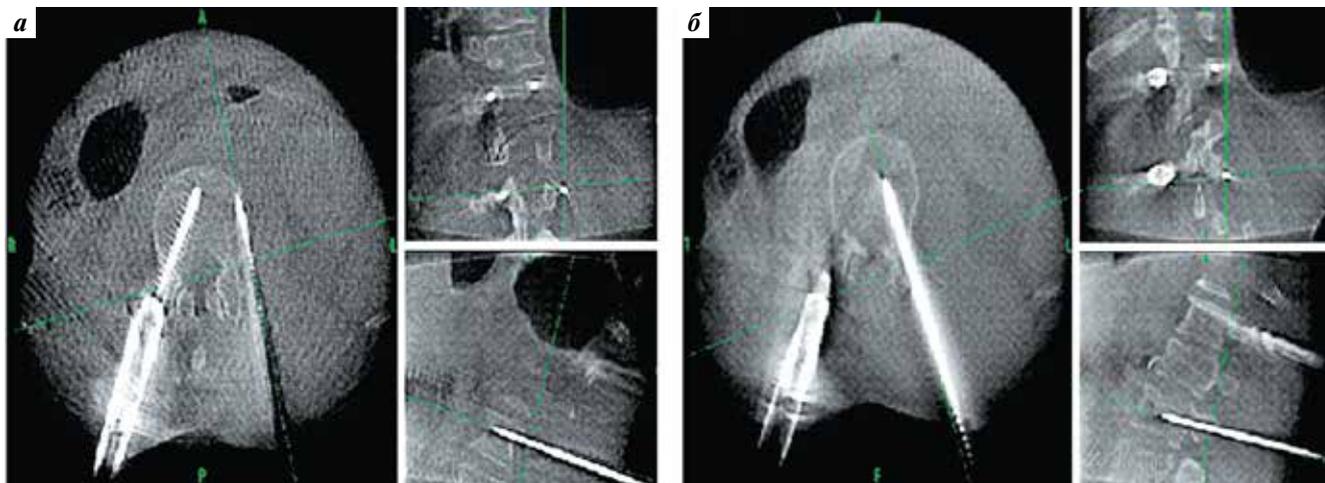


Рис. 7. Трехмерная визуализация траектории прохождения винта: а – пример ошибки при проведении транспедикулярных винтов – парапедикулярное прохождение винта; б – интраоперационная коррекция ошибки – правильное расположение инструментов для спондилудеза под контролем навигации

Fig. 7. Three-dimensional visualization of the screw trajectory: a – an example of an error when passing transpedicular screws – parapedicular screw passage; б – intraoperative error correction – correct location of instruments for spinal fusion under navigation control

