



ТРАНСПЕДИКУЛЯРНАЯ ФИКСАЦИЯ В ШЕЙНОМ ОТДЕЛЕ ПОЗВОНОЧНИКА: ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ И КЛИНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

А.Я. Алейник, С.Г. Млявях, А.Е. Боков

Приволжский федеральный медицинский исследовательский центр, Нижний Новгород, Россия

Проведен анализ ключевых зарубежных публикаций, посвященных транспедикулярной фиксации в шейном отделе позвоночника. Установка транспедикулярных винтов в шейном отделе позвоночника является технически сложной процедурой. Даже при применении современных интраоперационных технологий частота отклонения винтов от оптимальной траектории остается высокой, при этом существует риск серьезных жизнеугрожающих осложнений. Данная методика позволяет добиться надежной трехколонной стабилизации шейного отдела позвоночника из одного заднего доступа, что является предпочтительным или единственно возможным вариантом для ограниченной группы пациентов. В среднем смещение винтов за пределы границ ножки, по данным литературы, происходит в 15–20 % случаев. При этом клинически значимые осложнения происходят в 4–5 % случаев. У 32 прооперированных пациентов отмечено одно тяжелое неврологическое осложнение, вызванное сдавлением позвоночной артерии винтом. Из 79 установленных винтов в 18 (22,79 %) случаях наблюдалась латеральная перфорация стенок корня дужки позвонка. Нестабильности фиксатора, инфекции и радикулопатии из-за сдавления винтом не отмечено.

Ключевые слова: транспедикулярная фиксация, стабилизация шейного отдела позвоночника, задняя фиксация шейного отдела позвоночника.

Для цитирования: Алейник А.Я., Млявях С.Г., Боков А.Е. Транспедикулярная фиксация в шейном отделе позвоночника: обзор литературы и клинические данные // Хирургия позвоночника. 2017. Т. 14. № 3. С. 47–53.
DOI: <http://dx.doi.org/10.14531/ss2017.3.47-53>.

TRANSPEDICULAR SCREW FIXATION OF THE CERVICAL SPINE: LITERATURE REVIEW AND CLINICAL DATA

A.Ya. Aleynik, S.G. Mlyavikh, A.E. Bokov

Privolzhsky Federal Research Center, Nizhny Novgorod, Russia

An analysis of key publications devoted to transpedicular fixation of the cervical spine has been carried out. The installation of transpedicular screws in the cervical spine is a technically challenging procedure, the frequency of screw deviation from the optimal trajectory remains high even with the use of modern intraoperative technologies, and there is a risk of serious life-threatening complications. The use of this technique allows achieving reliable three-column stabilization of the cervical spine through only posterior approach, which is the preferred or only possible option for a limited group of patients. According to literature data, screw displacement beyond the pedicle borders occurs, on average, in 15–20 % of cases, while clinically significant complications occur in 4–5 % of cases. Among 32 operated patients, one severe neurologic complication caused by vertebral artery compression by the screw was noted. Of the 79 installed screws, 18 (22.79 %) cases of lateral pedicle wall perforation were observed. There were no cases of the fixator instability, infection and radiculopathy due to compression by the screw.

Key Words: pedicle screw fixation, cervical spine stabilization, posterior cervical spine fixation.

Please cite this paper as: Aleynik AYa, Mlyavikh SG, Bokov AE. Transpedicular screw fixation of the cervical spine: literature review and clinical data. Hir. Pozvonoc. 2017;14(3):47–53. In Russian.
DOI: <http://dx.doi.org/10.14531/ss2017.3.47-53>.

В настоящее время транспедикулярная фиксация является золотым стандартом при стабилизации грудного и поясничного отделов позвоночника. В шейном отделе данный метод до настоящего времени применяли достаточно ограниченно, что связано с технической сложностью процедуры и высоким риском тяжелых интраоперационных и послеоперационных осложнений [8]. Кроме того, существует возможность надежной стабили-

зации шейного отдела позвоночника винтами за боковые массы позвонков или крючками за дужки. Однако с каждым годом увеличивается число операций при различных заболеваниях позвоночника, в том числе повторных и связанных с коррекцией тяжелых деформаций. Проведение таких вмешательств предъявляет высокие требования к надежности фиксирующих элементов, что поднимает инте-

рес к транспедикулярной фиксации шейного отдела позвоночника.

