© КОЛЛЕКТИВ АВТОРОВ, 2013

ЧРЕСКОЖНЫЙ ТРАНСПЕДИКУЛЯРНЫЙ ОСТЕОСИНТЕЗ ПОЯСНИЧНОГО ОТДЕЛА ПОЗВОНОЧНИКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОБИЛЬНОЙ ОПЕРАЦИОННОЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ УСТАНОВКИ O-ARM, СОВМЕЩЕННОЙ С НАВИГАЦИОННОЙ СТАНЦИЕЙ

А.А. Суфианов, В.И. Манащук, Д.Н. Набиев, М.К. Зайцев, А.Г. Шапкин, Р.А. Суфианов

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Федеральный центр нейрохирургии» Министерства здравоохранения РФ, г. Тюмень, 625032, ул. 4-й км Червишевского тракта, д. 5

В статье представлен первый в России опыт применения мобильного интраоперационного томографа O-Arm совмещённого с навигационной станцией Stealth Station Treon Plus (Medtronic Navigation) при проведении чрезкожного транспедикулярного остеосинтеза поясничного отдела позвоночника.

***Целью исследования** было изучение возможности применения мобильного интраоперационного томографа O-Arm совмещённого с навигационной станцией при проведении чрезкожного транспедикулярного остеосинтеза поясничного отдела позвоночника и сравнение эффективности этого метода с использованием традиционной интраоперационной флюороскопии*

***Материалы и методы.** Были проанализированы результаты хирургического лечения 168 пациентов (72 мужчин и 96 женщин) госпитализированных и прооперированных в отделении спинальной нейрохирургии ФБГУ «Федеральный центр нейрохирургии» (г. Тюмень) в период с апреля 2011 г. по август 2012 г.*

***Результаты.** Показано, что при использовании системы визуализации O-Arm совмещённой с навигационной станцией (2-я группа, 114 пациентов, 530 винтов) правильное позиционирование винтов было достигнуто в 99,4% случаев, что было значительно лучше, чем при использовании стандартной флюороскопии с использованием С-дуги (1-я группа, 54 пациента, 258 винтов), где точность позиционирования составила только 86,8%. Среднее время оперативного вмешательства у пациентов 1 и 2 групп составляло соответственно 269,8±41,3 мин и 195,4±36,5 мин соответственно (P<0,05). Снижение времени оперативного вмешательства при использовании O-Arm было связано с сокращением времени позиционирования винтов с 9,2±2,7 мин (при использовании С дуги) до 5,3±1,7 мин (P<0,05) и уменьшения количества промежуточных процедур, связанных с необходимостью проведения частых повторных флюороскопических исследований у пациентов 1 группы.*

***Заключение.** Перкутанный транспедикулярный остеосинтез с использованием интраоперационного КТ O-Arm совмещённого с навигационной станцией является безопасным и эффективным методом лечения, который обеспечивает повышенную точность имплантации транспедикулярных винтов, снижает продолжительность оперативного вмешательства по сравнению с использованием традиционных методов рентгеноскопии.*

***Ключевые слова:** транспедикулярный остеосинтез, O-Arm, нейронавигация*

***Introduction.** We presented the first experience in Russia of the usage of mobile operational X-ray unit O-Arm combined with navigation station Stealth Station Treon Plus (Medtronic Navigation) during transcutaneous transpedicular osteosynthesis of lumbar spine.*

***Objective** — to estimate the possibility for the usage of mobile operational X-ray unit O-Arm combined with navigation station during transcutaneous transpedicular osteosynthesis of lumbar spine and comparison of this method with routine intraoperative roentgenoscopy.*

***Material and methods.** We analyzed the surgical treatment outcomes at 168 patients (72 men and 96 women) operated on in spinal neurosurgical department of FFSI «Federal; Neurosurgical Center» (Tyumen, RF) from April 2011 till August 2012.*

***Results.** The accurate positioning of transpedicular screws was achieved in 99,4% of patients during usage of X-ray unit O-Arm combined with navigation station (2d group, 114 patients, 530 screws), that was much more better comparing with the usage of routine methods of roentgenoscopy with the help of C-arch (1st group, 54 patients, 258 screws) where the accuracy of positioning was only 86,8%. The mean duration of operation was 195,4±36,5 min and 269,8±41,3 min in 2d and 1st groups respectively (P<0,05). The decreasing of operation duration in 2d group with O-Arm was related to cutting time of screws positioning from 9,2±2,7 min (during usage of C-arch) till 5,3±1,7 min (P<0,05) and decrease of the number of provisional procedures for repeated roentgenoscopic control examinations comparing with the 1st group.*

***Conclusion.** The percutaneous transpedicular osteosynthesis with the usage of mobile operational X-ray unit O-Arm combined with navigation station is the safe and effective method of surgical treatment which allows providing the high accuracy of transpedicular screws positioning as well as decreasing the duration of surgical intervention comparing with routine methods of roentgenoscopy.*