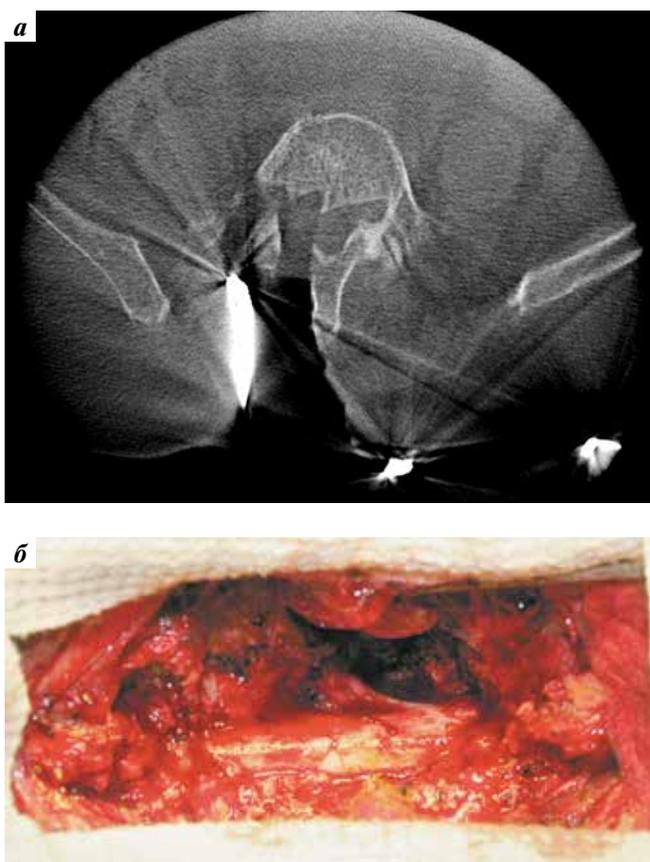


Рис. 8. Интраоперационный контроль тотальности удаления опухоли и степени декомпрессии позвоночного канала: а – компьютерная томография с использованием аппарата O-Arm; б – интраоперационная фотография. Полное освобождение дурального мешка и компримированного корешка

Fig. 8. Intraoperative control of total tumor removal and decompression degree of the spinal canal: а – computed tomography using the O-Arm apparatus; б – intraoperative photography. Complete release of the dural sac and compressed root

заболевания. Болевой синдром был выраженным (7–10 баллов по ВАШ) у 29 (65,9 %) пациентов, умеренным (4–7 баллов) – у 11 (25 %). Средняя выраженность болевого синдрома по ВАШ до операции составляла $6,3 \pm 0,3$ балла. Степень нарушения неврологических функций варьировала от выраженного пареза с неполными нарушениями чувствительности (степень С, 11 (25 %) случаев) до умеренного пареза с достаточной силой для ходьбы с посторонней помощью и с неполными нарушениями чувствительности (степень D, 18 (40,9 %) случаев). Более серьезные чувствительные и двигательные нарушения отмечались в 6 случаях: полное отсутствие чувствительности и движений ниже уровня компрессии спинного мозга (степень А) – у 2 (4,5 %) пациентов, парез с выраженными нарушениями чувствительности (степень В) – у 4 (9,1 %). У 19 (43,2 %) пациентов в той или иной степени присутствовали тазовые нарушения. У 9 (20,5 %) пациентов значимые чувствительные или двигательные нарушения не выявлены (степень Е).

На дооперационном этапе 28 (63,6 %) пациентов нуждались в постоянной посторонней помощи (<50 % по шкале Karnofsky, 3–4 балла по шкале ECOG), 10 (22,7 %) пациентов были способны к самообслуживанию, но их способность к нормальной деятельности или активной работе была ограничена (60–70 % по шкале Karnofsky, 2 балла по шкале ECOG). Незначительное снижение качества жизни пациентов (80–90 % по шкале Karnofsky, 1 балл по шкале ECOG) отмечено у 6 (13,6 %) пациентов.

Распространенность метастатических опухолей в позвоночнике по классификации К. Tomita и соавт. [20, 21] была следующей: тип 3 выявлен у 6 (13,6 %) пациентов, тип 4 – у 19 (43,2 %), типы 5 и 6 – соответственно у 11 (25 %) и 8 (18,2 %).

Наиболее часто причиной поражения позвоночника были плазмноклеточные миеломы (у 15 (34,1 %) пациентов) и метастатические опухоли (у 12 (27,3 %) пациентов). Первичные опухоли костной и хрящевой тканей диагностированы у 5 (11,4 %) пациентов, опухоли сосудистого происхождения (гемангиома, гемангиосаркома, гемангиоперицитомы) — у 5 (11,4 %), псевдоопухолевые процессы (туберкулез, остеомиелит, абсцесс) — у 4 (9 %), доброкачественные образования корешков спинного мозга — у 3 (6,8 %).

Поражение позвоночника на 1 уровне наблюдалось у 34 (77,2 %) пациентов, на 2 уровнях — у 6 (13,6 %), на 3 и более уровнях — у 4 (9 %). Поражение более 2 уровней преимущественно выявлено в грудном отделе позвоночника. Наиболее часто патологический процесс локализовался также в грудном отделе позвоночника — в 28 (63,6 %) случаях. Поражение шейного и поясничного отделов позвоночника встречалось реже — соответственно у 3 (6,8 %) и 13 (29,5 %) пациентов.

