



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ВАРИАНТОВ ПЕДИКУЛЯРНОЙ УДЛИНЯЮЩЕЙ ОСТЕОТОМИИ ДЛЯ ДЕКОМПРЕССИИ ДУРАЛЬНОГО МЕШКА И КОРЕШКОВ В ПОЯСНИЧНОМ ОТДЕЛЕ ПОЗВОНОЧНИКА

А.А. Афаунов^{1,2}, И.В. Басанкин^{1,2}, А.Б. Багаудинов², С.Г. Млявях³, А.А. Гюльзатян², С.Б. Богданов^{1,2}

¹Кубанский государственный медицинский университет, Краснодар, Россия

²Научно-исследовательский институт — Краевая клиническая больница № 1
им. проф. С.В. Очаповского, Краснодар, Россия

³Приволжский исследовательский медицинский университет, Нижний Новгород, Россия

Цель исследования. Определить в эксперименте механические условия, необходимые для декомпрессии дурального мешка и корешков спинного мозга при педикулярной удлиняющей остеотомии с элонгацией корней дуг на поясничном уровне (PLO).

Материал и методы. Эксперименты проведены на трех препаратах позвоночно-двигательных сегментов L₁–L₅, полученных на судебно-медицинской секции у лиц 45–60-летнего возраста в сроки до двух суток после смерти с соблюдением норм подготовки тканей человека для биомеханических исследований. Из препаратов поясничного отдела позвоночника удаляли содержимое позвоночного и корешковых каналов, оставляя нетронутыми все элементы остеолигаментарного опорного комплекса. На каждом препарате проведено три эксперимента. В первом эксперименте на позвонке L₄ анатомического препарата производили двухстороннюю педикулярную удлиняющую остеотомию, имитирующую PLO. Во втором эксперименте на том же препарате с целью мобилизации заднего опорного комплекса производили остеотомию нижних суставных отростков L₃ на уровне их основания. В третьем эксперименте на анатомическом препарате дополнительно проводили двухстороннюю педикулярную остеотомию на позвонке L₃. Описанные эксперименты повторены трижды на трех анатомических препаратах. Полученные данные заносили в протоколы, после чего проводили статистическую обработку с помощью методов описательной статистики. Проверку совокупностей результатов исследования, измеренных в количественной шкале на нормальность, проводили при помощи Z-критерия Колмогорова — Смирнова. Для доказательства статистической значимости (или отсутствия таковой) значений сравниваемых параметров применяли U-критерий Уитни — Манна. Значимыми признавали результаты, при которых уровень статистической значимости p был меньше или равен 0,05.

Результаты. Увеличение сагиттального размера позвоночного канала за счет элонгации корней дуг после педикулярной удлиняющей остеотомии на уровне позвонка L₄ на 4 мм достигается при тракционном усилии в 97 N, на 5 мм — при 162 N, на 6 мм — 240 N, на 7 мм — 306 N. Мобилизирующая остеотомия нижних суставных отростков L₃ снижает необходимые для декомпрессии тракционные усилия соответственно до 30 N, 73 N, 125,5 N и 182 N, что в 1,7–3,2 раза меньше показателей PLO без мобилизации. Дополнительная двухсторонняя педикулярная остеотомия на вышележащем позвонке L₃ не обеспечивает дальнейшего уменьшения тракционных усилий, необходимых для увеличения сагиттального размера позвоночного канала.

Заключение. Методика декомпрессии дурального мешка и корешков на поясничном отделе позвоночника за счет педикулярной удлиняющей остеотомии с элонгацией корней дуг является перспективным вариантом хирургического лечения поясничного спинального стеноза. Полученные в настоящем исследовании данные могут быть интересны, особенно при возможной разработке иного технического решения и инструментария для осуществления PLO.

Ключевые слова: поясничный стеноз; декомпрессия; педикулярная удлиняющая остеотомия; эксперимент; кадаверный препарат.

Для цитирования: Афаунов А.А., Басанкин И.В., Багаудинов А.Б., Млявях С.Г., Гюльзатян А.А., Богданов С.Б. Экспериментальное обоснование технических вариантов педикулярной удлиняющей остеотомии для декомпрессии дурального мешка и корешков в поясничном отделе позвоночника // Хирургия позвоночника. 2025. Т. 22, № 2. С. 45–54.

DOI: <http://dx.doi.org/10.14531/ss2025.2.45-54>

EXPERIMENTAL SUBSTANTIATION OF TECHNICAL VARIANTS OF PEDICLE-LENGTHENING OSTEOTOMY FOR DECOMPRESSION OF THE DURAL SAC AND NERVE ROOTS IN THE LUMBAR SPINE

A.A. Afaunov^{1,2}, I.V. Basankin^{1,2}, A.B. Bagaudinov², S.G. Mlyavykh³, A.A. Gulzatyan², S.B. Bogdanov^{1,2}¹Kuban State Medical University, Krasnodar, Russia²Research Institute – Regional Clinical Hospital No. 1 n.a. Prof. S.V. Ochařovskiy, Krasnodar, Russia³Privolzhsky Research Medical University, Nizhny Novgorod, Russia

Objective. To determine experimentally the mechanical conditions required for decompression of the dural sac and spinal nerve roots during pedicle-lengthening osteotomy (PLO) with elongation of pedicles at the lumbar level.

Material and Methods. The experiments were conducted on three cadaver specimens of L1–L5 vertebral motor segments obtained at the forensic section from individuals aged 45–60 within two days after death in compliance with the standards for preparing human tissue for biomechanical studies. The contents of the vertebral and root canals were removed from the specimens of the lumbar spine, leaving all elements of the osteoligamentary support complex intact. Three experiments were conducted on each specimen. In the first experiment, bilateral pedicle lengthening osteotomy imitating PLO was performed on the L4 vertebra of the anatomical specimen. In the second experiment, osteotomies of the inferior articular processes of L3 at the level of their base were performed on the same specimen in order to mobilize the posterior support complex. In the third experiment, bilateral pedicle osteotomy was additionally performed on the L3 vertebra. The described experiments were repeated three times on three anatomical specimens. The obtained data were recorded in protocols, and then statistical processing was performed using descriptive statistics methods. The sets of study results measured on a quantitative scale for normality were checked using the Kolmogorov–Smirnov Z-criterion. To prove the statistical significance (or lack thereof) of the values of the compared parameters, the Mann–Whitney U-test was used. Results were considered significant if the level of statistical significance p was less than or equal to 0.05.