***Key words:** transpedicular osteosynthesis, O-Arm, neuronavigation*

Введение

Методы транспедикулярной фиксации (ТПФ) являются одними из наиболее часто используемых в хирургии позвоночника, позволяя надежно фиксировать позвоночно-двигательный сегмент [7, 10]. Проблемы, связанные с безопасностью проведения данных оперативных вмешательств, стимулируют хирургов к использованию более технологически совершенных и минимально-

инвазивных систем стабилизации позвоночника. Основным и наиболее распространенным осложнением применения используемых методов фиксации являются некорректное позиционирование винтов и потенциальное повреждение спинного мозга и его корешков, сопровождаемое соответствующей неврологической симптоматикой [1, 2, 5, 15]. Длительное время решение проблемы позиционирования в той или иной степени успешно осуществлялось путем использования интраоперационной флюороскопии и навигации [4, 5]. Однако данный метод требует длительного времени для сбора точек анатомических ориентиров с целью привязки их к накануне выполненному компьютерно-томографическому (КТ) исследованию и достаточно часто сопровождается возможными погрешностями при совмещении двухпозиционной флюороскопии с данными КТ при изменении положения пациента на операционном столе [16, 22]. Кроме того, существует высокий риск повышенной лучевой нагрузки для хирурга и операционной бригады [20, 23]. Перспективным направлением повышения эффективности и безопасности методов остеосинтеза позвоночника является использование систем интраоперационной КТ или мобильной операционной рентгеновской установки O-Arm, совмещенных с навигационной станцией [3, 17].

Целью исследования было изучение возможности применения мобильной операционной рентгеновской установки O-Arm, совмещенной с навигационной станцией, при проведении чрескожного транспедикулярного остеосинтеза поясничного отдела позвоночника и сравнение эффективности этого метода с использованием традиционной интраоперационной флюороскопии.

Материалы и методы

Были проанализированы результаты хирургического лечения 168 пациентов (72 мужчин и 96 женщин), госпитализированных и прооперированных в отделении спинальной нейрохирургии ФБГУ «Федеральный центр нейрохирургии» (г. Тюмень). Все операции были выполнены одной операционной бригадой в период с апреля 2011 г. по октябрь 2012 г. Транспедикулярная фиксация позвоночно-спинальных сегментов в грудном и пояснично-крестцовом отделах позвоночника с использованием обычной флюороскопии (или С-дуги) (1-я группа) была выполнена у 54 пациентов (29 мужчин и 34 женщины) в возрасте 45,3±12,4 года. Операции с использованием мобильной операционной рентгеновской установки O-Arm, совмещенной с навигационной станцией Stealth Station® Treon Plus компании Medtronic Navigation (2-я группа), произведены у 114 пациентов (43 мужчины и 62 женщины) в возрасте 47,8±11,2 года. Показаниями к оперативному лечению были заболевания позвоночника, сопровождающиеся нестабильностью позвоночно-спинального сегмента, стенозом позвоночного канала и корешковым болевым синдромом (табл. 1). Четырехопорная система транспедикулярной фиксации была установлена у 38 (70,4%) пациентов 1-й группы и 87 (76,3%) — 2-й группы, 6-опорная фиксация позвоночнка была произведена 11 (20,4%) и 17 (14,9%) пациентам 1-й и 2-й групп соответственно, системы с 8 имплантируемыми винтами были установлены у 5 (9,3%) и 10 (8,8%) пациентов 1-й и 2-й групп соответственно. Общее количество транспедикулярных винтов, проведенных в пояснично-крестцовом отделе позвоночника при использовании интраоперационной флюороскопии и системы визуализации O-Arm, совмещенной с навигационной станцией, составило соответственно 258 и 530 (табл. 2). В табл. 3 показано распределение используемых винтов по длине. У 42 (77,8%) пациентов 1-й группы (флюороскопический метод) для фиксации позвоночно-спинального сегмента использовали систему стабилизации позвоночника CDH Legacy 5.5 (Medtronic, USA), у 12 (22,2%) пациентов применили систему Viper II (DePuy Spine, Inc., USA). У 31 (27,2%) пациента 2-й группы была использована система Legacy 5.5 (Medtronic, USA), у 65 (57%) — Viper II (DePuy Spine, Inc., USA), система стабилизации EXPEDIUM Spine System ((DePuy Spine, Inc., USA)) установлена у 2 (1,8%) пациентов, Sextant II (Medtronic, USA) — у 16 (14%) и Legacy Longitude (Medtronic, USA) — у 4 (3,5%) больных. Качество позиционирования винтов у пациентов 1-й группы оценивали путем

Таблица 1 / Table 1

Распределение пациентов по видам патологических изменений пояснично-крестцового отдела позвоночника / Patients' distribution according to types of pathological changes of lumbar spine

Патологические изменения	1-я группа (C-ARM), *n* (%)	2-я группа (O-ARM), *n* (%)
Спондилолизный листез	29 (53,7)	46 (40,4)
Дегенеративная нестабильность	17 (31,5)	52 (45,6)
Опухоли тел позвонков	6 (11,1)	10 (8,8)
Последствия травмы позвоночника	2 (3,7)	6 (5,3)
Всего пациентов	54 (100)	114 (100)