Исходы оперативных вмешательств через 6–12 мес в большинстве случаев характеризовались положительной динамикой неврологического статуса. Регресс болевого синдрома в сравнении с дооперационным уровнем в той или иной степени отмечен у 38 (86,3 %) пациентов. В среднем выраженность болевого синдрома по ВАШ после удаления объемного образования снизилась в 2,6 раза и составила в среднем $2,4 \pm 0,2$ балла ($p < 0,01$). В среднем у 79,5 % пациентов отмечено существенное улучшение неврологического статуса — уменьшение выраженности проводниковых и сенсорных расстройств. Из 35 пациентов, имевших двигательные и чувствительные нарушения перед операцией, у 24 (68,5 %) достигнуто неврологическое улучшение по меньшей мере на 1 степень по шкале Frankel: полное нарушение чувствительности и движений (степень А) наблюдалось у 1 (2,3 %) пациента, парез с сохранением элементов чувствительности (степень В) — у 2 (4,5 %), выраженный парез с частичным нарушением чувствительности (степень С) — у 6 (13,6 %), умеренный парез с неполным нарушением чувствительности (степень D) — у 12 (27,3 %), отсутствие нарушений чувствительности и движений (степень E) — у 23 (52,3 %). Случаев ухудшения неврологического дефицита после операции не зарегистрировано. В послеоперационном периоде выраженные ограничения способности к повседневной деятельности (<50 % по шкале Karnofsky, 3–4 балла по шкале ECOG) сохранялись у 11 (25 %) пациентов, могли самостоятельно обслуживать себя 19 (43,2 %) пациентов (60–70 % по шкале Karnofsky, 2 балла по шкале ECOG). Незначительное снижение или отсутствие нарушений отмечено у 14 (31,8 %) пациентов.

При проведении транспедикулярной фиксации позвоночника с использованием томографа O-Arm, совмещенного с навигационной станцией, только в 1 случае

из 294 произошло допустимое нарушение установки винта — внедрение винта в кортикальный слой на уровне позвонка L₁. Высокая точность позиционирования винтов обусловлена возможностью трехмерного планирования траектории введения винта, возможностью подбора длины и диаметра винтов в зависимости от анатомических особенностей пациента, а также возможностью ранней интраоперационной оценки правильности установки системы транспедикулярной фиксации и проведения интраоперационного нейрофизиологического мониторинга. Таким образом, правильное позиционирование винтов было достигнуто в 99,6 % случаев.

Средняя длительность операции составила $338,6 \pm 17,1$ мин. Сокращение длительности вмешательства при использовании O-Arm было связано с уменьшением времени, затрачиваемого на позиционирование 1 винта, с $9,2 \pm 2,7$ мин (при использовании С-дуги) до $5,3 \pm 1,7$ мин и уменьшением количества промежуточных процедур, обусловленных необходимостью проведения частых повторных флюороскопических исследований. Средний объем кровопотери во время операции составил $682,9 \pm 99,8$ мл. Основными осложнениями были обильное интраоперационное кровотечение ($n = 14$) и повреждение твердой мозговой оболочки ($n = 1$). Во всех случаях обильного кровотечения оно затрудняло проведение вмешательства; средняя кровопотеря при этом составляла $1207,0 \pm 256,2$ мл, а продолжительность операции увеличивалась в среднем до $350,0 \pm 23,4$ мин.

ОБСУЖДЕНИЕ

Лечение пациентов с первичными опухолями и метастатическим поражением позвоночника остается сложной задачей в связи с многообразием морфологических форм основного заболевания, распространенностью болезни на момент обнаружения объемного образования, выраженными неврологическими и соматическими нарушениями у большей части больных [2, 21, 24, 25]. Применение современных методов до- и интраоперационной нейровизуализации и диагностики привело к изменению последовательности и объема лечебных мероприятий в нейроонкологии, позволило диагностировать опухолевые поражения на более раннем этапе и в целом расширило показания к хирургическим вмешательствам, увеличило их радикальность, что в конечном итоге обеспечивает лучшие функциональные и клинические результаты [2, 23].

Транспедикулярная фиксация позвоночника — главный хирургический этап при удалении опухолей позвоночника. Однако новообразования позвоночника часто искажают нормальные анатомические ориентиры, что затрудняет правильное и безопасное позиционирование винтов и может сопровождаться серьезными неврологическими нарушениями [1, 11, 13, 26].