Внедрение в клиническую практику транспедикулярной фиксации при заболеваниях шейного отдела позвоночника началось в конце прошлого века. В 1994 г. была опубликована работа японских авторов [1], в которой описано применение транспедикулярной фиксации в лечении 13 пациентов с травматическими повреждениями шейного отдела

позвоночника. Во всех случаях удалось добиться формирования костного блока, осложнений, связанных с проведением винтов, не было. Это позволило сделать вывод о том, что проведение подобной операции опытным хирургом, при тщательном соблюдении методики, описанной авторами, даст возможность достигнуть такой же надежной трехколонной стабилизации из заднего доступа, как при транспедикулярной фиксации в грудном и поясничном отделах позвоночника.

В дальнейшем Abumi et al. [2] опубликовали ряд работ, оценивающих безопасность установки транспедикулярных винтов в шейном отделе позвоночника. Был проанализирован опыт лечения 180 пациентов, которым установлено 712 винтов при травматических и нетравматических повреждениях шейного отдела позвоночника. При этом лишь в 6,7 % случаев винты выходили за границы ножек, у двух пациентов была радикулопатия, связанная со сдавлением винтом корешков спинного мозга, в одном случае во время операции отмечено повреждение позвоночной артерии. Эти результаты позволили авторам сделать вывод о безопасности данной операции при различных пораже-

ниях шейного отдела позвоночника. Тем не менее из-за риска повреждения невралжных элементов и позвоночной артерии проведение транспедикулярных винтов в шейном отделе позвоночника до настоящего времени считается рискованной процедурой и применяется ограниченным числом хирургов, специализирующихся на хирургии шейного отдела позвоночника [5].

Публикаций, посвященных данному вопросу, не так много. При поиске в системе e-Library не удалось найти ни одной ссылки по запросу «транспедикулярная фиксация шейного отдела позвоночника», при поиске в англоязычных базах данных число публикаций при запросе «pedicle screw fixation of the cervical spine» ограничивается несколькими десятками статей, а клинических исследований единицы. Поэтому мы поставили себе задачу провести анализ литературных данных по транспедикулярной фиксации шейного отдела позвоночника, сопоставить их с имеющимся в нашей клинике опытом и оценить возможности применения данного метода в лечении пациентов с травмами и заболеваниями шейного отдела позвоночника.

Техники проведения операции

Найдено описание четырех хирургических техник установки транспедикулярных винтов в шейном отделе позвоночника. Первая из них описана в работах Abumi et al. [1] и базируется на четкой оценке анатомических ориентиров и на тактильных ощущениях хирурга. По ходу операции выполняют лишь рентгеновские снимки в боковой проекции для определения направления винта в сагиттальной плоскости. Ориентиром для введения винта на уровне C_2 является краниальный край дужки, при этом верхнемедиальная граница ножки доступна визуальному контролю и пальпации с помощью инструмента (угол введения винта обычно составляет 15–25°). На уровне C_3 – C_7 точки введения винтов располагаются латеральнее центра боковой массы, рядом с нижним краем нижнего суставного отростка вышележащего позвонка на уров-

не вырезки наружного края боковых масс. Для оценки направления винта используют рентгеноскопию в боковых проекциях. Угол введения 25–45°, при этом угол отклонения винта в горизонтальной плоскости может быть значительно меньше угла отклонения ножки позвонка. Это возможно благодаря тому, что ножки позвонков в шейном отделе короткие. Направление винтов на уровне C_5 – C_7 параллельно верхней замыкательной пластинке, а на уровне C_2 – C_4 ориентировано на краниальную замыкательную пластинку. Бором перфорируют кортикальную кость, формируют углубление, позволяющее манипулировать зондом, с помощью зонда формируют канал, проходящий через ножку в тело позвонка, далее по сформированному каналу последовательно проводят метчик и винт (рис. 1).

В 2010 г. Zheng et al. [20] на основании анатомического исследования предложили несколько отличные ориентиры для выбора точек введения винтов: C_3 – латеральный край боковой массы, 4 мм каудальнее фасетки, C_4 – C_6 границы средней и внешней четверти боковой массы, 3 мм каудальнее фасетки, C_7 – середина боковой массы, 2 мм каудальнее фасетки.