Таблица 2 / Table 2

Количество винтов, используемых для фиксации позвонков пояснично-крестцового отдела позвоночника / Number of screws used for instrumentalization of lumbar and sacral vertebrae

Уровень позвоночника	1-я группа (C-ARM), *n* (%)	2-я группа (O-ARM), *n* (%)
S1	48 (18,6)	106 (20,0)
L5	92 (35,7)	192 (36,2)
L4	70 (27,1)	108 (20,4)
L3	16 (6,2)	32 (6,0)
L2	6 (2,3)	18 (3,4)
L1	0 (0)	14 (2,6)
Th4-Th12	26 (10,1)	60 (11,3)
Всего	258 (100)	530 (100)

Таблица 3 / Table 3

Распределение установленных в позвонки винтов по длине / Screws' distribution according to their length

Уровень	1-я группа (C-ARM), *n* (%)	2-я группа (O-ARM), *n* (%)
55 мм	8 (3,1)	2 (0,4)
50 мм	52 (20,2)	134 (25,3)
45 мм	160 (62,0)	280 (52,8)
40 мм	32 (12,4)	110 (20,8)
35 мм	6 (2,3)	4 (0,8)
Всего	258 (100)	530 (100)

проведения послеоперационной мультиспиральной компьютерной томографии (МСКТ), у пациентов 2-й группы контроль локализации винтов осуществляли интраоперационно сразу после установки системы транспедикулярной фиксации. Для оценки дистопии винтов использовали классификацию Learch и Wiesner [14, 25].

Техника проведения операций с использованием операционной мобильной рентгеновской установки O-Arm, совмещенной с навигационной станцией.

При проведении этапа транспедикулярной фиксации под контролем системы визуализации O-Arm (рис. 1) и навигации, навигационную стойку с оптической камерой, определяющей трехмерное расположение оптических маркеров, располагали у ног пациента, стойку визуализации с монитором располагали рядом с пациентом, напротив оперирующего хирурга, и соединяли с базовой станцией O-Arm. Аппарат O-Arm драпировали стерильным целлофановым прозрачным чехлом и после первичного прицеливания в режиме 2D на зону требуемых позвонков устанавливали на парковочное место. Через небольшой разрез устанавливали референтную рамку на остистый отросток позвонка ниже операционного уровня (рис. 3). С помощью системы O-Arm проводили интраоперационное сканирование позвоночника в режиме 3D. Данные сканирования автоматически транслировали на навигационную