Results. The increase in the sagittal spinal canal size after PLO due to the elongation of the L4 pedicles by 4 mm is achieved with a traction force of 97 N, by 5 mm – with 162 N, by 6 mm – with 240 N, and by 7 mm – with 306 N. Mobilizing osteotomy of the inferior articular processes of the L3 reduces the traction forces necessary for decompression to 30 N, 73 N, 125.5 N, and 182 N, respectively, which is 1.7–3.2 times less than the PLO values without mobilization. Additional bilateral pedicle osteotomy on the overlying L3 vertebra does not provide further decrease in the traction forces necessary to increase the sagittal size of the spinal canal.

Conclusion. The technique of decompression of the dural sac and nerve roots in the lumbar spine by means of pedicle-lengthening osteotomy with elongation of pedicles is a promising option for surgical treatment of lumbar spinal stenosis. The data obtained in this study may be of interest, especially with the possible development of another technical solution and instrumentation for implementing PLO.

Key Words: lumbar stenosis; decompression; pedicle lengthening osteotomy; experiment; cadaver specimen.

Please cite this paper as: Afaunov AA, Basankin IV, Bagaudinov AB, Mlyavykh SG, Gulzatyan AA, Bogdanov SB. Experimental substantiation of technical variants of pedicle-lengthening osteotomy for decompression of the dural sac and nerve roots in the lumbar spine. Russian Journal of Spine Surgery (Khirurgiya Pozvonochnika). 2025;22(2):45–54. In Russian. DOI: <http://dx.doi.org/10.14531/ss2025.2.45-54>

Поясничный спинальный стеноз (ПСС) является распространенным заболеванием позвоночника, в том числе у людей пожилого возраста, обычно он характеризуется анатомическим уменьшением объема позвоночного канала или размера межпозвоночного отверстия [1]. Строгих эпидемиологических исследований распространенности ПСС не проводилось, однако, согласно Ravindra et al. [2], примерно у 103 млн человек во всем мире диагностируется ПСС ежегодно, при этом самая высокая заболеваемость приходится на Европу (2,2 %), а самая низкая – на Африку (0,94 %).

Дегенеративный ПСС может затрагивать центральный канал, латеральный карман, фораминальные отверстия или быть комбинированным,

сложного генеза. Центральный стеноз может развиваться в результате уменьшения переднезаднего, поперечного или комбинированного диаметров позвоночного канала из-за выпячивания межпозвоночного диска и/или гипертрофии фасеточных суставов и желтой связки. К критериям центрального стеноза относят уменьшение сагиттального размера позвоночного канала менее 12 мм (относительный стеноз) и менее 10 мм (абсолютный стеноз) по данным МРТ, СКТ, СКТ-миелографии [3].

Существуют различные хирургические подходы, направленные на устранение дегенеративного стеноза позвоночного канала, и выбор методики до сих пор остается вопросом дискуссий [4]. Хирургическая декомпрессия

дурального мешка со спондилезом скомпрометированных позвоночно-двигательных сегментов (ПДС) обеспечивает хорошие клинические результаты, но имеет следующие недостатки: большая кровопотеря, раневая инфекция, ятрогенная нестабильность, рубцово-спаечный процесс, длительное восстановление, длительная кривая обучения [5, 6].

Закрытая педикулярная удлиняющая остеотомия и элонгация ножек дуги позвонка (PLO – Pedicle Lengthening Osteotomy) – относительно новый метод лечения ПСС [7]. По сравнению с традиционной хирургией, PLO может эффективно расширить позвоночный канал и фораминальные отверстия, минимизируя при этом повреждения задних анатомических структур

поясничного отдела позвоночника, что приводит к хорошим клиническим результатам. Однако техника PLO в настоящее время находится на ранних стадиях развития, опубликовано лишь несколько экспериментальных и клинических исследований по эффективности данной методики [8]. Кроме того, не вполне понятно, какие силовые воздействия необходимо приложить к элементам задней остеолигаментарной колонны после педикулярной удлиняющей остеотомии для достижения клинически значимого диастаза в зоне пересеченных корней дуг и можно ли снизить механическую нагрузку на металлические имплантаты при выполнении декомпрессии дурального мешка и корешков путем элонгации корней дуг.

Цель исследования – определить в эксперименте механические условия, необходимые для декомпрессии дурального мешка и корешков спинного мозга при выполнении педикулярной удлиняющей остеотомии с элонгацией корней дуг на поясничном уровне.

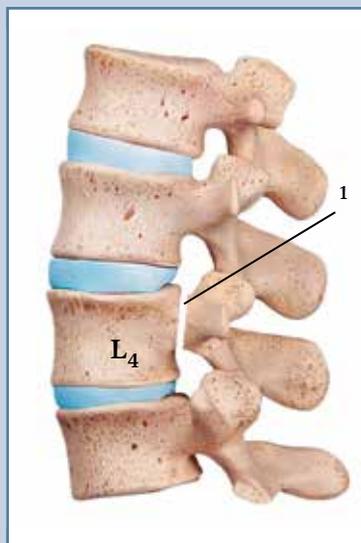


Рис. 1

Схема педикулярной удлиняющей остеотомии (1) на позвонке L₄

Материал и методы

Эксперименты проведены в лаборатории физико-математических методов испытания материалов и изделий Кубанского государственного технологического университета на трех анатомических препаратах ПДС L₁–L₅, полученных на судебно-медицинской секции кафедры судебной медицины Кубанского государственного медицинского университета у лиц 45–60-летнего возраста в сроки до двух суток после смерти с соблюдением норм подготовки тканей человека для биомеханических исследований [9]. Причины смерти не влияли на структуру ПДС. Изъятые препараты подвергали морфометрическим измерениям и рентгенографии в двух проекциях. Подготовленные для экспериментов препараты по форме и размерам соответствовали анатомической норме. В них не было выявлено визуальных либо рентгенологических аномалий, а костная структура не имела признаков остеопороза. Данные меры контроля считаются достаточными при проведении биомеханических экспериментальных иссле-

дований с секционными анатомическими препаратами [10, 11].

Из препаратов поясничного отдела позвоночника удаляли содержимое позвоночного и корешковых каналов, оставляя нетронутыми все элементы остеолигаментарного опорного комплекса. Производили двухстороннюю педикулярную удлиняющую остеотомию (PLO) на позвонке L₄ с помощью пилы Джильи (рис. 1).

После этого через корешковые каналы на уровнях L₃–L₄ и L₄–L₅ проводили два гибких тросика диаметром 2,5 мм. При этом один тросик охватывал тело L₄, а второй – дужку L₄ с соответствующими анатомическими элементами задней остеолигаментарной колонны на этом уровне (рис. 2).