Использование современных 3D-технологий интраоперационной визуализации и сканирование позвоночника пациента в хирургическом положении непосредственно на операционном столе выводят технику резекции опухолей и стабилизации позвоночника на качественно новый уровень, повышают точность навигации, уменьшают величину погрешности при регистрации анатомических ориентиров, позволяя хирургу своевременно скорректировать неправильное расположение винтов и оценить радикальность операции, минимизируют объем операционной травмы и лучевую нагрузку на персонал, а также сокращают длительность операции и вероятность повторных хирургических вмешательств [2, 5, 6, 8, 12, 13, 17, 18]. Кроме того, использование 3D-визуализации и навигационных систем значительно улучшает качество хирургической техники в областях со сложной анатомией, в которых использование традиционной (2D) флюороскопической техники затруднено вследствие наложения нескольких костных структур [3, 6, 15, 17].

Мобильный интраоперационный компьютерный томограф O-Arm — относительно новая система интраоперационной визуализации, обеспечивающая получение трехмерных изображений и автоматизированную регистрацию [6, 13, 17, 19, 26, 27]. Использование O-Arm, совмещенного с навигационной станцией Stealth Station Treon Plus, позволяет объединить все достоинства КТ и 3D-флюороскопической навигации, что обеспечивает беспрецедентную глубину визуализации и возможность проведения более сложных хирургических вмешательств на позвоночнике. O-Arm может стать высокоэффективной альтернативой стандартному электронно-лучевому преобразователю, предоставляя хирургу гораздо большую свободу в выборе позиции исследования и создавая на порядок более качественные анатомические изображения. Вместо стандартного приемника флюороскопического изображения в O-Arm используется плоскостной детектор с разрешением 3 Мп, при этом зона охвата снимка O-Arm в 3 раза больше, чем при использовании стандартной С-дуги. Сканирование при использовании O-Arm занимает около 13–15 с.

Конструктивные особенности O-Arm — мобильность, размеры, сопоставимые с размерами флюороскопических установок (С-дуги), телескопический гентри, что облегчает укладку пациента, наличие специальной системы позиционирования сканирующего гентри, специальных режимов позиционирования, таких как Iso-Wag, когда гентри вращается вокруг своей вертикальной оси, выравниваясь вдоль, что позволяет сканировать, например, деформированные отделы позвоночника, а также обеспечивает возможность сканирования в положении пациента стоя, наличие парковочной позиции — такого положения гентри, при котором хирург получает доступ к зоне операции без перемещения самого O-Arm от операционного стола.

В нашей практике при удалении первичных и метастатических опухолей позвоночника O-Arm, совмещенный с навигационной станцией, применяли с целью определения области хирургического интереса в тех зонах, где флюороскопическим методом выполнить это сложно (верхний плечевой пояс, верхнешейный отдел), с целью контроля расположения фиксирующих элементов при спондилосинтезе, достаточности объема декомпрессии и радикальности удаления объемного образования, а также при проведении операций в режиме 3D-контроля и 3D-навигации, операций в зонах сложной ориентации (повторных операций, устранения последствий переломов).

Использование O-Arm, совмещенного с навигационной станцией, повышает качество хирургической помощи и увеличивает объем удаляемой ткани новообразований позвоночника, существенно сокращает длительность операции, уменьшает риск интра- и послеоперационных осложнений, таких как кровотечение и повреждение корешков спинного мозга, в немалой степени благодаря лучшей визуализации структур позвоночника и более правильному позиционированию винтов на этапе транспедикулярной фиксации.

Изначально предполагалось, что из-за необходимости подготовительных процедур и из-за громоздкости O-Arm длительность операции должна увеличиться по сравнению с таковой при использовании флюороскопической визуализации [13, 28, 29]. Но в ходе рутинного применения O-Arm, когда максимальное число подготовительных процедур стали проводить до подачи больного в операционную (включение аппаратуры, пошаговая подготовка навигационной станции к работе), длительность операции, наоборот, уменьшилась. Сканирование с использованием O-Arm проводилось только один раз, и не приходилось, как при флюороскопии, комбинировать прямые и боковые поэтапные снимки. Наш опыт подтвердил и то, что обучение молодых специалистов спондилосинтезу по данной методике происходит быстрее [13, 28, 29].