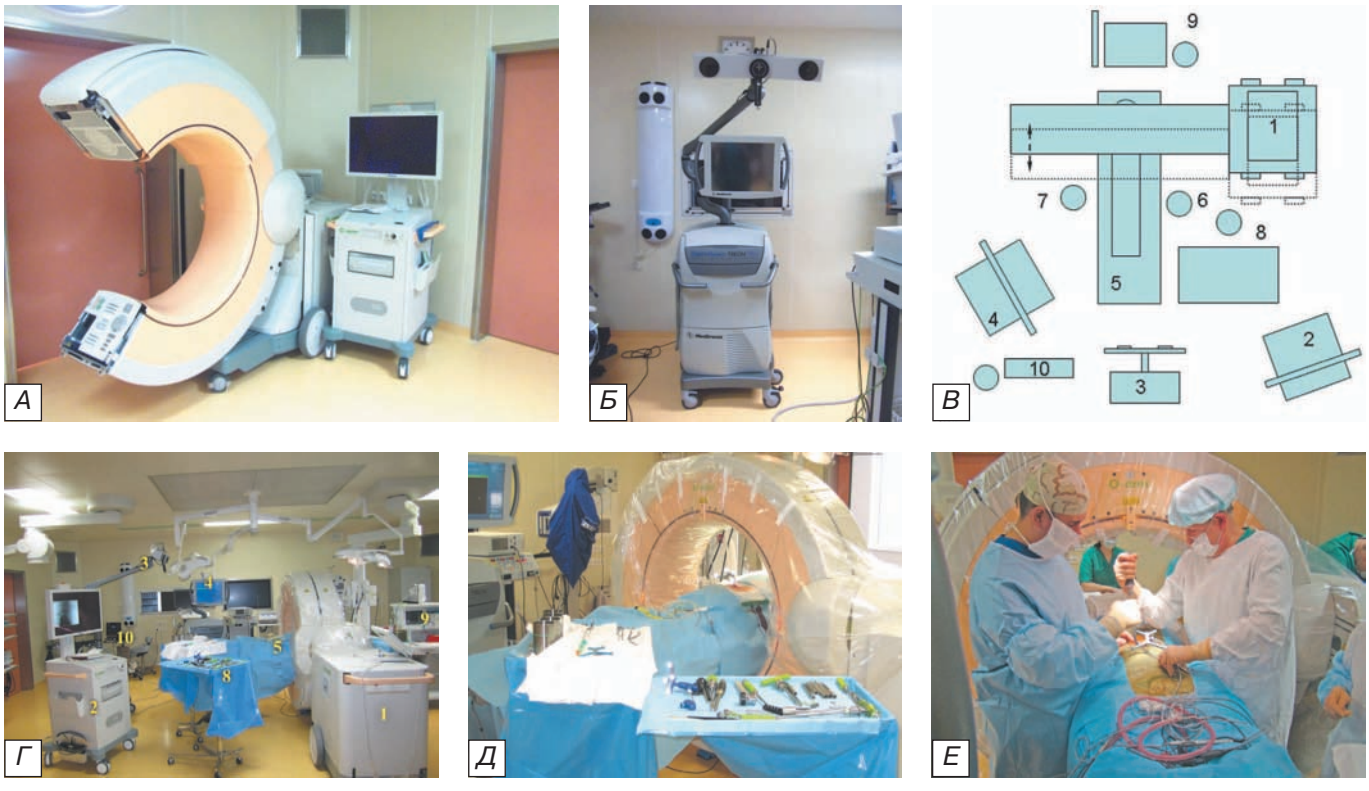


Рис. 1. А — мобильная операционная рентгеновская установка O-Arm; б — навигационная станция Stealth Station Treon Plus (Medtronic Navigation); в — схема расположения установки O-Arm, навигационной станции и операционной бригады: стрелкой указано изменение расположения установки O-Arm из парковочного положения в режим сканирования; г — фото размещения в операционной, д — интраоперационное сканирование позвоночника в режиме 3D; е — парковочная позиция устновки O-Arm и расположение операционной бригады: 1 — гентри установки O-Arm; 2 — мобильная станция планирования установки O-Arm; 3 — навигационная стойка с навигационной камерой Stealth Station Treon Plus; 4 — стойка визуализации Stealth Station Treon Plus; 5 — операционный стол; 6 — главный хирург; 7 — ассистент; 8 — операционная сестра; 9 — рабочее место анестезиологической бригады; 10 — расположение нейрофизиолога (нейромониторинг).
Fig. 1. A — mobile operation X-ray unit O-Arm; б — navigation station Stealth Station Treon Plus (Medtronic Navigation); в — schematic arrangement of X-ray unit O-Arm, navigation station and operative team: arrow shows the changing of X-ray unit O-Arm position from parking to scaning mode; г — image of placement in operative theatre, д — intraoperative scanning of vertebral column in 3D-mode; e — parking position of X-ray unit O-Arm and position of operational team: 1 — gantry of X-ray unit O-Arm; 2 — mobile planning station of X-ray unit O-Arm; 3 — navigation system with navigation camera Stealth Station Treon Plus; 4 — visualization stand of Stealth Station Treon Plus; 5 — operational table; 6 — surgeon; 7 — assistant; 8 — surgical nurse; 9 — anesthesiological team; 10 — neurophysiologist (neuromonitoring).