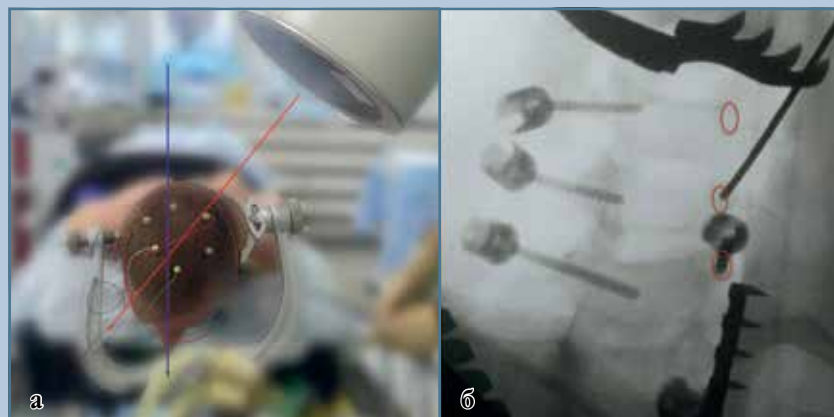
В 2006 Yukaawa et al. [19] описали введение винтов с использованием рентгенографии в косой проекции, так называемый метод взгляда по оси ножки (рис. 2). При этом рентгеновский луч направляют таким образом, чтобы четко визуализировать кортикальные пластины ножки позвонка (рис. 2.), это дает возможность направлять винт по ходу ножки позвонка, что снижает риск ее перфорации. Помимо этого, данный способ визуализирует ножки нижних шейных позвонков, которые обычно недоступны боковой рентгенографии, а также верхние и нижние границы ножек контралатеральной стороны.

В работах Ludwig et al. [14] описана установка винтов с использованием ламинофораминотомии. При этом перед установкой винта формируют окно в латеральных отделах дужки и медиальных отделах фасетки, как



Рис. 1

Точки входа для установки винтов

**Рис. 2**

Pedicle axis view: **а** – направление рентгеновского луча показано красной линией; **б** – по левой стороне установлены винты – боковой вид ножек, по правой стороне кружками обведены аксиальные срезы корней дуг позвонков

**Рис. 3**

Схема ламинофораминотомии: синий цвет – резецируемые структуры, зеленый цвет – проекция ножек позвонков

при проведении задней фораминотомии. Через это окно визуализируются границы ножки, дурального мешка и выходящий корешок, поэтому можно безопасно вводить винт под четким визуальным контролем границ корня дуги позвонка. Эту технику проведения операции (рис. 3) рекомендует АО Foundation (www2.aofoundation.org).

Развитие современных методов визуализации в спинальной хирургии отразилось на методике проведения транспедикулярной фиксации шейного отдела позвоночника, описаны и исследованы способы установки винтов с использованием компьютерных навигационных систем [9]. Однако в ряде исследований показано, что применение при данной операции навигационных систем не повышает точности установки винтов, а в ряде случаев уменьшает ее [14]. Полученные данные, по всей видимости, связаны со сложностью применения навигационных систем в шейном отделе позвоночника, что объясняется высокой подвижностью шейных позвонков. Тем не менее, по данным других авторов [7, 9, 13], использование навигационных систем повышает точность и безопасность процедуры транспедикулярной фиксации в шейном отделе. *Клинические и биомеханические исследования*

В ряде биомеханических исследований показано, что стабильность транспедикулярных винтов значительно выше, чем у винтов в боковых массах [6, 10, 11]. Так, при вырывании транспедикулярных винтов потребовалось усилие в 677 Н, а при вырывании винта из боковой массы – 355 Н. Диапа-

зон движений при боковых наклонах для сегмента, фиксированного транспедикулярными винтами, составляет $0,86^\circ \pm 0,31^\circ$, в то время как для винтов в боковых массах $1,43^\circ \pm 0,62^\circ$ ($P = 0,037$). При тесте на сгибание-разгибание показатель снижения подвижности после фиксации интактного сегмента составил для транспедикулярных винтов $95,4 \pm 9,4 \%$, для винтов в боковых массах $70,5 \pm 9,8 \%$ ($P = 0,010$). Kotani et al. [10] сравнили передние фиксирующие пластины и задние фиксирующие системы. Показано, что задние фиксаторы более устойчивы к осевым нагрузкам, а также к сгибанию и ротации.

