

ТЕХНИКА ПЕРКУТАННОГО АРТРОДЕЗА ДУГООТРОСТЧАТЫХ СУСТАВОВ В ХИРУРГИЧЕСКОМ ЛЕЧЕНИИ ДЕГЕНЕРАТИВНЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ ПОЯСНИЧНОГО ОТДЕЛА ПОЗВОНОЧНИКА

А.А. Булкин, А.Е. Боков, С.Г. Млявых, Л.Я. Кравец, Ю.Д. Авдонина

ФГБОУ ВО «Приволжский исследовательский медицинский университет» Минздрава России;
Россия, 603950 Нижний Новгород, пл. Минина и Пожарского, 10/1

Контакты: Анатолий Алексеевич Булкин anatolbulkin@gmail.com

Актуальность. Современное развитие хирургии позвоночника неразрывно связано с широким внедрением различных минимально инвазивных технологий спондилодеза, однако их общим недостатком считаются объективные трудности в проведении заднего спондилодеза. В связи с этим вопросы профилактики псевдоартроза и дестабилизации имплантатов продолжают оставаться актуальными.

Цель исследования – оценить безопасность и эффективность разработанной авторами техники перкутанного артродеза дугоотростчатых суставов (ПАДС) как метода, дополняющего межтеловой спондилодез и перкутанную заднюю фиксацию в хирургическом лечении дегенеративных заболеваний поясничного отдела позвоночника.

Материалы и методы. Проведен сравнительный анализ результатов лечения 80 пациентов с дегенеративными заболеваниями поясничного отдела позвоночника, у которых выполнены минимально инвазивные декомпрессивно-стабилизирующие вмешательства с использованием заднего трансфораминального, латерального забрюшинного и переднего забрюшинного доступов. У 20 пациентов дополнительно был выполнен ПАДС. Они составили основную группу исследования. Минимальный срок наблюдения пациентов составил 12 мес. Оценивали частоту различных осложнений, их тяжесть, степень формирования костного блока.

Результаты. Техника ПАДС позволила увеличить вероятность формирования заднего костного блока приблизительно в 50 раз ($p < 0,0001$, логистический регрессионный анализ, двухсторонний точный тест Фишера). В 3 (15 %) случаях задний костный блок после выполнения ПАДС сформировался, по данным рентгенографии, раньше межтелового спондилодеза, что обеспечило сохранение стабильности оперированного сегмента. Каких-либо клинически значимых осложнений в периоперационном и послеоперационном периодах у пациентов основной группы не наблюдалось.

Заключение. ПАДС – безопасная и эффективная малоинвазивная методика, позволяющая в более ранние сроки сформировать задний костный блок, снижая риск развития псевдоартроза после выполнения минимально инвазивных декомпрессивно-стабилизирующих операций на поясничном отделе позвоночника.

Ключевые слова: дегенеративные заболевания поясничного отдела позвоночника, минимально инвазивные вмешательства, межтеловой спондилодез, задний спондилодез, перкутанный артродез дугоотростчатых суставов

Для цитирования: Булкин А.А., Боков А.Е., Млявых С.Г. и др. Техника перкутанного артродеза дугоотростчатых суставов в хирургическом лечении дегенеративных заболеваний поясничного отдела позвоночника. *Нейрохирургия* 2019;21(3):29–36.

DOI: 10.17 650/1683-3295-2019-21-3-29-36

Percutaneous facet joints arthrodesis technology in surgical treatment of degenerative diseases of lumbar spine

A.A. Bulkin, A.E. Bokov, S.G. Mlyavykh, L.Ya. Kravets, Yu.D. Avdonina

Privolzhskiy Research Medical University, Ministry of Health of Russia; 10/1 Minin & Pozharsky Sq., Nizhny Novgorod 603950, Russia

Background. Minimally invasive technology of fusion broadly introduced in clinical practice represent one of modern trends in spinal surgery on the other hand those technical solutions lack to provide posterior fusion. As a consequence, patients treated with minimally invasive techniques are vulnerable in terms of pseudarthrosis and implant instability therefore measures focused on those complications' prevention are still actual.

The study objective is to evaluate efficacy and safety of suggested percutaneous facet joints arthrodesis technique as an auxiliary option to interbody fusion.

Materials and methods. This is a prospective non-randomized study of 80 patients with degenerative diseases of the lumbar spine who were treated applying minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion, lateral lumbar interbody fusion and anterior lumbar interbody fusion. In 20 cases out of those enrolled interbody fusion was supplemented with percutaneous posterior facet joints arthrodesis. Computed

tomography was administered at the period of 6 and 12 months after surgery to assess anterior and posterior fusion. The minimal follow-up period accounted for 12 months.

Results. The suggested percutaneous facet joints arthrodesis fifty-fold increased the probability of posterior fusion formation compared to the rate of spontaneous spinal fusion ($p < 0.0001$, logistic regression was applied). In three cases posterior fusion formed prior to interbody fusion providing stability of segment operated on. No adverse events and no complications associated with percutaneous arthrodesis were detected.