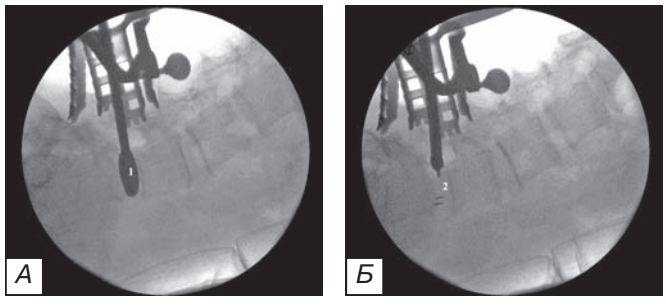
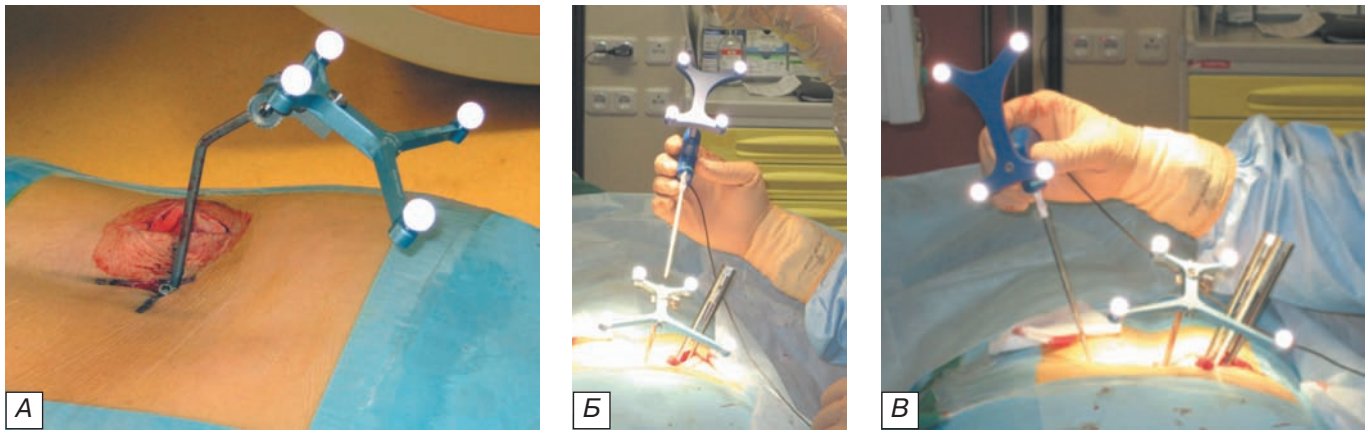
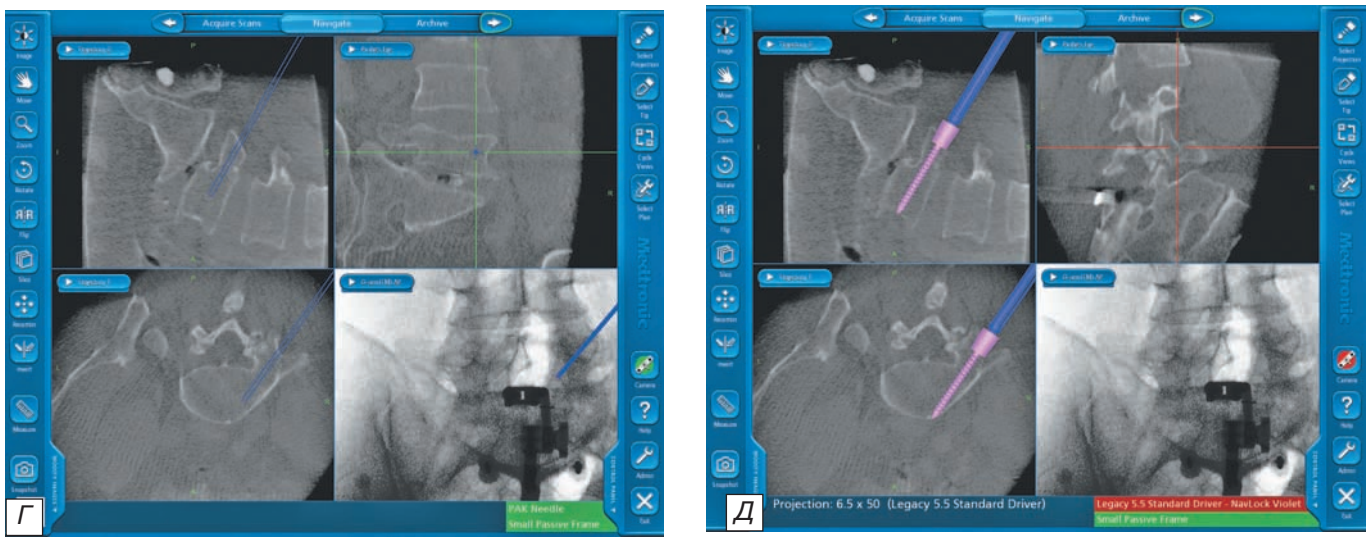


Рис. 2. Флюороскопический контроль уровня и глубины установки межтелового кейджа с использованием методики TLIF (интраоперационные фотографии). а — подбор длины и ширины межтелового имплантата с использованием пробника (1); б — контрольная рентгенограмма установленного кейджа (2).
Fig. 2. Roentgenoscopic control of the level and depth of interbody cage positioning with the usage of TLIF method (intraoperative images). a — selection of length and width of interbody implant with the usage of tester (1); б— control roentgenogram of positioned cage (2).





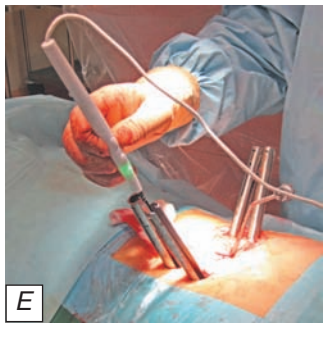


Рис. 3. Интраоперационная фотография этапов чрескожного спондилосинтеза с использованием навигационной станции Stealth Station. а — установленная референтная рамка; б — регистрация прямого навигационного инструмента (навигируемый троакар для чрескожного проведения транспедикулярных винтов с закрепленными на нем рамкой со светоотражающими сферами); в —установка на кожу троакар-иглы PAAK Needl для чрескожного проведения транспедикулярных винтов; г — визуальный контроль виртуальной траектории прохождения винта троакара при установке и проведении троакар-иглы PAAK Needl; д — виртуальный 3D-подбор траектории прохождения предполагаемого винта, а также параметров его длины и толщины при помощи процедуры «прогнозирования на шаг вперед»; е — электрофизиологический контроль для исключения соприкосновения винтов со спинномозговыми нервами.
Fig. 3. Intraoperative image of transcutaneous spondylosynthesis steps with the usage of navigation station Stealth Station. a — the positioned referential frame; б — registration of direct navigational instrument (navigated troacar for trancutaneous positioning of transpedicular screws with fixed frame and reflecting spheres on it); в — the placement of troacar-needle PAAK Needle on skin for transcutaneous positioning of transpedicular screws; г — visual control of virtual trajectory for troacar screw during placement and conducting the troacar-needle PAAK Needle; д — virtual 3D-selection of passing trajectory of supposed screw as well as parameters of its length and width using “predicting in one step ahead” procedure; е — electrophysiological control for avoiding of screws contact with spinal nerves.