В качестве альтернативы транспедикулярной фиксации в переходных зонах (на уровне C_2 и в шейно-грудном переходе C_7-Th_2) некоторые авторы [12, 16] предлагают использовать трансламинарные винты. Такая методика установки винтов позволяет избежать риска повреждения позвоночной артерии и не требует широкого скелетирования фасеточных суставов. Следует отметить, что в субаксиальной зоне (C_3-C_6) применение ламинарных винтов возможно лишь у ограниченной группы пациентов (37–89 %, в зависимости от уровня) [4]. Таким образом, при данном варианте фиксации возникает необходимость сопряжения винтов, узлы фиксации которых расположены не на одной линии. Это приводит к техническим трудностям при установке продольных стержней и требует их дополнительного моделирования или применения коннекторов, что может уменьшить надежность конструкции. В клинических и биомеханических исследованиях показано, что ламинарные фиксаторы уступают по стабильности транспедикулярным, особенно при трехколонных повреждениях [12].

Проведен анализ медицинских публикаций, размещенных в базах данных PubMed, Web of Science, e-Library, по следующим ключевым словам: транспедикулярная фиксация в шейном отделе позвоночника, осложнения, повреждение позвоночной артерии, радикулопатия, смеще-

Таблица 1
Осложнения при проведении транспедикулярной фиксации шейного отдела позвоночника

Автор	Пациенты, п	Винты, п	Патологии	Смещение винтов (I ст.), %	Смещение винтов (II ст.), %	Смещение винтов (всего), %	Радикюлопатия, п	Повреждение позвоночной артерии, п	Инфекция, п	Нестабильность фиксатора, п	Всего осложнений, п
Kast et al. [8]	26	94	Разные	21,0	9	30,0	2	0	0	0	7,6
Abumi et al. [2]	180	712	Разные	Не оценивалось		6,7	2	1	2	0	2,7
Yukawa et al. [18]	144	620	Травма	9,2	3,9	13,1	1	1	0	4 (нет спондилодеза)	4,2
Uehara et al. [17]	129	579	Нетравматические	6,1	18,6	24,7	3	0	0	0	2,3
Nakashima et al. [15]	84	390	Нетравматические	15,4	4,1	19,5	2	3	1	11	20,2
Nojo et al. [5]	283	1065	Разные	9,6	5,3	14,9	0	2	0	0	0,7

I ст. — смещение винта менее 50 % диаметра, II ст. — смещение винта более 50 % диаметра.

ние винтов. Критериями отбора являлись наличие послеоперационного контроля положения винтов при помощи КТ с оценкой процента перфорации кортикальных стенок ножки, а также анализ осложнений, связанных с применением транспедикулярной фиксации.

Для углубленного анализа выделено пять исследований. В табл. 1 приведены данные по результатам этих исследований [2, 5, 8, 15, 17, 18].

В среднем смещение винтов за пределы границ ножки, по данным литературы, случается в 15–20 % случаев. При этом клинически значимые осложнения – 4–5 %.

Как отмечают все авторы, наиболее часто происходит перфорация латерального кортикала ножки (со стороны позвоночной артерии), это объясняется его меньшей толщиной [18]. Как видно из рис. 4, на котором представлен аксиальный срез через C₅ позвонок на уровне ножек, спинной мозг лежит в позвоночном канале достаточно свободно (в случае отсутствия выраженного стеноза канала), поэтому смещение винта в просвет позвоночного канала крайне редко сопровождается сдавлением спинного мозга и повреждением дурального мешка. Смещение винтов в просвет позвоночной артерии не всегда связано с клиникой, что объясняется высокой пластичностью сосуда, запасом просвета отверстия позвоночной артерии в боковой массе позвонка, компенсацией за счет контралатерального кровотока и артериальных анастомозов. Большинство авторов в ходе предоперационного планирования рекомендует исследовать кровоток в вертебробазилярном бассейне и в случае доминирования одного из сосудов стараться избегать установки винтов с этой стороны.

В ряде случаев отмечается радикулопатия, связанная со сдавлением корешка. При проведении винтов следует учитывать, что в шейном отделе выходящий корешок прилегает к верхней стенке ножки, а не к нижней, как в грудном и поясничном отделах. Эту анатомическую особенность необходимо принимать во внимание при проведении винта, четко ориентируя его в сагиттальной плоскости, используя рентгеновские снимки в боковой проекции (рис. 5).