Фиксировали анатомический препарат в лабораторном стенде механических испытаний так, чтобы тросик, захватывающий тело позвонка L₄, был закреплен на неподвижной траверсе стенда, а второй тросик, захватывающий дужку L₄ с элементами заднего опорного комплекса, был закреплен на подвижной траверсе стенда. Между подвижной траверсой стенда и тести-

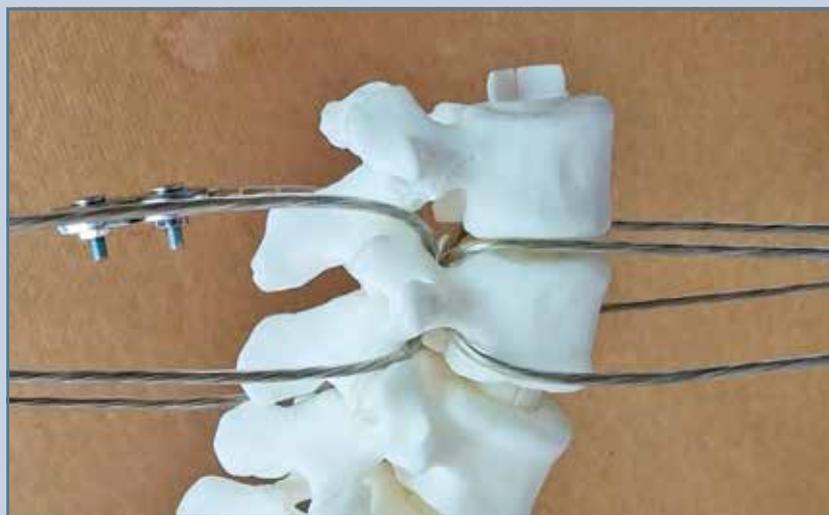


Рис. 2

Имитация расположения силовых элементов (тросиков) на муляже поясничного отдела позвоночника для осуществления сагитально направленного дистрационного усилия между телом позвонка L₄ и элементами заднего остеолигаментарного опорного комплекса



Рис. 3
Анатомический препарат поясничного отдела позвоночника после двухсторонней педикулярной удлиняющей остеотомии L₄ закреплен между траверсами стенда механических испытаний

руемым анатомическим препаратом размещали электронный измеритель тракционного усилия, обеспечивающий точность измерения 0,01 N (рис. 3).

После этого между траверсами стенда создавали дозированное нарастающее дистракционное усилие, которое через тросики передавалось на позвонок L₄ в виде сагиттально направленной дистракции между телом позвонка и его задней остеолигаментарной колонной, как показано на рис. 4.

По мере увеличения сагиттально направленной дистракционной нагрузки появлялся и увеличивался диастаз в области произведенных педикулярных удлиняющих остеотомий (PLO), что свидетельствовало об увеличении сагиттального размера позвоночного канала на уровне L₄, а также корешковых каналов на уровне L₃-L₄ и L₄-L₅. Увеличивающийся диастаз измеряли, пока он не достигал 7 мм, после чего нагрузочное тести-

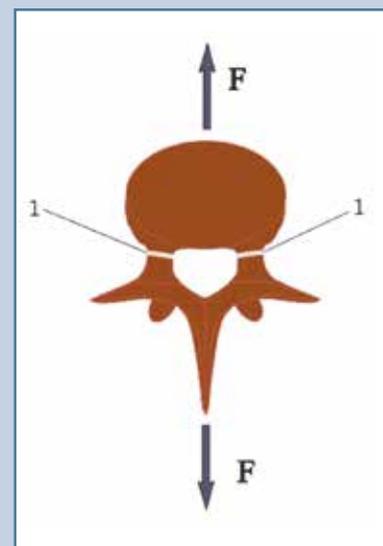


Рис. 4
Схема двухсторонней педикулярной удлиняющей остеотомии поясничного позвонка (1) и сагиттально направленного дистракционного усилия (F) между телом позвонка и элементами заднего опорного комплекса

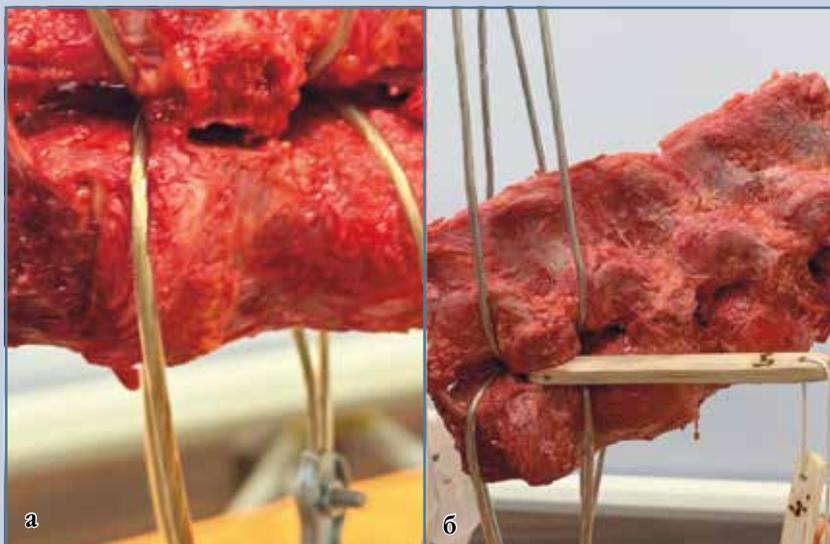


Рис. 5

Диастаз в зоне педикулярной удлиняющей остеотомии (а) и измерение его величины с помощью щупа (б)

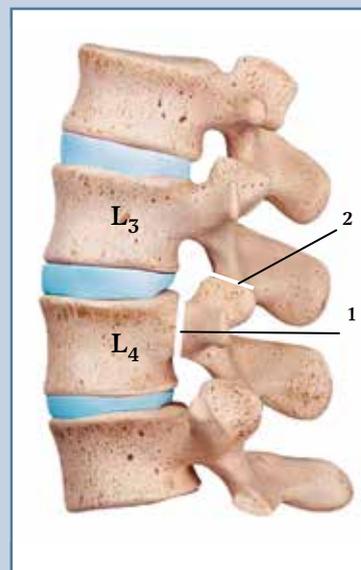


Рис. 6

Схема педикулярной удлиняющей остеотомии L_4 (1) и мобилизирующей остеотомии нижних суставных отростков L_3 (2) в поясничном отделе позвоночника

рование прекращали. Достигаемый в эксперименте диастаз 7 мм мы считали допустимым в плане исключения разрушающих силовых воздействий на структуры опорного остеолигаментарного комплекса исследуемых позвоночно-двигательных сегментов, не выходящих за пределы «пластических» деформаций, что позволяло несколько раз повторять нагрузочное тестирование на том же анатомическом препарате, и в то же время достаточным с точки зрения клинической практики для достижения декомпрессии дурального мешка. Определение диастаза в остеотомии корней дуг осуществляли с помощью набора щупов толщиной 1, 2, 3, 4, 5, 6 и 7 мм, которыми в ходе эксперимента последовательно измеряли его величину (рис. 5).