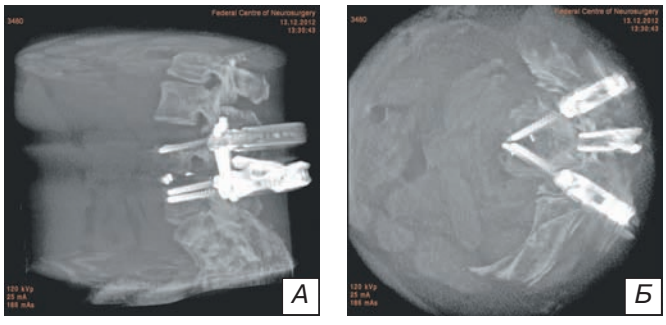


Рис. 4. Интраоперационное 3D-рентгеновское исследование для контроля за расположением всех винтов после проведения чрескожного спондилосинтеза в сагиттальной (а) и аксиальной (б) проекциях.
Fig. 4. Intraoperative 3D-roentgenological examination for checking of all screws' position after transcutaneous spondylosynthesis in sagittal (a) and axial (б) projections.

станцию. Через верификационное гнездо референтной рамки производили автоматическую регистрацию прямого навигационного инструмента, как правило, навигируемого троакара для чрескожного проведения транспедикулярных винтов, либо других инструментов с закрепленными на них рамками со светоотражающими сферами (см. рис. 3б). На первом этапе пациентам по показаниям проводили манипуляции, направленные на декомпрессию и установку межтеловых кейджей с использованием методики TLIF (рис. 2). Контроль уровня и глубины установки имплантата контролировали с помощью флюороскопии (рис. 2б), полноту декомпрессии — системой O-ARM. На дисплее обычно выводили окна с одновременным изображением фронтальной, сагиттальной и аксиальной проекций. В дальнейшем выполняли перкутанный спондилосинтез. В качестве иглы для установки спицы использовали троакар-иглу PAAK Needl. Данный троакар для чрескожного проведения транспедикулярных винтов устанавливали на кожу до совпадения предполагаемой траектории прохождения винта, затем осуществляли прокол кожи и подводили иглу до точки входа в кость (см. рис. 3в). Дальнейшее проведение иглы осуществляли под строгим контролем трех плоскостей, особенно аксиальной и сагиттальной (см. рис. 3г) [24]. После установки спицы выполняли стандартную процедуру чрескожного спондилосинтеза системами Legacy, Viper 2, Sextant 2 и др. Все этапы установки транспедикулярных винтов осуществляли без флюороскопического контроля (см. рис. 3д-е), хотя именно этот этап обычно подвержен наиболее высокой лучевой нагрузке [5, 11, 23]. После установки всех винтов и стержней, не удаляя порты, проводили контрольную интраоперационную 3D-рентгенографию для определения расположения всех винтов, результатов репозиции и детальной их оценки (рис. 4).

Результаты

При использовании мобильной операционной рентгеновской установки O-Arm, совмещенной с навигационной станцией, правильное позиционирование винтов было достигнуто у 99,4% больных, что значительно лучше, чем при использовании 2D-флюороскопии, где точность позиционирования составила только 86,8%. Во 2-й группе пациентов отмечена некорректность установки 3 винтов из 530 (умеренная пенетрация по классификации Learch и Wiesner), у всех пациентов без клинических проявлений. При этом один винт внедрили в кортикальный слой на уровне позвонка L1 (незначительная пенетрация по классификации Learch и Wiesner). Из осложнений у оперированных больных (1-я группа пациентов) чаще всего наблюдали перфорацию боковой стенки тела позвонков винтом, в том числе у двоих пациентов — с клиническими проявлениями (табл. 4). Среднее время оперативного вмешательства у пациентов 1-й и 2-й групп составляло 269,8±41,3 мин и 195,4±36,5 мин соответственно ($p<0,05$). Снижение времени хирургического вмешательства при использовании O-Arm было связано с сокращением времени позиционирования винтов с 9,2±2,7 мин (при использовании C-дуги) до 5,3±1,7 мин ($p<0,05$) и уменьшением количества промежуточных процедур, связанных с необходимостью проведения частых повторных флюороскопических исследований у пациентов 1-й группы. В нашем исследовании у пациентов 1-й группы на позиционирование одного винта требовалось от 2 до 5 флюороскопических снимков (в среднем 3,9±1,6), в ходе оперативного вмешательства среднее количество флюороскопических исследований составляло 18,9±7,7, в то время как у больных 2-й 3D-рентгенографию проводили однократно, продолжительностью 13 с. Можно предположить значительное снижение суммарной лучевой нагрузки на персонал операционной во время хирургического вмешательства с использованием системы визуализации O-Arm, совмещенной с навигационной станцией.