При анализе зависимости частоты смещения винтов от положения позвонка и от патологического процесса, по поводу которого проводится операция, установлено, что C₄ является самым частым уровнем критического смещения винта [8, 15, 17]. В анатомическом исследовании угла отклонения ножек в аксиальной плоскости показано, что на этом уровне угол отклонения ножек наибольший (в среднем 50,2°, C₅ – 48,1°), чем объясняется необходимость проведения винтов с наибольшим углом отклонения в горизонтальной плоскости [3]. Это сопровождается рядом технических трудностей, в некоторых случаях Abumi et al. [1] рекомендуют проведение винтов через дополнительные разрезы со значительным отступом от линии основного центрального доступа.

Клинические данные

В нейрохирургическом отделении Приволжского федерального медицинского исследовательского центра транспеди-

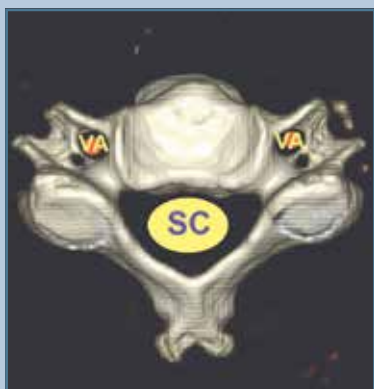


Рис. 4

Аксиальный срез шейного позвонка: SC – спинной мозг; VA – позвоночная артерия



Рис. 5

Рентгенография в боковой проекции

кулярную фиксацию в шейном отделе позвоночника применяют в течение нескольких лет. Решение об использовании данного метода принимается индивидуально в каждом конкретном случае. Основными показаниями к транспедикулярной фиксации мы считаем следующие: снижение плотности костной ткани, невозможность проведения фиксации за боковые массы (при их разрушении в результате травмы или воспалительного процесса), необходимость проведения значительной коррекции деформации; сокращение протяженности зоны спондилодеза у молодых пациентов, наличие у пациента трахеостомы. С учетом данных критериев транспедикулярную фиксацию использовали у 32 пациентов, установили 79 винтов. В 23 случаях операцию проводили пациентам с травматическими повреждениями позвоночника, в 3 – с опухолевыми поражениями шейных позвонков, в 4 – с нестабильностью шейных позвонков на фоне ревматоидного артрита, в 2 – с дегенеративными заболеваниями шейного отдела позвоночника.

Наиболее частым уровнем введения являлся позвонок C₂ – 28 пациентов, C₃ – 4, C₄ – 2, C₅ – 3, C₆ – 4, C₇ – 5.

У оперированных пациентов случаев нестабильности фиксатора, инфекционных осложнений и радикулопатии в результате давления винтом в послеоперационном периоде не выявлено. Случаев интраоперационного повреждения позвоночной

артерии, сопровождавшихся артериальным кровотечением, также не было.

На контрольных КТ отмечена перфорация латеральных стенок корневых дужек позвонков в 18 (22,79 %) случаях. Медиальной перфорации стенок корня дуги не было. У большинства пациентов отклонение винта от оси ножки с перфорацией стенок канала позвоночной артерии проходило бессимптомно и не требовало повторных вмешательств и терапии. У одного пациента в послеоперационном периоде развилась клиника нарушения кровообращения в бассейне левой задней мозговой артерии, что потребовало ревизионного вмешательства с удалением винта и установкой винта в боковую массу.