Через каждый 1 мм увеличения диастаза в области педикулярной удлиняющей остеотомии отмечали соответствующую величину дистракционного усилия. Полученные данные заносили в протокол эксперимента. После достижения размера диастаза 7 мм дистракционную нагрузку прекращали. Стенд возвращали в исходное положение. Эксперимент на том же

анатомическом препарате повторяли еще два раза, что при неразрушающем характере механических воздействий на тестируемый препарат уменьшало влияние возможных погрешностей при измерениях на полученные средние значения. После трехкратного повторения эксперимента препарат извлекали из стенда.

С целью мобилизации заднего опорного комплекса произведены остеотомии нижних суставных отростков L_3 на уровне их основания. При этом отсеченные от дужки нижние суставные отростки не извлекали, оставляя на «своем» месте и сохраняя исходный контакт с капсулой межпозвонковых суставов (рис. 6).

Препарат поясничного отдела позвоночника повторно закрепляли между траверсами стенда, как и в предыдущем эксперименте. После этого между траверсами стенда создавали дозированное нарастающее дистракционное усилие, которое через тросики передавалось на позвонок L_4 в виде сагиттально направленной дистракции между телом позвонка и его задней остеолигаментарной колонной. По мере увеличения сагиттально

направленной дистракционной нагрузки увеличивался диастаз в области произведенных педикулярных удлиняющих остеотомий L_4 . Увеличивающийся диастаз измеряли, как и в предыдущем эксперименте, до размера 7 мм. Полученные данные заносили в протокол эксперимента. После чего тракционную нагрузку прекращали. Стенд возвращали в исходное положение. Данный вариант эксперимента повторяли еще два раза. После трехкратного повторения эксперимента препарат извлекали из стенда.

Для проведения третьего эксперимента на анатомическом препарате дополнительно сделали двухстороннюю педикулярную остеотомию на позвонке L_3 с помощью пилы Джильи. Таким образом, дополнительная мобилизация заднего опорного комплекса на уровне L_4 включала не только остеотомии нижних суставных отростков L_3 на уровне их основания, но и двухстороннюю педикулярную остеотомию на позвонке L_3 (рис. 7).

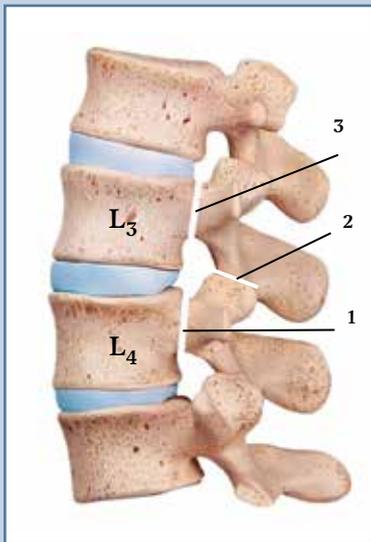


Рис. 7

Схема педикулярной удлиняющей остеотомии L_4 (1), мобилизирующих остеотомий нижних суставных отростков L_3 (2) и педикулярных остеотомий L_3 (3) в поясничном отделе позвоночника

Препарат закрепляли между траверсами стенда, как в предыдущем эксперименте. Аналогично предыдущим экспериментам создавали сагиттально направленную дистракцию между телом позвонка L_4 и его задней остеолигаментарной колонной. Увеличивающийся диастаз в области произведенных педикулярных удлиняющих остеотомий измеряли до достижения размера 7 мм. При этом, как и в предыдущих экспериментах, через каждый 1 мм увеличения диастаза в области транспедикулярной остеотомии отмечали соответствующую величину дистракционной нагрузки. Полученные данные заносили в протокол эксперимента. Третий вариант эксперимента, как и два предыдущих, повторяли три раза.

Таким образом, в экспериментальных условиях были изучены показатели жесткости поясничного ПДС после двухсторонней педикулярной удлиняющей остеотомии (PLO) L_4 по отно-

шению к неразрушающей сагиттально направленной дистракционной нагрузке, приводящей к расширению позвоночного и корешковых каналов в сагиттальном направлении, а также степень уменьшения этого показателя жесткости за счет мобилизирующих двухсторонних остеотомий нижних суставных отростков и двухсторонних педикулярных остеотомий вышележащего позвонка.

Статистическую обработку и анализ результатов проводили с помощью методов описательной статистики. Проверку совокупностей результатов исследования, измеренных в количественной шкале на нормальность, проводили при помощи Z-критерия Колмогорова – Смирнова. Для доказательства статистической значимости (или отсутствия таковой) значений сравниваемых параметров применяли метод непараметрической статистики U-критерий Манна – Уитни. Значимыми признавали результаты, при которых уровень статистической значимости p был меньше или равен 0,05. При статистическом анализе материала использовали персональный компьютер с набором необходимого программного обеспечения (программа для статистической обработки данных SPSS-23.0 для Windows).

Результаты

Проведенные эксперименты показали, что постепенно нарастающая сагиттально направленная дистракционная нагрузка между телом позвонка L_4 и его задним опорным комплексом, приложенная после двухсторонней педикулярной удлиняющей остеотомии, приводит к появлению постепенно увеличивающегося диастаза в области остеотомий правого и левого корня дуги, который нарастает симметрично справа и слева при увеличении дистракционного воздействия. Полученные в трех экспериментах величины представлены в табл.

На основании полученных данных построили графики зависимости увеличения диастаза в области педикулярных удлиняющих остеотомий L_4 от при-

лагаемых сагиттально направленных дистракционных усилий между телом L_4 и элементами заднего опорного комплекса этого позвонка (рис. 8).