Conclusion. The suggested percutaneous facet joints arthrodesis is safe and effective minimally invasive technique that facilitates additional posterior spinal fusion formation in a short-term period herewith decreasing symptomatic pseudarthrosis development in patients operated on using minimally invasive spinal fixation and fusion.

Key words: degenerative diseases of the lumbar spine, minimally invasive surgery, interbody fusion, posterior spinal fusion, percutaneous facet joints arthrodesis

For citation: Bulkin A.A., Bokov A.E., Mlyavykh S.G. et al. Percutaneous facet joints arthrodesis technology in surgical treatment of degenerative diseases of lumbar spine. *Neyrokhirurgiya = Russian Journal of Neurosurgery* 2019;21(3):29–36.

ВВЕДЕНИЕ

Выполнение спондилодеза после декомпрессивно-стабилизирующих вмешательств — важная задача в лечении симптомных дегенеративных изменений, сопровождающихся нестабильностью позвоночно-двигательного сегмента (ПДС) и стенозом позвоночного канала. Наиболее популярными методами проведения спондилодеза в поясничном отделе позвоночника остаются межтеловой, межфасеточный или их сочетание. При этом используют классический задний (posterior lumbar interbody fusion), трансфораминальный (transforaminal lumbar interbody fusion) или минимально инвазивные передний забрюшинный (anterior lumbar interbody fusion), косой забрюшинный (oblique lumbar interbody fusion), латеральный забрюшинный (lateral lumbar interbody fusion), задний трансфораминальный хирургические доступы [1, 2].

Несмотря на очевидные преимущества минимально инвазивных методик, снижающих травматичность вмешательства и ускоряющих реабилитацию пациента, их результат — полнота формирования костного блока, обеспечивающего стабильность ПДС, — остается недостаточно точно прогнозируемым [3–5]. В первую очередь это связано с техническими трудностями выполнения заднего спондилодеза в сочетании с перкутанной транспедикулярной или трансфасеточной фиксацией, при котором приходится надеяться на спонтанное формирование межсуставного костного блока. При этом риск формирования псевдоартроза, требующего ревизионного оперативного вмешательства, остается относительно высоким [6–11].

Цель исследования — оценить безопасность и эффективность разработанной авторами техники перкутанного артродеза дугоотростчатых суставов (ПАДС) как метода, дополняющего межтеловой спондилодез и перкутанную заднюю фиксацию в хирургическом лечении дегенеративных заболеваний поясничного отдела позвоночника.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В пилотное проспективное нерандомизированное исследование были включены 80 пациентов (56 жен-

щин и 24 мужчины, средний возраст $55,5 \pm 10,0$ года) с дегенеративными заболеваниями поясничного отдела позвоночника. С января 2016 г. по декабрь 2017 г. у пациентов были выполнены декомпрессивно-стабилизирующие оперативные вмешательства с использованием минимально инвазивных техник.

Все пациенты были распределены по 2 группам. В основную группу вошли 20 пациентов, у которых проводили минимально инвазивный межтеловой спондилодез, перкутанную транспедикулярную фиксацию и ПАДС по разработанной нами методике:

- передний межтеловой спондилодез в сочетании с перкутанной транспедикулярной фиксацией и ПАДС с применением аллокости — у 8 (10 %);
- латеральный межтеловой спондилодез в сочетании с перкутанной транспедикулярной фиксацией и ПАДС с применением аллокости — у 12 (15 %).

В контрольную группу были включены 60 пациентов, у которых ПАДС не использовали и проводили только минимально инвазивный межтеловой спондилодез и перкутанную транспедикулярную фиксацию:

- трансфораминальный межтеловой спондилодез в сочетании с перкутанной транспедикулярной фиксацией — у 20 (25 %);
- латеральный межтеловой спондилодез в сочетании с перкутанной транспедикулярной фиксацией — у 20 (25 %);
- передний межтеловой спондилодез в сочетании с перкутанной транспедикулярной фиксацией — у 20 (25 %).

Исследование было одобрено этическим комитетом Приволжского исследовательского медицинского университета (протокол № 2 от 20.02.2016). Информированное согласие на участие в данном исследовании было получено от всех пациентов.

Критерий включения пациентов в исследование — наличие дегенеративных заболеваний поясничного отдела позвоночника, сопровождающихся клинической картиной нестабильности ПДС и стенозом позвоночного канала.

Из исследования были исключены пациенты с диспластическим спондилолистезом и деформацией

позвоночника, требующей выполнения спондилодеза более чем на 5 ПДС и (или) илеолюмбальной фиксации, с дегенеративным поражением дугоотростчатых суставов II–III степени по D. Weishaupt и соавт. [12] или анкилозом, а также пациенты, у которых была нарушена техника установки транспедикулярных винтов и межтеловых имплантатов.