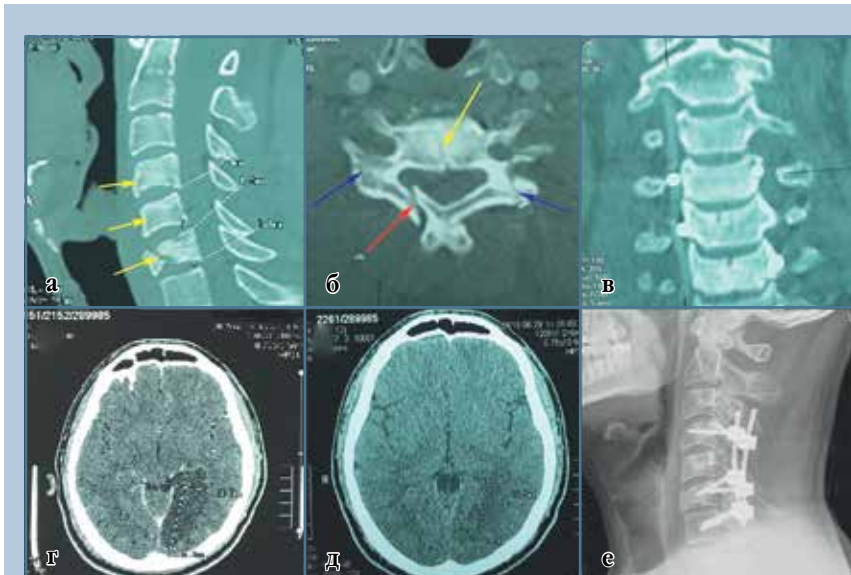
Клинический случай. Пациент Г., 23 лет, получил травму при падении с высоты. Диагностирован осложненный оскольчатый нестабильный перелом C₄, C₅, C₆ позвонков. Неврологическая группа D по ASIA, C₆: A4F2, C₅: A1, C₄: A1 (M0N1) по классификации АО. Проведена задняя инструментальная фиксация на уровне C₄–C₇ транспедикулярными винтами. В раннем послеоперационном периоде отмечено нарушение зрения по типу квадрантной гемианопсии. На КТ-ангиографии выявлено сдавление позвоночной артерии на уровне C₄–C₅ справа винтами. По КТ головного мозга определена зона ишемии в бассейне задней мозговой артерии слева. Выполнено ревизионное вмешательство – повторная имплантация винтов на указан-

Таблица 2

Частота смещения винтов в зависимости от уровня фиксации, n

Исследование	C ₂		C ₃		C ₄		C ₅		C ₆		C ₇	
	G1	G2	G1	G2	G1	G2	G1	G2	G1	G2	G1	G2
Kast et al. [8]	13,0	0,0	31,0	8,0	32,0	21,0	7,0	14,0	9,0	0,0	21,0	0,0
Uehara et al. [17]	0,0	6,7	10,2	8,2	18,6	14,0	18,8	3,1	7,4	2,4	2,2	2,2
Nakashima et al. [15]	16,0	4,0	21,0	7,0	24,7	1,1	16,7	5,1	7,6	1,3	4,8	8,1

G1 – смещение винта менее 50 % диаметра, G2 – смещение винта более 50 % диаметра.

**Рис. 6**

Данные пациента Г., 23 лет, с осложненным оскольчатым нестабильным переломом С4, С5, С6 позвонков: **а, б** – КТ до операции, желтыми стрелками показаны повреждения тел позвонков, красной стрелкой – повреждения дуги, синими стрелками – повреждения фасеток; **в** – ангиография после операции; **г** – КТ головного мозга, видна зона ишемии; **д** – КТ головного мозга через 2 недели после повторной операции; **е** – рентгенография через 12 мес. после выписки из стационара

ных уровнях с установкой их в боковые массы позвонков. По данным контрольной КТ, через 2 недели после ревизионного вмешательства отмечено обратное развитие зоны ишемии, а в клинической картине – полный регресс неврологической симптоматики. В отдаленном периоде клинический результат сохранен, признаков нарастания деформации позвоночника нет, пациент вернулся к прежней работе через 3 мес. после выписки из стационара (рис. 6).

Заключение

Транспедикулярная фиксация в шейном отделе позвоночника позволяет достичь надежной трехколонной стабилизации, что является крайне важным у пациентов с низким качеством костной ткани, с выраженными разрушениями боковых масс позвонков, с грубыми деформациями. О надежности этого метода фиксации говорят результаты проведенных исследований, в большинстве из них не выявлено случаев нестабильности фиксатора.

По данным биомеханических исследований, данный способ фиксации превосходит по надежности как фиксацию за боковые массы, так и переднюю стабилизацию с использованием пластин.

При осложненных спинальных травмах предпочтителен задний доступ, так как он может быть выполнен без дополнительных рисков у пациентов с трахеостомой, при этом можно достичь надежной трехколонной стабилизации из одного заднего доступа.

Ограничения к применению методики в большинстве случаев носят технический характер. Однако установка транспедикулярных винтов в шейном отделе сопряжена с риском повреждения таких анатомических структур, как спинной мозг, корешки спинного мозга и позвоночные артерии, что может привести к тяжелым периоперационным осложнениям и грубому неврологическому дефициту. Из нашего опыта наиболее значим риск повреждения и сдавления позвоночной артерии, поэтому в процессе подготовки к операции и во время ее выполнения должны быть приняты меры для предотвращения данного осложнения.