Как видно из полученных данных, увеличение диастаза в области педикулярных удлиняющих остеотомий до величины 3 мм происходит не прямо пропорционально нарастающему дистракционному усилию (рис. 7). После достижения диастаза 3 мм дальнейшее его увеличение происходит прямо пропорционально до величины 7 мм, что подтверждает отсутствие в анатомических препаратах необратимых структурных разрушений при нагрузках, примененных в наших экспериментах.

Расчеты для всех значений достигаемых диастазов в области PLO показали, что мобильность задней остеолигаментарной колонны L_4 после PLO L_4 статистически значимо отличается от ее мобильности после PLO L_4 с мобилизирующей фасетотомией нижних суставных отростков L_3 при значениях диастазов 3–7 мм. Также мобильность задней остеолигаментарной колонны L_4 после PLO L_4 статистически значимо отличается от мобильности после PLO L_4 с мобилизирующей фасетотомией нижних суставных отростков L_3 и педикулотомии L_3 .

В то же время результаты статистических расчетов показали, что мобильность задней остеолигаментарной колонны L_4 после PLO L_4 с мобилизирующей фасетотомией нижних суставных отростков L_3 не имеет статистически значимых отличий от мобильности после PLO L_4 с мобилизирующей фасетотомией нижних суставных отростков L_3 и педикулотомии L_3 .

Клинически значимым для достижения декомпрессии дурального мешка и корешков спинного мозга можно считать диастаз в области педикулярных остеотомий не менее 4 мм. Как видно из полученных результатов, он достигается при сагиттально направленном усилии 97 N. Диастаз 5 мм достигается при усилении 162 N, 6 мм – при 240 N, 7 мм – при 306 N. Остеотомии нижних суставных от-

Таблица

Мобильность задней остеолигаментарной колонны L₄ после PLO L₄ в изолированном виде, PLO L₄ с мобилизирующей двухсторонней остеотомией нижних суставных отростков L₃ и PLO L₄ с мобилизирующей двухсторонней остеотомией нижних суставных отростков L₃ и двухсторонней педикулярной остеотомией L₃

Достижимый диастаз в зоне двухсторонней педикулярной удлиняющей остеотомии L ₄	Дистракционное усилие для достижения диастаза (N)		
	PLO L ₄	PLO L ₄ + фасетотомия нижних фасеток L ₃	PLO L ₄ + фасетотомия нижних фасеток L ₃ + педикулотомия L ₃
2 мм	10,0	3,0	2,8
3 мм	24,8	7,4	7,0
4 мм	97,0	30,0	28,0
5 мм	162,0	73,0	70,3
6 мм	240,0	125,5	120,0
7 мм	306,0	182,0	168,0

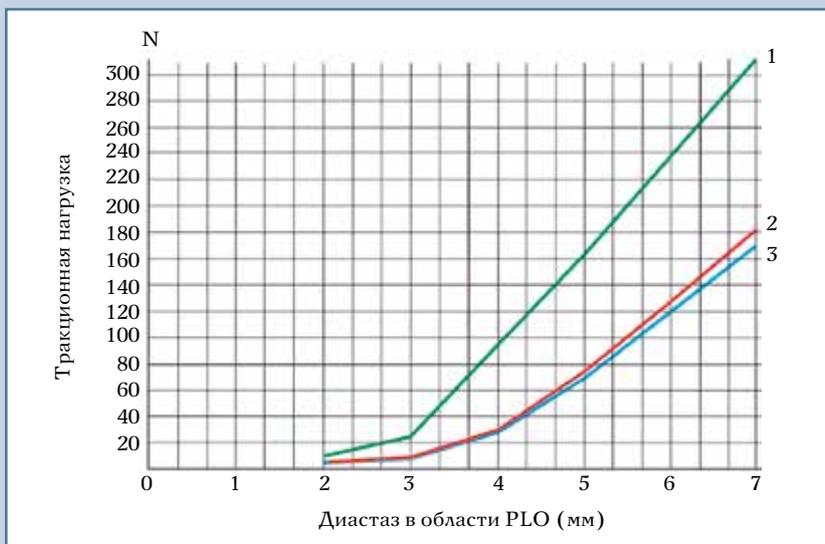


Рис. 8

Графическое отражение зависимости величины диастаза в области педикулярных удлиняющих остеотомий (PLO) L₄ от величины сагиттально направленного дистракционного усилия между телом позвонка L₄ и элементами его заднего остеолигаментарного опорного комплекса: 1 – педикулярная удлиняющая остеотомия L₄; 2 – педикулярная удлиняющая остеотомия L₄ и мобилизирующая остеотомия нижних суставных отростков L₃; 3 – педикулярная удлиняющая остеотомия L₄, мобилизирующая остеотомия нижних суставных отростков L₃ и мобилизирующая педикулярная остеотомия L₃

ростков L₃ значительно мобилизовали задний опорный комплекс L₄ в плане возможности его дорсально направленного смещения по отно-

шению к телу позвонка. Для достижения клинически значимого диастаза в области педикулярных остеотомий 4 мм потребовалось усилие

30 N, 5 мм – при усилении 73 N, 6 мм – при 125 N, 7 мм – при 182 N. Эти значения в 1,70–3,23 раза меньше, чем без мобилизирующих остеотомий нижних суставных отростков L₃ (см. табл., рис. 8). Третий эксперимент, предусматривающий целью мобилизации не только остеотомию нижних суставных отростков L₃, но и двухстороннюю педикулярную остеотомию этого же позвонка, показал, что дальнейшего снижения сагиттально направленного дистракционного усилия для достижения клинически значимого диастаза в области остеотомии корней дуг L₄ по сравнению со вторым экспериментом не происходит (см. табл., рис. 8, где графики 2 и 3 почти наслаиваются друг на друга).

Обсуждение

Определение термина «поясничный спинальный стеноз» впервые предложено Verbiest et al. в 1949 г. В течение более 70 лет развивались хирургические методики для лечения данной патологии [8]. По мере развития хирургических технологий и накопления клинических ретроспективных данных те или иные оперативные методики набирали популярность или подвергались критике.

В последнее время большое распространение получила дорсальная декомпрессия корешков в сочетании с транспедикулярной фиксацией и межтеловым спондилодезом, выполненным из заднего или заднебокового доступа к межпозвоночным дискам. Данный вид операций реализует нейроортопедический подход к лечению поясничных стенозов [12]. Наряду с адекватной декомпрессией нервно-сосудистых образований применение транспедикулярных спинальных систем дает возможность устранить сегментарную нестабильность или спондилолистез, нормализовать анатомические взаимоотношения в ПДС и сагиттальный баланс позвоночного столба. При этом необходимо отметить, что результаты лечения пациентов с поясничными стенозами дегенеративной этиологии в равной

мере зависят от качества произведенной декомпрессии, точности коррекции анатомических взаимоотношений в оперированных ПДС и надежности стабилизации, позволяющей сформироваться костному блоку [13].