Стандартное предоперационное обследование включало функциональную рентгенографию поясничного отдела позвоночника в вертикальном положении для определения стабильности ПДС, магнитно-резонансную и компьютерную томографию (КТ) поясничного отдела позвоночника. КТ проводили на аппарате Aquilion 32 (Toshiba, Япония) по стандартному протоколу: толщина срезов 0,5 мм, область исследования 50 см, напряжение 120 кВ, сила тока 300 мА, 180–400 мА/с, винтовой шаг 21. Для оценки результатов исследования использовали программное обеспечение Vitrea 5.2.497.5523.

Послеоперационное наблюдение проводилось через 3, 6, 12 мес.

Через 3 мес после операции выполняли обзорную рентгенографию поясничного отдела позвоночника в вертикальном положении. При подозрении на раннее возникновение нестабильности имплантатов проводили КТ и функциональную рентгенографию поясничного отдела позвоночника в вертикальном положении.

Через 6 и 12 мес после операции выполнялась плановая КТ. Состоятельность костного блока после межтелового спондилодеза оценивалась по классификации G.H. Tap и соавт. [13]. Состоятельность заднего костного блока после ПАДС также оценивалась по данным КТ следующим образом:

- отсутствие диастаза на границе кости и трансплантата, признаки трабекуляции – полный костный блок;
- наличие диастаза на границе кости и трансплантата со стороны 1 из 2 суставных отростков или отсутствие трабекуляции – неполный костный блок;
- наличие двухстороннего диастаза на границе кости и трансплантата, признаки резорбции костной ткани вокруг трансплантата – отсутствие костного блока.

ХИРУРГИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Техника выполнения всех вариантов межтелового спондилодеза не отличалась от общепринятой.

Этапы выполнения ПАДС в соответствии с патентом [14]:

- в положении пациента на животе под контролем флюороскопии определяют проекцию ножек позвонков на коже и наносят соответствующую разметку;
- перкутанно проводят спицы-направители через ножки позвонков параллельно замыкательным пластинам;
- по спицам-направителям в тела позвонков перкутанно устанавливают канюлированные транспедикулярные винты;

- под контролем флюороскопии наносят разметку траектории введения спицы-направителя в сагиттальной плоскости через суставную щель дугоотростчатого сустава от верхушки верхнего дугоотростчатого сустава до основания ножки нижнего позвонка ПДС;
- в указанном направлении пункционно перкутанно вводят спицу-направитель (рис. 1а, б);
- по установленной спице-направителю вводят канюлированную фрезу размером 8 G, формируют ложе для трансплантата на протяжении всей щели дугоотростчатого сустава (рис. 1в);
- после удаления фрезы по спице-направителю в область сформированного ложа вводят троакар размером 8 G (рис. 1г, д);
- полый фрезой размером 8 G подготавливают цилиндрический трансплантат из аллокости соответствующего размера (рис. 1е, ж);
- через троакар размером 8 G в сформированное ложе устанавливают трансплантат с помощью стилета (рис. 1з);
- аналогичные манипуляции выполняют на контралатеральном дугоотростчатом суставе;
- завершают перкутанную стабилизацию ПДС двухсторонней установкой стержней и их окончательной фиксацией гайками в головках винтов;
- после удаления удлинителей винтов раны послойно ушивают без наложения дренажей.

Учитывая, что задний костный блок при выполнении перкутанной транспедикулярной фиксации может образоваться спонтанно [15], проведено сравнение групп пациентов, у которых выполнен ПАДС, и пациентов, у которых ПАДС не выполняли.

Влияние разработанной техники ПАДС на формирование заднего костного блока оценивали с помощью двухстороннего точного теста Фишера и логистического регрессионного анализа. Использовали пакет программ Statistica (версия 10.0).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Моносегментарное вмешательство выполнено у 60 (75 %) пациентов, бисегментарное – у 18 (22,5 %), фиксация 3 ПДС – у 2 (2,5 %).

За 12 мес наблюдения за формированием костного блока мы зафиксировали следующие результаты:

- после переднего межтелового спондилодеза в сочетании с перкутанной транспедикулярной фиксацией передний костный блок I и II степени по G.H. Tap и соавт. образовался у 13 (65 %) пациентов, задний спонтанный костный блок – у 3 (15 %);
- после латерального межтелового спондилодеза передний костный блок I и II степени по G.H. Tap и соавт. образовался у 18 (90 %) пациентов, задний спонтанный костный блок – у 7 (35 %);