Таким образом, транспедикулярная фиксация в шейном отделе позвоночника остается, несмотря на развитие методик интраоперационной визуализации, технически сложной операцией и должна применяться у тщательно подобранных пациентов после детального обследования и скрупулезной оценки возможных рисков.

Исследование не имело спонсорской поддержки. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература/References

1. Abumi K, Itoh H, Taneichi H, Kaneda K. Transpedicular screw fixation for traumatic lesions of the middle and lower cervical spine: description of the techniques and preliminary report. J Spinal Disord. 1994;7:9–28.
2. Abumi K, Shono Y, Ito M, Taneichi H, Kotani Y, Kaneda K. Complications of pedicle screw fixation in reconstructive surgery of the cervical spine. Spine. 2000;25:962–969. DOI: 10.1097/00007632-200004150-00011.
3. Chazono M, Soshi S, Inoue T, Kida Y, Ushiku C. Anatomical considerations for cervical pedicle screw insertion: the use of multiplanar computerized tomography reconstruction measurements. J Neurosurg Spine. 2006;4:472–477. DOI: 10.3171/spi.2006.4.6.472.
4. Cho W, Le JT, Shimer AL, Werner BC, Glaser JA, Shen FH. Anatomy of lamina in the subaxial cervical spine with the special reference to translamina screws: CT and cadaveric analysis with screw trajectory simulation. Clin Spine Surg. 2017;30:E535–E539. DOI: 10.1097/BSD.0000000000000159.

5. Hojo Y, Ito M, Suda K, Oda I, Yoshimoto H, Abumi K. A multicenter study on accuracy and complications of freehand placement of cervical pedicle screws under lateral fluoroscopy in different pathological conditions: CT-based evaluation of more than 1,000 screws. *Eur Spine J.* 2014;23:2166–2174. DOI: 10.1007/s00586-014-3470-0.
6. Jones EL, Heller JG, Silcox DH, Hutton WC. Cervical pedicle screws versus lateral mass screws. Anatomic feasibility and biomechanical comparison. *Spine.* 1997;22:977–982.
7. Kamimura M, Ebara S, Itoh H, Tateiwa Y, Kinoshita T, Takaoka K. Cervical pedicle screw insertion: assessment of safety and accuracy with computer-assisted image guidance. *J Spinal Disord.* 2000;13:218–224.
8. Kast E, Mohr K, Richter HP, Borm W. Complications of transpedicular screw fixation in the cervical spine. *Eur Spine J.* 2006;15:327–334. DOI: 10.1007/s00586-004-0861-7.
9. Kotani Y, Abumi K, Ito M, Minami A. Improved accuracy of computer-assisted cervical pedicle screw insertion. *J Neurosurg.* 2003;99(3 Suppl):257–263.
10. Kotani Y, Cunningham BW, Abumi K, McAfee PC. Biomechanical analysis of cervical stabilization systems. An assessment of transpedicular screw fixation in the cervical spine. *Spine.* 1994;19:2529–2539. DOI: 10.1097/00007632-199411001-00007.
11. Kothe R, Ruther W, Schneider E, Linke B. Biomechanical analysis of transpedicular screw fixation in the subaxial cervical spine. *Spine.* 2004;29:1869–1875. DOI: 10.1097/01.brs.0000137287.67388.0b.
12. Kretzer RM, Hu N, Kikkawa J, Garonzik IM, Jallo GI, Tortolani PJ, McAfee PC, Cunningham BW. Surgical management of two- versus three-column injuries of the cervicothoracic junction: biomechanical comparison of translaminar screw and pedicle screw fixation using a cadaveric model. *Spine.* 2010;35:E948–E954. DOI: 10.1097/BRS.0b013e3181c9f56c.
13. Liu YJ, Tian W, Liu B, Li Q, Hu L, Li ZY, Yuan Q, Lu YW, Sun YZ. Comparison of the clinical accuracy of cervical (C2–C7) pedicle screw insertion assisted by fluoroscopy, computed tomography-based navigation, and intraoperative three-dimensional C-arm navigation. *Chin Med J (Engl).* 2010;123:2995–2998.
14. Ludwig SC, Kramer DL, Vaccaro AR, Albert TJ. Transpedicle screw fixation of the cervical spine. *Clin Orthop Relat Res.* 1999;(359):77–88. DOI: 10.1097/00003086-199902000-00009.
15. Nakashima H, Yukawa Y, Imagama S, Kanemura T, Kamiya M, Yanase M, Ito K, Machino M, Yoshida G, Ishikawa Y, Matsuyama Y, Ishiguro N, Kato F. Complications of cervical pedicle screw fixation for nontraumatic lesions: a multicenter study of 84 patients. *J Neurosurg Spine.* 2012;16:238–247. DOI: 10.3171/2011.11.SPINE11102.
16. Parker SL, McGirt MJ, Garces-Ambrossi GL, Mehta VA, Sciubba DM, Witham TF, Gokaslan ZL, Wolinsky JP. Translaminar versus pedicle screw fixation of C2: comparison of surgical morbidity and accuracy of 313 consecutive screws. *Neurosurgery.* 2009;64(5 Suppl 2):343–349. DOI: 10.1227/01.NEU.0000338955.36649.4E.
17. Uehara M, Takahashi J, Hirabayashi H, Hashidate H, Ogihara N, Mukaiyama K, Ikegami S, Kato H. Perforation rates of cervical pedicle screw insertion by disease and vertebral level. *Open Orthop J.* 2010;4:142–146. DOI: 10.2174/1874325001004010142.
18. Yukawa Y, Kato F, Ito K, Horie Y, Hida T, Nakashima H, Machino M. Placement and complications of cervical pedicle screws in 144 cervical trauma patients using pedicle axis view techniques by fluoroscope. *Eur Spine J.* 2009;18:1293–1299. DOI: 10.1007/s00586-009-1032-7.
19. Yukawa Y, Kato F, Yoshihara H, Yanase M, Ito K. Cervical pedicle screw fixation in 100 cases of unstable cervical injuries: pedicle axis views obtained using fluoroscopy. *J Neurosurg Spine.* 2006;5:488–493.
20. Zheng X, Chaudhari R, Wu C, Mehdod AA, Transfeldt EE. Subaxial cervical pedicle screw insertion with newly defined entry point and trajectory: accuracy evaluation in cadavers. *Eur Spine J.* 2010;19:105–112. DOI: 10.1007/s00586-009-1213-4.