В настоящее время также очень популярны различные минимально-инвазивные хирургические подходы для лечения ПСС с минимальным воздействием на стабильность ПДС, особенно у пациентов пожилого и старческого возраста. Однако в этом случае усложняется контроль за адекватностью выполнения основного этапа вмешательства, возрастает риск развития интраоперационных осложнений и ятрогенной нестабильности оперированных сегментов [14].

С.Г. Млявых и соавт. [15] впервые применили PLO в клинической практике, предложив систему транспедикулярной остеотомии Altum, включающую инструментарий для ее выполнения и транспедикулярные винты особой конструкции. Винты обеспечивают возможность distraction корней дуг после остеотомии и, соответственно, увеличение сагиттального размера позвоночного и корешковых каналов на уровне ПДС, в которых выполнена такая остеотомия. По сравнению с традиционными хирургическими подходами PLO расширяет позвоночный канал, сводя к минимуму повреждение дорсальных анатомических структур поясничного отдела позвоночника. Kiarou et al. [16] провели биомеханический эксперимент и 3D-анализ и обнаружили, что применение одно- или двухсторонней PLO в поясничном отделе позвоночника может увеличить площадь позвоночного канала и межпозвонковых отверстий без существенного влияния на общую или сегментарную кинематику.

Gao et al. [8] провели исследование с целью изучения влияния PLO на стабильность ПДС. Результаты показали, что PLO может эффективно расширять позвоночный канал, при этом не наблюдалось спондилолистеза или других осложнений. Более того, это вмешательство не оказывает существенного влияния на стабильность

поясничного отдела позвоночника, что предполагает потенциальное клиническое применение. С.Г. Млявых и соавт. [17] проанализировали ближайшие и отдаленные результаты лечения пациентов, которым выполняли PLO, и обнаружили, что объем позвоночного канала значительно увеличился после операции, у пациентов отмечался регресс неврологической симптоматики. Более того, у всех пациентов через 6 мес. после операции произошло сращение корней дуг в зоне элонгации и полученного диастаза после PLO.

Необходимо отметить, что сама идея PLO может найти достаточно широкое применение при лечении больных с поясничными стенозами. Однако инструментарий Altum, обеспечивающий выполнение остеотомии, отличается высокой технической сложностью. Удлиняемые транспедикулярные винты, реализующие элонгацию корней дуг после PLO в описанном варианте [8, 16], конструктивно очень сложны, имеют большой диаметр (до 11 мм и более), что потенциально невыгодно с учетом вероятности возникновения показаний к ревизионным операциям.

В связи с потребностью в импортозамещении применяемого инструментария и имплантатов актуальным является вопрос разработки иного способа выполнения PLO и последующей декомпрессии дурального мешка и корешков путем элонгации корней дуг с использованием «обычных» транспедикулярных винтов для поясничного отдела диаметром 6–7 мм. При этом возможность значительного уменьшения необходимого для декомпрессии усилия, прилагаемого к анатомическим структурам оперируемых ПДС, будет иметь существенное практическое значение.

Наше экспериментальное исследование посвящено клинически значимому аспекту методики PLO – изучению влияния различных вариантов мобилизации поясничных ПДС перед PLO на условия последующей коррекции сагиттального размера позвоночного канала. Очевидно, что успешная мобилизация позволит достигнуть необходимой элонгации

при меньших корригирующих усилиях. Соответственно, после мобилизации фиксирующие металлоконструкции будут подвергаться меньшим нагрузкам, что снизит вероятность дестабилизации и потерю достигнутой коррекции.

Экспериментальные исследования такого рода проводились другими авторами с целью определения возможностей коррекции анатомически измененных ПДС в иных клинических ситуациях [10, 18]. Проведенное исследование установило возможность существенного снижения необходимых корригирующих усилий для эффективного увеличения сагиттального размера позвоночного и корешковых каналов на уровне хирургического вмешательства, что может иметь большое практическое значение при дальнейшем развитии технологии декомпрессии дурального мешка путем PLO.

Заключение

Дозированная элонгация корней дуг после транспедикулярной остеотомии требует значительного сагиттально направленного тракционного усилия между телом позвонка и анатомическими элементами заднего опорного комплекса. Увеличение сагиттального размера позвоночного канала за счет элонгации корней дуг после педикулярной удлиняющей остеотомии на уровне позвонка L₄ на 4 мм достигается при тракционном усилии в 97 N, на 5 мм – при 162 N, на 6 мм – при 240 N, на 7 мм – при 306 N. Мобилизирующая остеотомия нижних суставных отростков L₃ снижает необходимые для декомпрессии тракционные усилия соответственно до 30 N, 73 N, 125,5 N и 182 N, что в 1,7–3,2 раза меньше показателей PLO без мобилизации. Дополнительно произведенная двухсторонняя педикулярная остеотомия на вышележащем позвонке L₃ не обеспечивает дальнейшего уменьшения тракционных усилий, необходимых для увеличения сагиттального размера позвоночного канала.

Методика декомпрессии дурального мешка и корешков в поясничном отделе позвоночника за счет педикуляр-

ной удлиняющей остеотомии с элонгацией корней дуг может явиться перспективным вариантом хирургического лечения ПСС. Полученные в настоящем исследовании данные могут быть интересны при возможной разработке иного

технического решения и инструментария для осуществления PLO.