Необходимо обсудить и проблемы, возникавшие при использовании O-Arm и системы навигации. Как показывает наш опыт использования данной системы в течение 5 лет, важными, но устранимыми проблемами были сбой работы навигационной системы в ходе операции, износ иглы Джамшиди (PAK Needle), нарушение работы навигационной камеры, сбой передачи данных с навигационной станции. При этом наиболее частыми причинами сбоя навигации были износ светоотражающих шариков (что приводило к частой потере изображения инструмента), узость коридора, в котором виден инструмент, или референционная рамка, или светодиоды O-Arm, отдаленная установка референционной рамки, смещение рамки, износ головного устройства (навигационной камеры), что сопровождалось постепенным укорочением дистанции, на которой виден управляемый инструмент, компьютерный

сбой (снижение четкости изображения). Большинство данных проблем легко устранялись и не вызывали каких-либо существенных затруднений при длительной эксплуатации системы и проведении множества оперативных вмешательств.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование мобильного интраоперационного томографа O-Arm, совмещенного с навигационной станцией, при проведении декомпрессивно-стабилизирующих операций у пациентов с опухолями позво-

ночника и спинного мозга позволяет осуществлять 3D-контроль и 3D-навигацию, выполнять манипуляции в зонах сложной ориентации, обеспечивает повышенную точность имплантации транспедикулярных винтов и более радикальное удаление объемного образования с минимальной кровопотерей и агрессивностью хирургического вмешательства, а также адекватную декомпрессию позвоночного канала, что в конечном итоге дает хорошие анатомические и функциональные результаты, а также способствует улучшению клинических исходов.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Bandiera S., Ghermandi R., Gasbarrini A. et al. Navigation-assisted surgery for tumors of the spine. *Eur Spine J* 2013;22 Suppl 6:S919–24. DOI: 10.1007/s00586-013-3032-x.
- Chang K., Pham M.H., Hsieh P.C. Intraoperative imaging and navigation for minimally invasive spinal tumor surgery: case series and literature review. *World Spinal Column J* 2017;2:97–110.
- Rahmathulla G., Nottmeier E.W., Pirris S.M. et al. Intraoperative image-guided spinal navigation: technical pitfalls and their avoidance. *Neurosurg Focus* 2014;36(3):E3. DOI: 10.3171/2014.1.FOCUS13516.
- Tian N.F., Xu H.Z. Image-guided pedicle screw insertion accuracy: a meta-analysis. *Int Orthop* 2009;33(4):895–903. DOI: 10.1007/s00264-009-0792-3.
- Tjardes T., Shafizadeh S., Rixen D. et al. Image-guided spine surgery: state of the art and future directions. *Eur Spine J* 2010;19(1):25–45. DOI: 10.1007/s00586-009-1091-9.
- Verma S.K., Singh P.K., Agrawal D. et al. O-Arm with navigation versus C-arm: a review of screw placement over 3 years at a major trauma center. *Br J Neurosurg* 2016;30(6):658–61. DOI: 10.1080/02688697.2016.1206179.
- Han W., Gao Z.L., Wang J.C. et al. Pedicle screw placement in the thoracic spine: a comparison study of computer-assisted navigation and conventional techniques. *Orthopedics* 2010;33(8). DOI: 10.3928/01477447-20100625-14.
- Mason A., Paulsen R., Babuska J.M. et al. The accuracy of pedicle screw placement using intraoperative image guidance systems. *J Neurosurg Spine* 2014;20(2):196–203. DOI: 10.3171/2013.11.SPINE13413.
- Tian N.F., Huang Q.S., Zhou P. et al. Pedicle screw insertion accuracy with different assisted methods: a systematic review and meta-analysis of comparative studies. *Eur Spine J* 2011;20(6):846–59. DOI: 10.1007/s00586-010-1577-5.