Адрес для переписки:

Алейник Александр Яковлевич
603155, Россия, Нижний Новгород,
Верхне-Волжская набережная, 18,
ФГБУ «ПФМИЦ»,
aaleynik@yandex.ru

Address correspondence to:

Aleynik Alexandr Yakovlevich
Privolzhsky Federal Research Center,
Nizhne-Volzhskaya Embankment, 18,
Nizhny Novgorod, 603155, Russia,
aaleynik@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 16.02.2017

Рецензирование пройдено 14.03.2017

Подписана в печать 20.03.2017

Received 16.02.2017

Review completed 14.03.2017

Passed for printing 20.03.2017

Александр Яковлевич Алейник, канд. мед. наук, нейрохирург, научный сотрудник нейрохирургического отделения, Приволжский федеральный медицинский исследовательский центр, Нижний Новгород, Россия, aaleynik@yandex.ru;

Сергей Геннадьевич Млявях, канд. мед. наук, нейрохирург, травматолог-ортопед, заведующий нейрохирургическим отделением, Приволжский федеральный медицинский исследовательский центр, Нижний Новгород, Россия, spinedoc@bk.ru;

Андрей Евгеньевич Бокков, канд. мед. наук, нейрохирург, научный сотрудник нейрохирургического отделения, Приволжский федеральный медицинский исследовательский центр, Нижний Новгород, Россия, andrei_bokov@mail.ru.

Alexandr Yakovlevich Aleynik, MD, PhD, neurosurgeon, researcher in the spinal pathology group, Privolzhsky Federal Research Center, Nizhny Novgorod, Russia, aaleynik@yandex.ru;

Sergey Gennadievich Mlyavyykh, MD, PhD, board-certified neurosurgeon, head of neurosurgical department, Privolzhsky Federal Research Center, Nizhny Novgorod, Russia, spinedoc@bk.ru;

Andrey Evgenievich Bokov, MD, PhD, neurosurgeon, researcher in the spinal pathology group, Privolzhsky Federal Research Center, Nizhny Novgorod, Russia, andrei_bokov@mail.ru.