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

локальным этическим комитетом учреждения. Все авторы внесли существенный вклад в проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

Литература/References

1. **Katz JN, Zimmerman ZE, Mass H, Makhni MC.** Diagnosis and management of lumbar spinal stenosis: a review. *JAMA.* 2022;327:1688–1699. DOI: 10.1001/jama.2022.5921
2. **Ravindra VM, Senglaub SS, Rattani A, Dewan MC, Hrtl R, Bisson E, Park KB, Shrime MG.** Degenerative lumbar spine disease: estimating global incidence and worldwide volume. *Global Spine J.* 2018;8:784–794. DOI: 10.1177/2192568218770769
3. **Халепа Р.В., Амелина Е.В., Кубецкий Ю.Е.** Эндоскопическая и микрохирургическая декомпрессия при центральном стенозе позвоночного канала на поясничном уровне // *Хирургия позвоночника.* 2024. Т. 21, № 3. С. 59–68. [Khalera RV, Amelina EV, Kubetsky YuE. Endoscopic and microsurgical decompression for central lumbar spinal stenosis. *Russian Journal of Spine Surgery (Khirurgiya Pozvonochnika)* 2024;21(3):59–68]. DOI: 10.14531/ss2024.3.59-68
4. **Абакиров М.Д., Нурмухаметов Р.М., Мамырбаев С.Т., Аль-Баварид О.А.** Результаты ревизионных операций при дегенеративно-дистрофических заболеваниях пояснично-крестцового отдела позвоночника // *Политравма.* 2020. № 1. С. 31–40. [Abakirov MD, Nurmukhametov RM, Mamyrbayev ST, Al-Bavarid OA. Results of revision surgery for degenerative dystrophic diseases of the lumbosacral spine. *Polytrauma.* 2020;(1):31–40]. DOI: 10.24411/1819-1495-2020-10005
5. **Nakajima Y, Nagai S, Michikawa T, Hachiya K, Ito K, Takeda H, Kawabata S, Yoshioka A, Ikeda D, Kaneko S, Hachiya Y, Fujita N.** Predictors of patient dissatisfaction after lumbar spinal canal stenosis surgery: a multicenter retrospective study. *Spine Surg Relat Res.* 2024;8:322–329. DOI: 10.22603/ssr.2023-0256
6. **Аганесов А.Г., Алексанян М. М., Гемджян Э.Г.** Стеноз позвоночного канала: сравнительный анализ малоинвазивной двусторонней декомпрессии из унилатерального доступа и ламинэктомии // *Хирургия позвоночника.* 2024. Т. 21, № 1. С. 35–43. [Aganesov AG, Aleksanyan MM, Gemdzhan EG. Spinal canal stenosis: comparative analysis of minimally invasive bilateral decompression through a unilateral approach and laminectomy. *Russian Journal of Spine Surgery (Khirurgiya Pozvonochnika).* 2024;21(1):35–43]. DOI: 10.14531/ss2024.1.35-43
7. **Mlyavykh SG, Bokov AE, Yashin KS, Karyakin NN, Anderson DG.** Pedicle-lengthening osteotomy for the treatment of lumbar spinal stenosis: pre-clinical study of novel orthopedic devices. *Modern Technologies in Medicine.* 2018;10(2):37–46. DOI: 10.17691/stm2018.10.2.04
8. **Gao M, Zou J, Zhang Z, Luo Z, Yang H.** Evaluation of the influence of pedicle-lengthening osteotomy on lumbar stability. *Am J Transl Res.* 2016;8:2070–2078.
9. **Сиклилда В.Д., Акопов В.И., Хлопонин П.А. и др.** Подготовка тканей экспериментальных животных и человека для биомеханических и морфологических исследований. Методические рекомендации. Ростов-на-Дону; Санкт-Петербург, 2002. [Sikilinda VD, Akopov VI, Khloponin PA, et al. Preparation of experimental animal and human tissues for biomechanical and morphological studies. Methodical recommendations. Rostov-on-Don – St. Petersburg, 2002].
10. **Колесов С.В., Гаврюшенко Н.С., Кудряков С.А., Шавырин И.А.** Экспериментальное исследование возможностей вентральной коррекции и фиксации при деформациях позвоночника // *Хирургия позвоночника.* 2011. № 3. С. 82–88. [Kolesov SV, Gavryushenko NS, Kudryakov SA, Shavyrin IA. Experimental study of anterior correction and fixation techniques for spinal deformities *Russian Journal of Spine Surgery (Khirurgiya Pozvonochnika).* 2011;(3):82–88].
11. **Friis EA, Amold PM, Goel VK.** 9 – Mechanical testing of cervical, thoracolumbar, and lumbar spine implants. In: *Mechanical Testing of Orthopaedic Implants.* 2017. P. 161–180. DOI: 10.1016/b978-0-08-100286-5.00009-3
12. **Wang C, Xu F, Jia L, Liu Y, Zhang S.** Lumbar fusion efficacy with local bone grafting and platelet-rich plasma: a clinical investigation in treating degenerative lumbar spinal stenosis in the elderly. *Int Orthop.* 2024;48:2963–2970. DOI: 10.1007/s00264-024-06294-2
13. **Li W, Wei H, Zhang R.** Different lumbar fusion techniques for lumbar spinal stenosis: a Bayesian network meta-analysis. *BMC Surg.* 2023;23:345. DOI: 10.1186/s12893-023-02242-w
14. **Mlyavykh SG, Bokov AE, Aleynik AY, Yashin KS, Karyakin NN.** Open and minimally invasive technologies in surgical treatment of stable symptomatic stenosis of the lumbar spine. *Modern Technologies in Medicine.* 2019;11(4):135–145. DOI: 10.17691/stm2019.11.4.16
15. **Mlyavykh SG, Bokov AE, Yashin KS, Anderson DG.** Pedicle-lengthening osteotomy for the treatment of lumbar spinal stenosis: the surgical technique (pilot clinical study). *Modern Technologies in Medicine.* 2018;10(3):58–69. DOI: 10.17691/stm2018.10.3.7
16. **Kiapour A, Anderson DG, Spenciner DB, Ferrara L, Goel VK.** Kinematic effects of a pedicle-lengthening osteotomy for the treatment of lumbar spinal stenosis. *J Neurosurg Spine.* 2012;17:314–320. DOI: 10.3171/2012.6.SPINE11518
17. **Mlyavykh S, Ludwig SC, Kepler CK, Anderson DG.** Five-year results of a clinical pilot study utilizing a pedicle-lengthening osteotomy for the treatment of lumbar spinal stenosis. *J Neurosurg Spine.* 2018;29:241–249. DOI: 10.3171/2017.11.SPINE16664
18. **Надулич К.А., Шаповалов В.М., Теремшонов А.В., Василевич С.В.** Экспериментальная оценка особенностей коррекции посттравматической кифотической деформации грудного и поясничного отделов позвоночника // *Травматология и ортопедия России.* 2010. № 2. С. 86–88. [Nadulich KA, Shapovalov VM, Teremshonok AV, Vasilevich SV. Experimental evaluation of correction features of posttraumatic kyphosis of thoracic and lumbar spine. *Traumatology and Orthopedics of Russia.* 2010;16(2):86–88]. DOI: 10.21823/2311-2905-2010-0-2-86-88

Адрес для переписки:

Афаунов Аскер Алиевич
350007, Россия, Краснодар, ул. Береговая, 2, корп. 1, кв. 194,
afaunovkr@mail.ru