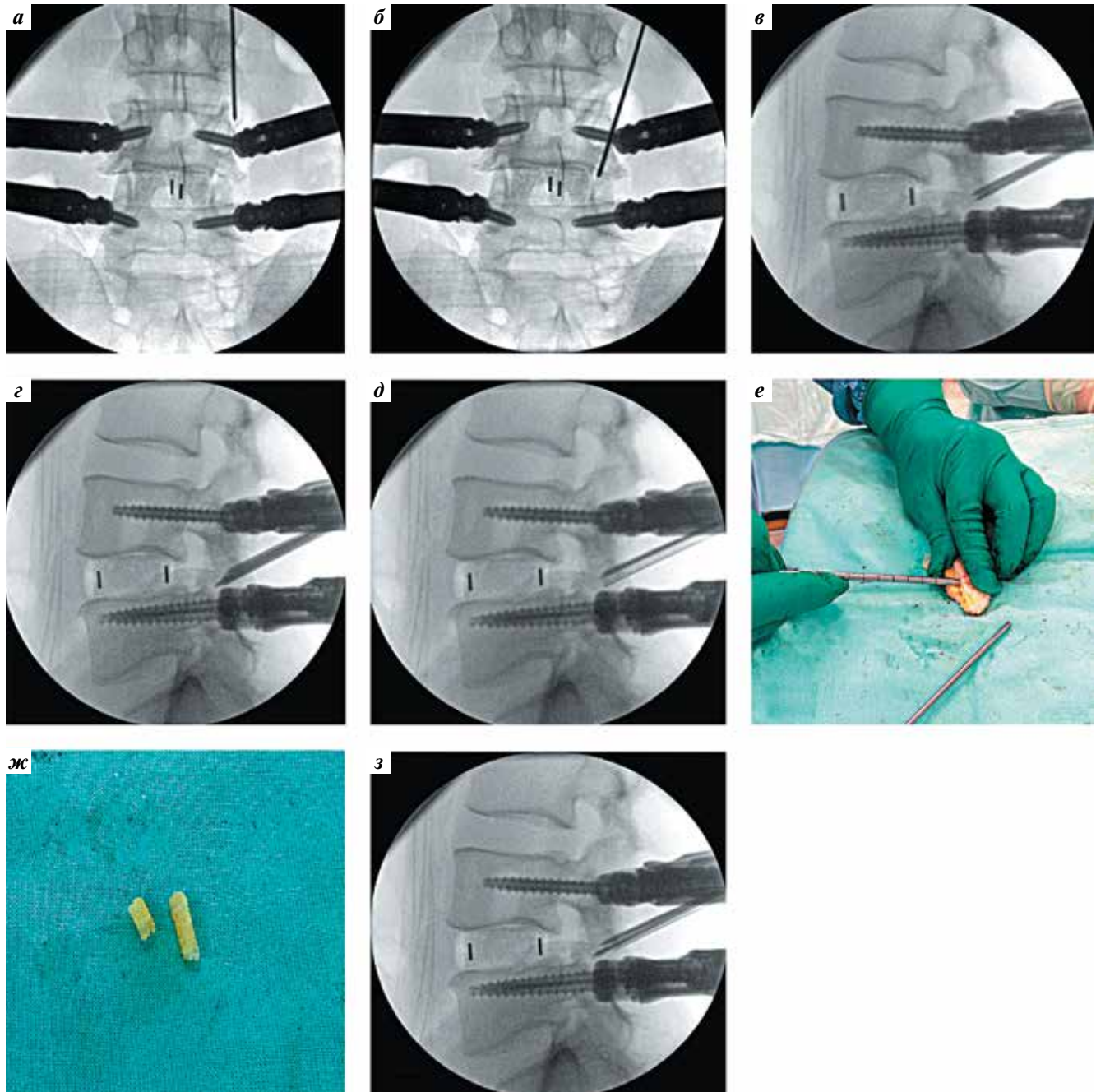


Рис. 1. Этапы выполнения перкутанного артродеза дугоотростчатых суставов. Интраоперационная флюороскопия (а–д, з) и фотографии (е, ж): а, б – проведение спицы-направителя; в – введение канюлированной фрезы; г, д – введение троакара; е – подготовка цилиндрического трансплантата из аллокости; ж – готовый трансплантат; з – установка трансплантата стилетом

Fig. 1. Stages of performing percutaneous facet joints arthrodesis. Intraoperative fluoroscopy (a–d, z) and photos (e, ж): a, б – insertion of a guide wire; в – insertion of a cannulated drill; г, д – insertion of a trocar; е – preparation of a cylindrical transplant made of alloplastic bone; ж – finished transplant; з – installation of the transplant using a stylette

- после трансфораминального межтелового спондилодеза передний костный блок I и II степени по G.H. Tap и соавт. образовался у 20 (100 %) пациентов, задний спонтанный костный блок не сформировался ни у одного пациента;
- после переднего межтелового спондилодеза с применением ПАДС передний костный блок I

и II степени по G.H. Tap и соавт. образовался у 17 (85 %) пациентов, задний костный блок – у 15 (75 %).