- Wu H., Gao Z.L., Wang J.C. et al. Pedicle screw placement in the thoracic spine: a randomized comparison study of computer-assisted navigation and conventional techniques. *Chin J Traumatol* 2010;13(4):201–5.
- Moses Z.B., Mayer R.R., Strickland B.A. et al. Neuronavigation in minimally invasive spine surgery. *Neurosurg Focus* 2013;35(2):E12. DOI: 10.3171/2013.5.FOCUS13150.
- Larson A.N., Polly D.W. Jr, Guidera K.J. 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(6):e23–9. DOI: 10.1097/BPO.0b013e318263a39e.
- Суфианов А.А., Манащук В.И., Набиев Д.Н. и др. Чрескожный транспедикулярный остеосинтез поясничного отдела позвоночника с использованием мобильной операционной рентгеновской установки O-Arm, совмещенной с навигационной станцией. *Нейрохирургия* 2013;(3):58–64. [Sufianov A.A., Manashuk V.I., Nabiev D.N. et al. Transcutaneous transpedicular osteosynthesis of lumbar spine using mobile operative X-ray unit O-Arm in coincidence with navigation system. *Neyrokhirurgiya = Russian Journal of Neurosurgery* 2013;(3):58–64. (In Russ.).]
- Mendelsohn D., Strelzow J., Dea N. et al. Patient and surgeon radiation exposure during spinal instrumentation using intraoperative computed tomography-based navigation. *Spine J* 2016;16(3):343–54. DOI: 10.1016/j.spinee.2015.11.020.
- Riis J., Lehman R.R., Perera R.A. et al. A retrospective comparison of intraoperative CT and fluoroscopy evaluating radiation exposure in posterior spinal fusions for scoliosis. *Patient Saf Surg* 2011;1:32. DOI: 10.1186/s13037-017-0142-0.
- Srinivasan D., Than K.D., Wang A.C. et al. Radiation safety and spine surgery: systematic review of exposure limits and methods to minimize radiation exposure. *World Neurosurg* 2014;82(6):1337–43. DOI: 10.1016/j.wneu.2014.07.041.
- Ishikawa Y., Kanemura T., Yoshida G. et al. Intraoperative, full-rotation, three-dimensional image (O-Arm) based navigation system for cervical pedicle screw insertion. *J Neurosurg Spine* 2011;15(5):472–8. DOI: 10.3171/2011.6.SPINE10809.
- Kim T.T., Drazin D., Shweikeh F. et al. Clinical and radiographic outcomes of minimally invasive percutaneous pedicle screw placement with intraoperative CT (O-Arm) image guidance navigation. *Neurosurg Focus* 2014;36(3):E1. DOI: 10.3171/2014.1.FOCUS13531.
- Sembrano J.N., Polly D.W. Jr, Ledonio C.G., Santos E.R. Intraoperative 3-dimensional imaging (O-Arm) for assessment of pedicle screw position: does it prevent unacceptable screw placement? *Int J Spine Surg* 2012;6:49–54. DOI: 10.1016/j.ijssp.2011.11.002.
- Choi D., Crockard A., Bunger C. et al. Review of metastatic spine tumour classification and indications for surgery: the consensus statement of the Global Spine Tumour Study Group. *Eur Spine J* 2010;19(2):215–22. DOI: 10.1007/s00586-009-1252-x.
- Tomita K., Kawahara N., Murakami H., Demura S. Total en bloc spondylectomy for spinal tumors: improvement of the technique and its associated basic background. *J Orthop Sci* 2006;11(1):3–12. DOI: 10.1007/s00776-005-0964-y.
- Gertzbein S.D., Robbins S.E. Accuracy of pedicular screw placement *in vivo*. *Spine (Phila Pa 1976)* 1990;15(1):11–4. DOI: 10.1097/00007632-199001000-00004.
- Boriani S., Gasbarrini A., Bandiera S. et al. En bloc resections in the spine: the experience of 220 patients during 25 years. *World Neurosurg* 2017;98:217–29. DOI: 10.1016/j.wneu.2016.10.086.
- Eleraky M., Papanastassiou I., Vrionis F.D. Management of metastatic spine disease.