Таблица 4 / Table 4

Погрешность установки винтов при транспедикулярной фиксации (по классификации Learch и Wiesner) / The failure of accuracy of screws' positioning during transpedicular fixation (by classification of Learch and Wiesner)

Величина погрешности установки винтов	1-я группа (C-ARM), *n* (%)	2-я группа (O-ARM), *n* (%)
Менее 3 мм	12 (4,7)	2 (0,37)
3—6 мм	19 (7,4)	1 (0,19)
Более 6 мм	3 (1,2)	0 (0)
Всего	34 (13,2)	3 (0,56)

Обсуждение

Транспедикулярный остеосинтез является высокотехнологичным методом оперативного лечения, требующим наличия хирургического опыта и особой точности позиционирования фиксирующих винтов. Согласно данным литературы, при использовании 2D-флюороскопии при пози-

ционировании винтов, отклонения в их размещении наблюдаются в 10—15% случаев, достигая, по данным некоторых авторов, 40% [12, 19]. Неврологические нарушения, связанные с диспозицией винтов, в послеоперационном периоде могут встречаться в 16,6% наблюдений [8]. Применение интраоперационной КТ- навигации и 3D-флюороскопической навигации увеличивает вероятность правильного размещения винтов до 90,3% (72—95,7%) и 97,2% (80,8—99,3%) соответственно. Недостатками этих способов являются сложность позиционирования при нарушеной анатомии позвоночного столба и невысокое качество получаемых интраоперационных изображений. При использовании этих систем навигации требуется много времени на сбор информации и наличие большого хирургического опыта, кроме того, значительно возрастает риск возникновения ошибки при изменении положения тела пациента во время проведения операции. Существенным недостатком данных методов также является высокая лучевая нагрузка на персонал операционной и пациента. Использование установки O-Arm в сочетании с навигационной станцией Stealth Station® Treon Plus (Medtronic Navigation) совмещает в себе все положительные свойства КТ- и 3D-флюороскопической навигации, что предоставляет хирургу беспрецедентную глубину визуализации и возможность проведения более сложных хирургических вмешательств на позвоночнике, а также снижает лучевую нагрузку на персонал операционной. Как показало наше исследование, степень точности позиционирования винтов при использовании системы визуализации O-Arm, совмещенной с навигационной станцией, составляет 99,4%. У больных, прооперированных с использованием С-дуги на нашем материале, точность позиционирования винтов была существенно ниже и составила 86,8%. Кроме того, как показала практика, использование для ТПФ системы визуализации O-Arm, совмещенной с навигационной станцией, снижает не только риск некорректного позиционирования винтов, но и время хирургической операции. Изначально предполагалось, что существенным фактором удлинения операции должно было являться наличие подготовительных процедур по навигации и громоздкость аппаратуры по сравнению с флюороскопической методикой [12, 18]. Но в ходе отработки технологии, когда максимальное число подготовительных процедур стали проводить до подачи больного в операционную (включение аппаратуры, выполнение пошаговых подготовительных этапов в навигационной станции), время на проведение операции значительно уменьшилось. Сканирование системой O-Arm для позиционирования винтов проводили только один раз, и не требовалось, как при флюороскопии, использовать в комбинации прямые и боковые поэтапные снимки, особенно при перенаправлении иглы. На нашем опыте подтвердилось, что обучение спондилосинтезу по данной методике молодых специалистов происходит быстрее [6, 13]. Наши данные согласуются и с данными других исследователей, имеющих опыт использования мобильной операционной рентгеновской установки в хирургии позвоночника [9, 18, 21].

Заключение

Перкутанный транспедикулярный остеосинтез с использованием мобильной операционной рентгеновской установки O-Arm, совмещенной с навигационной станцией, является безопасным и эффективным методом лечения. Он обеспечивает повышенную точность имплантации транспедикулярных винтов, снижает суммарную лучевую нагрузку на больного и персонал в операционной, уменьшает продолжительность операции и вероятность осложнений по сравнению с использованием традиционных методов рентгеноскопии.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Суфианов Альберт Акрамович — ФГБУ «Федеральный центр нейрохирургии» (г. Тюмень) Минздрава России, главный врач, доктор медицинских наук, профессор

Манащук Валерий Иванович — ФГБУ «Федеральный центр нейрохирургии» (г. Тюмень) Минздрава России, врач-нейрохирург, заведующий 3 нейрохирургическим отделением

Набиев Давид Нодарович — ФГБУ «Федеральный центр нейрохирургии» (г. Тюмень) Минздрава России, врач-нейрохирург

Зайцев Максим Константинович — ФГБУ «Федеральный центр нейрохирургии» (г. Тюмень) Минздрава России, врач-нейрохирург

Шапкин Андрей Григорьевич — ФГБУ «Федеральный центр нейрохирургии» (г. Тюмень) Минздрава России, врач-нейрохирург, кандидат медицинских наук