Результаты двухстороннего точного теста Фишера показали, что использование техники ПАДС статистически значимо увеличивает частоту как формирования костного блока в целом ($p < 0,0001$, мощность теста

Таблица 1. Влияние техники перкутанного артродеза дугоотростчатых суставов на формирование заднего костного блока
Table 1. Effect of the technique of percutaneous arthrodesis of facet joints on formation of the anterior bone block

Степень формирования костного блока Bone block formation level	Число случаев, абс. Number of cases, abs.		Статистическая значимость различий (по двухстороннему тесту Фишера) Statistical significance of the differences (per the two-tailed Fisher's exact test)	Мощность теста, % Test power, %
	после инвазивного межтелового спондилодеза и перкутанной транспедикулярной фиксации after invasive interbody fusion and percutaneous transpedicular fixation	после инвазивного межтелового спондилодеза и перкутанной транспедикулярной фиксации в сочетании с перкутанном артродезом дугоотростчатых суставов after invasive interbody fusion, percutaneous transpedicular fixation and percutaneous arthrodesis of facet joints		
Неполный + полный Complete + incomplete	10	19	$p < 0,0001$	100
Полный Complete	2	7	$p = 0,0044$	74

Таблица 2. Оценка вероятности формирования костного блока после перкутанного артродеза дугоотростчатых суставов (метод логистической регрессии)
Table 2. Estimation of probability of bone block formation after percutaneous arthrodesis of facet joints (logistic regression)

Степень формирования костного блока Bone block formation level	Статистическая значимость различий Statistical significance of the differences	Параметры модели Model parameters	Заключение Conclusion
Неполный + полный Complete + incomplete	$p < 0,0001$	$B_0 = -0,96494,$ $p = 0,0082;$ $B_1 = 3,9138,$ $p = 0,0006;$ ОШ (OR) = 50,0902; 95 % ДИ (CI) 5,7030–439,9600	Вероятность формирования костного блока выше в 50 раз Probability of bone block formation is 50 times higher
Полный Complete	$p = 0,00278$	$B_0 = -2,9444,$ $p = 0,0002;$ $B_1 = 2,3254,$ $p = 0,0093;$ ОШ (OR) = 10,23077; 95 % ДИ (CI) 1,81550–57,65337	Вероятность формирования полного костного блока выше в 10 раз Probability of bone block formation is 10 times higher

Примечание. ДИ – доверительный интервал; ОШ – отношение шансов.
Note. CI stands for confidence interval; OR – odds ratio.

100 %), так и формирования полного костного блока ($p < 0,0044$, мощность теста 74 %) (табл. 1) в сравнении с показателями групп, в которых ПАДС не выполняли.

Логистический регрессионный анализ продемонстрировал, что использование техники ПАДС увеличивает вероятность формирования заднего костного блока (полного/неполного) приблизительно в 50 раз ($p < 0,0001$), а вероятность формирования полного заднего костного блока – приблизительно в 10 раз ($p = 0,00278$) (табл. 2).

К концу наблюдения в 3 (15 %) случаях задний костный блок после выполнения ПАДС сформировался, по данным рентгенографии, раньше межтелового, что обеспечило сохранение стабильности оперированного ПДС (рис. 2). Каких-либо клинически значимых осложнений в периоперационном и послеоперацион-

ном периоде у пациентов основной и контрольной групп не зарегистрировано.

ОБСУЖДЕНИЕ

Минимально инвазивные декомпрессивно-стабилизирующие вмешательства типа минимально инвазивного переднего, латерального, трансфораминального межтелового спондилодеза в сочетании с перкутанной транспедикулярной фиксацией в течение последнего десятилетия получили широкое распространение в лечении пациентов с дегенеративными заболеваниями поясничного отдела позвоночника [3–5]. Благодаря меньшей травматичности хирургического вмешательства, низкой интраоперационной кровопотере, а также сокращению длительности реабилитации пациентов эти технологии выглядят