- Curr Opin Support Palliat Care 2010;4(3):182–8.
DOI: 10.1097/SPC.0b013e32833d2fdd.
25. North R.B., LaRocca V.R., Schwartz J. et al. Surgical management of spinal metastases: analysis of prognostic factors during a 10-year experience. J Neurosurg Spine 2005;2(5):564–73.
DOI: 10.3171/spi.2005.2.5.0564.
26. Kehayov I.I., Zhelyazkov C.B., Kalnev B.M. et al. Initial experience with O-Arm navigated spinal surgery – report on two cases. Folia Med (Plovdiv) 2016;58(4):293–8.
DOI: 10.1515/foimed-2016-0033.
27. Oertel M.F., Hobart J., Stein M. et al. Clinical and methodological precision of spinal navigation assisted by 3D intraoperative O-arm radiographic imaging. J Neurosurg Spine 2011;14(4):532–6.
DOI: 10.3171/2010.10.SPINE091032.
28. Wood M.J., McMillen J. The surgical learning curve and accuracy of minimally invasive lumbar pedicle screw placement using CT based computer-assisted navigation plus continuous electromyography monitoring – a retrospective review of 627 screws in 150 patients. Int J Spine Surg 2014;8.
DOI: 10.14444/1027.
29. Lau D., Lee J.G., Han S.J. et al. Complications and perioperative factors associated with learning the technique of minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion (TLIF). J Clin Neurosci 2011;18(5):624–7.
DOI: 10.1016/j.jocn.2010.09.004.

Вклад авторов

А.А. Суфианов: разработка дизайна исследования, проведение операций, получение данных для анализа, анализ полученных данных, написание текста статьи;

В.И. Манашук: проведение операций, получение данных для анализа, анализ полученных данных, написание текста статьи;

Д.Н. Набиев, М.К. Зайцев: проведение операций, получение данных для анализа;

А.Г. Шапкин: получение данных для анализа, анализ полученных данных, написание текста статьи;

Г.Э. Теблов, Х.Л. Абриль Арена: анализ полученных данных;

А.А. Х Аль Захрани: анализ полученных данных, написание текста статьи;

Р.С. Талыбов: получение данных для анализа, анализ полученных данных.

Authors' contributions

A.A. Sufianov: developing the research design, surgical treatment, obtaining data for analysis, analysis of the obtained data, article writing;

V.I. Manashchuk: surgical treatment, obtaining data for analysis, analysis of the obtained data, article writing;

D.N. Nabiev, M.K. Zaytsev: surgical treatment, obtaining data for analysis;

A.G. Shapkin: obtaining data for analysis, analysis of the obtained data, article writing;

G.E. Tebloev, H.L. Abril Arenas: analysis of the obtained data;

A.A. X Al Zahrani: analysis of the obtained data, article writing;

R.S. Talybov: obtaining data for analysis, analysis of the obtained data.

ORCID авторов/ORCID of authors

А.А. Суфианов/A.A. Sufianov: <https://orcid.org/0000-0001-7580-0385>

В.И. Манашук/V.I. Manashchuk: <https://orcid.org/0000-0003-2837-6328>

Д.Н. Набиев/D.N. Nabiev: <https://orcid.org/0000-0002-5380-8367>

А.Г. Шапкин/A.G. Shapkin: <https://orcid.org/0000-0001-6216-0825>

М.К. Зайцев/M.K. Zaytsev: <https://orcid.org/0000-0002-0280-9992>

Г.Э. Теблов/G.E. Tebloev: <https://orcid.org/0000-0001-9003-1596>

А.А. Х Аль Захрани/A.A. X Al Zahrani: <https://orcid.org/0000-0001-7913-5394>

Р.С. Талыбов/R.S. Talybov: <https://orcid.org/0000-0003-3820-2057>

Х.Л. Абриль Арена/Х.Л. Abril Arenas: <https://orcid.org/0000-0001-8681-0618>

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Financing. The study was performed without external funding.

Информированное согласие. Все пациенты подписали информированное согласие на участие в исследовании и публикацию своих данных.

Informed consent. All patients gave written informed consent to participate in the study and to the publication of their data.

Статья поступила: 12.11.2018. **Принята к публикации:** 20.09.2019.

Article received: 12.11.2018. **Accepted for publication:** 20.09.2019.