Суфианов Ринат Альбертович — студент Первого МГМУ им. И.М. Сеченова

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бердюгин К.А., Чертков А.К., Штадлер Д.И.* и др. Ошибки и осложнения транспедикулярной фиксации позвоночника погружными конструкциями // Фундаментальные исследования. 2012. № 4 (часть 2). С. 425-431.
2. *Валеев И.Е.* Классификация осложнений транспедикулярных операций позвоночника // Травматология и ортопедия России: научно-практический журнал: актуальные вопросы травматологии и ортопедии, посвящ. 100-летию со дня основания РНИИТО им. Р.Р. Вредена. СПб. 2006. № 2. С. 58.
3. *Суфианов А.А., Манащук В.И., Набиев Д.Н.* и др. Транспедикулярный остеосинтез с использованием навигационной станции и интраоперационной системы O-arm. Первый опыт // Сибирский международный нейрохирургический форум (18-21.06.2012): Сборник материалов. Новосибирск. 2012. С.109.
4. *Раткин И.К., Батрак Ю.М., Светашов А.Н.* и др. Задняя фиксация позвоночника при компрессионных переломах грудного и поясничного отделов // Хирургия позвоночника. 2008. № 2. С. 8—13.
5. *Усиков В.Д.* Руководство по транспедикулярному остеосинтезу позвоночника. СПб. 2006.
6. *Cardoso M.J., Rosner M.K.* Does the Wilson frame assist with optimizing surgical exposure for minimally invasive lumbar fusions? // Neurosurg. Focus. 2010. №:28(5). E20.

7. *Gaines R.W.* The use of pedicle-screw internal fixation for the operative treatment of spinal disorders //J. Bone Joint. Surg. Am. 2000. №82-A. P. 458—1476.
8. *Gelalis I.D., Paschos N.K., Pakos E.E.* et al. Accuracy of pedicle screw placement: a systematic review of prospective in vivo studies comparing free hand, fluoroscopy guidance and navigation techniques // Eur. Spine J. 2011. №21. P. 247—255.
9. *Hodez C., Griftaton-Taillandier C., Bensimon I.* Cone-beam imaging: applications in ENT// Eur Ann Otorhinotaryngol Head Neck Dis. 2011. №128(2) . P.65-78.
10. *Kandziora F., Schnake K.J., Klostermann C.K.* et al. Vertebral body replacement in spine surgery// Unfallchirurg. 2004. №107. P.354—371.
11. *Kim G.W., Lee Y.R., Taylor W.* et al. Use of navigation-assisted fluoroscopy to decrease radiation exposure during minimally invasive spine surgery// Spine J. 2008. №8(4) . P.584-590.
12. *Laine T., Schlenzka D., Makitalo K.* et al. Improved accuracy of pedicle screw insertion with computer-assisted surgery. A prospective clinical trial of 30 patients// Spine (Phila Pa 1976). 1997. №22(11) . P.1254-1258.
13. *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) . P.624-627.
14. *Learch T.J., Massie J.B., Pathria M.N.,* et al. Assessment of pedicle screw placement utilizing conventional radiography and computed tomography: a proposed systematic approach to improve accuracy of interpretation // Spine. 2004. №29. P.767—773.
15. *Lonstein J.E., Denis F., Perra J.H.* et al. Complications associated with pedicle screws // J. Bone Joint. Surg. Am. 1999. №81. P.1519—1528.
16. *Merloz P., Tonetti J., Pittel L.* et al. Pedicle screw placement using image guided techniques // Clin. Orthop. Relat. Res. 1998. №354. P.39—48.
17. *Nottmeier E.W., Seemer W., Young P.M.* Placement of thoracolumbar pedicle screws using three-dimensional image guidance: experience in a large patient cohort // J. Neurosurg. Spine. 2009. №10. P.33—39.
18. *Oertel M.F., Flobart J., Stein M.* et al. Clinical and methodological precision of spinal navigation assisted by 3D intraoperative O-arm radiographic imaging // J. Neurosurg. Spine. 2011. №l4(4) . P.532-536.
19. *Park Y., Ha J.W., Lee Y.T.* et al. Percutaneous placement of pedicle screws in overweight and obese patients // Spine J. 2011. №11. P.919—24.
20. *Rampersaud Y.R., Foley K.T., Shen A.C.* et al. Radiation exposure to the spine surgeon during fluoroscopically assisted pedicle screw insertion // Spine (Phila. Pa. 1976). 2000. №25(20) . P.2637-2645.
21. *Ringel F., StofFel M., Stuer C.* et al. Minimally invasive transmuscular pedicle screw fixation of the thoracic and lumbar spine // Neurosurgery. 2006. №59(4 suppl. 2): ONS361-ONS366; discussion ONS366- ONS367.
22. *Sakai Y., Matsuyama Y., Nakamura H.* et al. Segmental pedicle screwing for idiopathic scoliosis using computer-assisted surgery // J. Spinal. Disord. Tech. 2008. №21. P.181—186.
23. *Theocharopoulos N., Perisinakis K., Damilakis J.* et al. Occupational exposure from common fluoroscopic projections used in orthopaedic surgery // J. Bone Joint. Surg. Am. 2003. №85-A(9) . P.1698-1703.
24. *Uksul N., Suero E.M., Stubig T.* et al. Mechanical stability analysis of reference clamp fixation in computer-assisted spine surgery // Arch. Orthop. Trauma. Surg. 2011. №131(7). P.963-968.
25. *Wiesner L., Kothe R., Ruther W.* Anatomic evaluation of two different techniques for the percutaneous insertion of pedicle screws in the lumbar spine // Spine. 1999. №24. P.1599—1603.