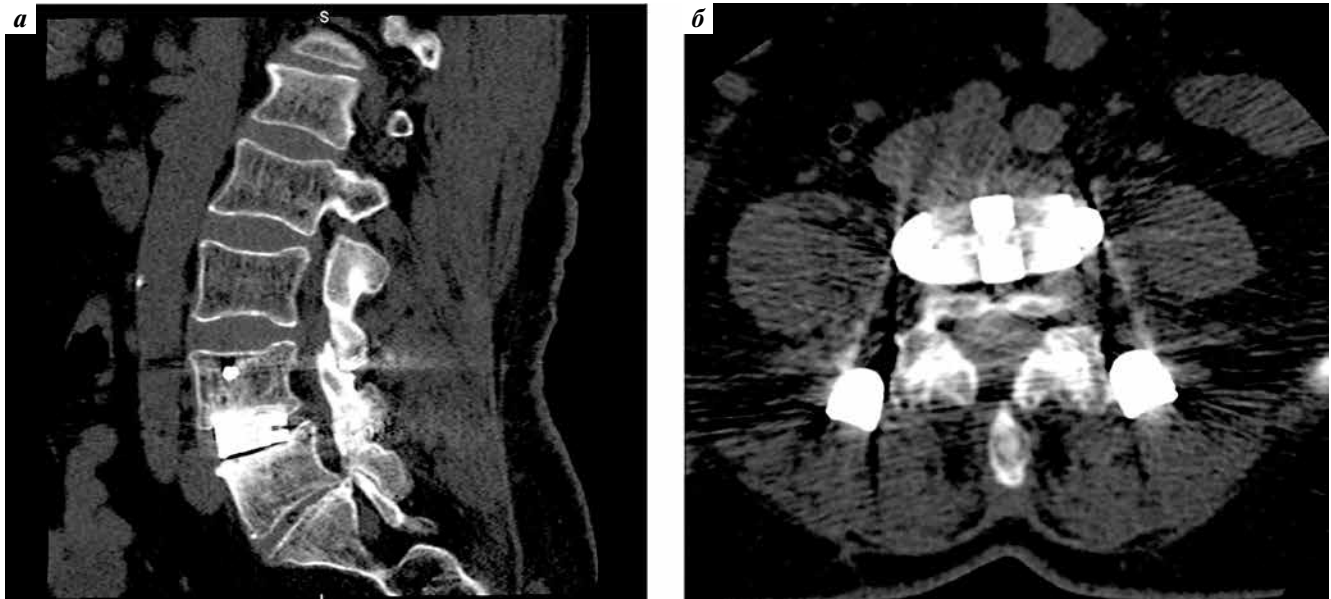


Рис. 2. Компьютерная томография позвоночника через 12 мес после оперативного вмешательства. Сформированный задний спондилодез при отсутствии межтелового спондилодеза: а – сагиттальная проекция; б – аксиальная проекция

Fig. 2. Computed tomography of the spine 12 months after surgical intervention. Formed posterior fusion with absence of interbody fusion: a – sagittal projection; б – axial projection

привлекательнее классических методов стабилизации ПДС. Тем не менее результаты формирования костного блока для обеспечения стабильности ПДС после их применения точно спрогнозировать по-прежнему сложно [16]. Так, наличие системного остеопороза, других сопутствующих системных заболеваний, влияющих на процессы остеорепарации и остеоинтеграции, может существенно увеличить сроки формирования переднего костного блока. В то же время общепринятое использование минимально инвазивного переднего, латерального, трансфораминального межтелового спондилодеза не подразумевает создание дополнительного заднего костного блока, который в случае замедления развития межтелового смог бы обеспечить стабильность ПДС и предотвратить возможное расшатывание фиксаторов, а следовательно, и ревизионное вмешательство.

Помимо технологии выполнения межтелового спондилодеза, большую роль в обеспечении послеоперационной стабильности ПДС играет и способ задней фиксации. Наиболее распространенный минимально инвазивный способ фиксации – с использованием перкутанного транспедикулярного инструментария. При правильном выполнении процедуры он обеспечивает высокую надежность и стабильность ПДС. Однако альтернативные варианты, такие как трансфасеточная фиксация, межсуставная фиксация с применением специализированного инструментария, тоже получили распространение в хирургической практике, а биомеханические исследования последствий такой фиксации доказывают их перспективность [17–20].

В настоящее время опубликованы результаты исследований, в которых изучались альтернативные варианты фиксации ПДС с применением имплантатов, не только стабилизирующих сегмент, но и создающих условия для формирования заднего костного блока. Наиболее близкие к разработанной нами технологии методы межсуставной фиксации рассматриваются либо как вариант лечения изолированного поражения дугоотростчатых суставов, либо в комбинации с межтеловым спондилодезом, однако перкутанная транспедикулярная фиксация в них не включена [17, 21, 22]. Кроме того, данные технологии подразумевают применение открытого или полуоткрытого доступа к дугоотростчатому суставу для установки имплантата. Учитывая тот факт, что многие из них находятся на стадии доклинических экспериментов или пилотных исследований, пока нельзя с полной уверенностью говорить о каких-либо значительных преимуществах этих технологий перед общепринятыми методами [20]. Таким образом, достаточно очевидна необходимость поиска и разработки технологии, которая бы не нарушала принципов минимально инвазивного вмешательства и позволяла бы сформировать задний костный блок для обеспечения дополнительной стабильности ПДС.

Разработанная нами методика ПАДС позволяет применить комбинацию уже привычных минимально инвазивных технологий межтелового спондилодеза с формированием дополнительного заднего костного блока. Благодаря тому, что ПДС фиксируют перкутанно транспедикулярными инструментами, суставная поверхность остается интактной и используется как ложе для спондилодеза. Кроме того, эта технология

исключает необходимость дополнительных кожных разрезов, установки ретрактора и диссекции мышц, а способ подготовки сустава и последующей установки трансплантата предотвращает случайное проникновение направляющего инструмента в фораминальное отверстие и повреждение корешка спинного мозга.