Статья поступила в редакцию 21.02.2025

Рецензирование пройдено 09.04.2025

Подписано в печать 20.04.2025

Address correspondence to:

Afaunov Asker Alievich
2, bldg. 1, apt. 194, Beregovaya str., Krasnodar, 350007, Russia
afaunovkr@mail.ru

Received 21.02.2025

Review completed 09.04.2025

Passed for printing 20.04.2025

Аскер Алиевич Афаунов, д-р мед. наук, профессор, травматолог-ортопед, нейрохирург, заведующий кафедрой травматологии, ортопедии и военно-полевой хирургии, Кубанский государственный медицинский университет, Россия, 350063, Краснодар, ул. Митрофана Седина, 4; врач нейрохирургического отделения № 3, Краевая клиническая больница № 1 им. проф. С.В. Очаповского, Россия, 350086, Краснодар, ул. 1 Мая, 167, к. 1, eLibrary SPIN: 8039-9920, ORCID: 0000-0001-7976-860X, afaunovkr@mail.ru;

Игорь Вадимович Басанкин, д-р мед. наук, травматолог-ортопед, нейрохирург, заведующий нейрохирургическим отделением № 3, Краевая клиническая больница № 1 им. проф. С.В. Очаповского, Россия, 350086, Краснодар, ул. 1 Мая, 167, к. 1; ассистент кафедры хирургии № 1, Кубанский государственный медицинский университет, Россия, 350063, Краснодар, ул. Митрофана Седина, 4, eLibrary SPIN: 3541-8946, ORCID: 0000-0003-3549-0794, basankin@rambler.ru;

Ахмат Багаудинович Багаудинов, хирург нейрохирургического отделения № 3, Краевая клиническая больница № 1 им. проф. С.В. Очаповского, Россия, 350086, Краснодар, ул. 1 Мая, 167, к. 1, ORCID: 0000-0003-0270-6800, Bagaudinovspine@gmail.com;

Сергей Геннадьевич Млявух, д-р мед. наук, травматолог-ортопед, руководитель службы хирургии позвоночника акционерного общества «Ильинская больница», 143421, Московская обл., городской округ Красногорск, д. Глухово, ул. Рублёвское предместье, 2, корп. 2; профессор кафедры травматологии, ортопедии и нейрохирургии им. М.В. Колокольцева, Приволжский исследовательский медицинский университет, Россия, 603005, Нижний Новгород, Площадь Минина и Пожарского, 10, eLibrary SPIN: 9803-0387, ORCID: 0000-0002-6310-4961, s.mliavykh@ibospital.ru;

Абрам Акопович Гользатян, нейрохирург нейрохирургического отделения № 3, Краевая клиническая больница № 1 им. профессора С.В. Очаповского, Россия, 350086, Краснодар, ул. 1 Мая, 167, к. 1, eLibrary SPIN: 6853-4861, ORCID: 0000-0003-1260-4007, Neuro8@mail.ru;

Сергей Борисович Богданов, д-р мед. наук, профессор, травматолог-ортопед, заведующий ожоговым отделением, Краевая клиническая больница № 1 им. проф. С.В. Очаповского, Россия, 350086, Краснодар, ул. 1 Мая, 167, к. 1; профессор кафедры ортопедии, травматологии и военно-полевой хирургии, Кубанский государственный медицинский университет, Россия, 350063, Краснодар, ул. Митрофана Седина, 4, ORCID: 0000-0001-9573-4776, bogdanovsb@mail.ru.

Asker Alievich Afaunov, DMSc, Prof., trauma orthopedist, neurosurgeon, Head of the Department of Orthopedics, Traumatology and Field Surgery, Kuban State Medical University, 4 Mitrofan Sedina str., Krasnodar, 350063, Russia; neurosurgeon, Neurosurgery Department No. 3, Regional Clinical Hospital No. 1 n.a. S.V. Ochapovsky, 167, site 1 Pervogo Maya str., Krasnodar, 350901, Russia, eLibrary SPIN: 8039-9920, ORCID: 0000-0001-7976-860X, afaunovkr@mail.ru;

Igor Vadimovich Basankin, DMSc, trauma orthopedist, neurosurgeon, Head of Neurosurgery Department No. 3, Regional Clinical Hospital No. 1 n.a. S.V. Ochapovsky, 167, site 1 Pervogo Maya str., Krasnodar, 350901, Russia; assistant professor of the Department of surgery, Kuban State Medical University, 4 Mitrofan Sedina str., Krasnodar, 350063, Russia, eLibrary SPIN: 3541-8946, ORCID: 0000-0003-3549-0794, basankin@rambler.ru;

Abmat Bagaudinovich Bagaudinov, surgeon, Neurosurgery Department No. 3, Regional Clinical Hospital No. 1 n.a. S.V. Ochapovsky, 167, site 1 Pervogo Maya str., Krasnodar, 350901, Russia, ORCID: 0000-0003-0270-6800, Bagaudinovspine@gmail.com;

Sergey Gennadievich Mlyavykh, DMSc, trauma orthopedist, Head of the Spinal Surgery Service of the Ilyinskaya Hospital, 2 Rublevskoe suburb str., building 2, Moscow region, Krasnogorsk city district, Glukhovo village, 143421, Russia; Professor of the Department of Traumatology, Orthopedics and Neurosurgery n.a. M.V. Kolokoltsev, Privolzhsky Research Medical University, 10/1, Minina I Pozharskogo sq., Nizhny Novgorod, 603950, Russia, eLibrary SPIN: 9803-0387, ORCID: 0000-0002-6310-4961, s.mliavykh@ibospital.ru;

Abram Akopovich Gulzatyanyan, MD, PhD, neurosurgeon, Department of Neurosurgery No. 3, Regional Clinical Hospital No. 1 n.a. S.V. Ochapovsky, 167, site 1 Pervogo Maya str., Krasnodar, 350901, Russia, eLibrary SPIN: 6853-4861, ORCID: 0000-0003-1260-4007, Neuro8@mail.ru;

Sergey Borisovich Bogdanov, DMSc, Prof., trauma orthopedist, Head of the Burns Department, Regional Clinical Hospital No. 1 n.a. S.V. Ochapovsky, 167, site 1 Pervogo Maya str., Krasnodar, 350901, Russia; Professor of the Department of Orthopedics, Traumatology and Field Surgery, Kuban State Medical University, 4 Mitrofan Sedina str., Krasnodar, 350063, Russia, ORCID: 0000-0001-9573-4776, bogdanovsb@mail.ru.