Проведенное исследование продемонстрировало статистически значимое увеличение частоты формирования костного блока после выполнения ПАДС. Наблюдение также показало, что в ситуации, когда передний костный блок через 12 мес после операции остается несформированным, наличие заднего костного блока позволяет сохранить стабильность ПДС и предотвратить развитие псевдоартроза и ревизионное вмешательство.

Однако предложенная нами технология ПАДС имеет и ряд ограничений. У пациентов с выраженным спондилоартрозом (II–III степени по D. Weishaupt) и значительным ожирением выполнение ПАДС может быть существенно затруднено из-за невозможности качественной флюороскопической визуализации щели дугоотростчатого сустава. Во избежание выбора

неправильной траектории и последующей некорректной установки аллотрансплантата необходима обязательная предоперационная оценка анатомии дугоотростчатых суставов с использованием данных КТ или магнитно-резонансной томографии.

На данный момент эта технология, безусловно, требует не только дальнейшего изучения и анализа результатов применения на практике, но и разработки специализированного инструментария, позволяющего успешно подготовить ложе и установить трансплантат, тем самым предотвратить возможные дефекты выполнения этой процедуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методика ПАДС – перспективная, безопасная и эффективная малоинвазивная технология, позволяющая в более ранние сроки сформировать задний костный блок. С помощью этой разработанной технологии возможна успешная реализация принципа 360-градусного спондилодеза, снижающего риск развития псевдоартроза после минимально инвазивных декомпрессивно-стабилизирующих операций на поясничном отделе позвоночника.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Ni J., Fang X., Zhong W. et al. Anterior lumbar interbody fusion for degenerative discogenic low back pain: evaluation of L4–S1 fusion. *Medicine (Baltimore)* 2015;94(43):e1851. DOI: 10.1097/MD.0000000000001851.
- Bejano P., Langella F., Damilano M. et al. Fusion rate following extreme lateral lumbar interbody fusion. *Eur Spine J* 2015;24 Suppl 3:369–71. DOI: 10.1007/s00586-015-3929-7.
- Foley K.T., Holly L.T., Schwender J.D. Minimally invasive lumbar fusion. *Spine (Phila Pa 1976)* 2003;28(15 Suppl):S26–35. DOI: 10.1097/01.BRS.0000076895.52418.5E.
- Garg B., Mehta N. Minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion (MI-TLIF): a review of indications, technique, results and complications. *J Clin Orthop Trauma* 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcot.2019.01.008>. Available at: [https://www.journal-cot.com/article/S0976-5662\(18\)30151-6/fulltext](https://www.journal-cot.com/article/S0976-5662(18)30151-6/fulltext).
- Narain A.S., Hijji F.Y., Markowitz J.S. et al. Minimally invasive techniques for lumbar decompressions and fusions. *Curr Rev Musculoskelet Med* 2017;10(4):559–66. DOI: 10.1007/s12178-017-9446-z.
- Bydon M., De la Garza-Ramos R., Abt N.B. et al. Durotomy is associated with pseudoarthrosis following lumbar fusion. *J Clin Neurosci* 2015;22(3):544–8. DOI: 10.1016/j.jocn.2014.08.023.
- Ondra S.L., Marzouk S. Revision strategies for lumbar pseudarthrosis. *Neurosurg Focus* 2003;15(3):E9.
- Gertzbein S.D., Holloper M.R., Hall S. Pseudarthrosis of the lumbar spine: outcome after circumferential fusion. *Spine (Phila Pa 1976)* 1998;23(21):2352–6. DOI: 10.1097/00007632-199811010-00021.
- Martin B.I., Mirza S.K., Comstock B.A. et al. Reoperation rates following lumbar spine surgery and the influence of spinal fusion procedures. *Spine (Phila Pa 1976)* 2007;32(3):382–7. DOI: 10.1097/01.brs.0000254104.55716.46.
- Hu R.W., Jaglal S., Axcell T., Anderson G. A population-based study of reoperations after back surgery. *Spine (Phila Pa 1976)* 1997;22(19):2265–70. DOI: 10.1097/00007632-199710010-00013.
- Mobbs R.J., Loganathan A., Yeung V., Rao P.J. Indications for anterior lumbar interbody fusion. *Orthop Surg* 2013;5(3):153–63. DOI: 10.1111/os.12048.
- Weishaupt D., Zanetti M., Boos N., Hodler J. MR imaging and CT in osteoarthritis of the lumbar facet joints. *Skeletal Radiol* 1999;28(4):215–9.
- Tan G.H., Goss B.G., Thorpe P.J., Williams R.P. CT-based classification of long spinal allograft fusion. *Eur Spine J* 2007;16(11):1875–81. DOI: 10.1007/s00586-007-0376-0.
- Патент на изобретение № 2645418/26.04.2017. Бюл. № 6.
- Боков А.Е., Млявях С.Г., Алейник А.Я., Булкин А.А. Способ минимально инвазивной стабилизации позвоночно-двигательного сегмента на уровне поясничного отдела позвоночника. [Patent RUS 2645418/26.04.2017. Bull. No. 6. Bokov A.E., Mlyavykh S.G., Aleynik A.Ya., Bulkin A.A. Method of minimally invasive stabilization of the spinal motion segment at the level of the lumbar spine. (In Russ.)]. Доступно по: https://yandex.ru/patents/doc/RU2645418C1_20180221. Ссылка активна на 07.08.2019.
- Gazzeri R., Panagiotopoulos K., Princiotto S., Agrillo U. Spontaneous spinal arthrodesis in stand-alone percutaneous pedicle screw fixation without *in situ* fusion in patients with lumbar segmental instability: long-term clinical, radiologic, and functional outcomes. *World Neurosurg* 2018;110:e1040–8. DOI: 10.1016/j.wneu.2017.11.159.
- Owens R.K. 2nd, Djurasovic M., Crawford C.H. 3rd et al. Impact of surgical approach on clinical outcomes in the treatment of lumbar pseudarthrosis. *Global Spine J* 2016;6(8):786–91. DOI: 10.1055/s-0036-1582390.
- Бывальцев В.А., Калинин А.А., Оконешникова А.К. Возможности применения новой минимально инвазивной методики фасеточной фиксации системой “Facet Wedge” при лечении дегенеративных заболеваний

- пояснично-крестцового отдела позвоночника у пациентов пожилого возраста. Успехи геронтологии 2017;30(5): 776–83. [Byvaltsev V.A., Kalinin A.A., Okoneshnikova A.K. Features of the new minimally invasive techniques facet fixation system “Facet Wedge” in the treatment of degenerative diseases of the lumbar spine in elderly patients. Uspekhi gerontologii = Advances in Gerontology 2017;30(5):776–83. (In Russ.)].
18. Cook D.J., Yeager M.S., Oh M.Y., Cheng B.C. Lumbar intrafacet bone dowel fixation. Neurosurgery 2015;76(4):470–8. DOI: 10.1227/NEU.0000000000000652.
19. Belykh E., Kalinin A.A., Martirosyan N.L. et al. Facet joint fixation and anterior, direct lateral, and transforaminal lumbar interbody fusions for treatment of degenerative lumbar disc diseases: retrospective cohort study of a new minimally invasive technique. World Neurosurg 2018;114:e959–68. DOI: 10.1016/j.wneu.2018.03.121.
20. Zhou X., Zhu Y., Zhang X. et al. A new lumbar facet cage to enhance facet joint fusion: an experimental beagle study. Int J Clin Exp Med 2018;11(3):1908–15.
21. Maroon J.C., Bost J.W., LePere D.B. et al. Clinical evaluation of TruFUSE; lumbar facet fusion system. Surg Science 2013;4(2):166–75. DOI: 10.4236/ss.2013.42032.
22. Raso L.J. Minimally invasive facet fusion. In: Advanced procedures for pain management. A Step-by-Step Atlas. Ed. by S. Diwan, T. Deer. Springer International Publishing, 2018. Pp. 67–76. DOI: 10.1007/978-3-319-68841-1_6.

Вклад авторов

А.А. Булкин: разработка концепции и дизайна исследования, анализ и интерпретация данных, проверка критически важного интеллектуального содержания, написание текста статьи;
 А.Е. Боков: разработка концепции и дизайна исследования, анализ и интерпретация данных, проверка критически важного интеллектуального содержания;
 С.Г. Млявух: анализ полученных данных, проверка критически важного интеллектуального содержания, окончательное утверждение текста для публикации;
 Л.Я. Кравец: проверка критически важного интеллектуального содержания, окончательное утверждение текста для публикации;
 Ю.Д. Авдонина: обзор публикаций по теме статьи, окончательное утверждение текста для публикации.

Authors' contributions

A.A. Bulkin: developing the research design, data analysis and interpretation, revision of critically important intellectual content, article writing;
 A.E. Bokov: developing the research design, data analysis and interpretation, revision of critically important intellectual content;
 S.G. Mlyavykh: data analysis, revision of critically important intellectual content, final editing and approval for publication;
 L.Ya. Kravets: revision of critically important intellectual content, final editing and approval for publication;
 Yu.D. Avdonina: reviewing of publications of the article's theme, final editing and approval for publication.

ORCID авторов/ORCID of authors

А.А. Булкин/A.A. Bulkin: <https://orcid.org/0000-0003-4391-7698>
 А.Е. Боков/A.E. Bokov: <https://orcid.org/0000-0002-5203-0717>
 С.Г. Млявух/S.G. Mlyavykh: <https://orcid.org/0000-0002-6310-4961>
 Л.Я. Кравец/L.Ya. Kravets: <https://orcid.org/0000-0002-9484-6992>
 Ю.Д. Авдонина/Yu.D. Avdonina: <https://orcid.org/0000-0003-1566-1453>

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 for the publication of their data.