



УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ М. ERECTOR SPINAE У ПАЦИЕНТОВ С ГРУДНЫМ СКОЛИОЗОМ ПОСЛЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ И РИГИДНОЙ ФИКСАЦИИ

М.С. Распопов, С.В. Колесов, В.В. Швеи, Н.А. Еськин, В.С. Переверзев, А.И. Казьмин, Е.Д. Богдасhevская, Н.С. Морозова, С.Б. Багиров, И.Е. Домрачев

Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова, Москва, Россия

Цель исследования. Оценить состояние и функциональные параметры *m. erector spinae* у пациентов после динамической вентральной и ригидной дорсальной фиксации грудного сколиоза с помощью УЗИ по собственной методике.

Материал и методы. В сравнительном исследовании участвовали 95 пациентов 15–55 лет с идиопатическим правосторонним грудным сколиозом (угол Cobb 35–60°): 33 из них после динамической фиксации, 32 — после ригидной фиксации, 30 — до операции (контрольная группа). Срок наблюдения превышал 12 мес. С использованием УЗИ в области вершины сколиотической дуги измеряли угол пинации волокон, толщину мышцы, индекс контрактильности и относительную асимметрию. Измерения проводили в двух положениях пациента: в покое и при максимальном разгибании (30°, контролируемым гониометром).

Результаты. Обнаружены статистически значимые различия ($p \leq 0,05$) между группами. В состоянии покоя угол пинации после динамической фиксации ($20,06^\circ \pm 0,15^\circ$) был на 26,5 % выше, чем после ригидной ($15,85^\circ \pm 0,62^\circ$), но ниже контрольных значений ($23,57^\circ \pm 0,93^\circ$). Толщина *m. erector spinae* при динамической фиксации ($1,23 \pm 0,01$ см) была близка к контролю ($1,35 \pm 0,02$ см), тогда как при ригидной фиксации наблюдалось выраженное уменьшение толщины ($0,89 \pm 0,01$ см). При разгибании (30°) угол пинации в группе пациентов, оперированных с помощью динамической системы, резко увеличивался до $39,5^\circ$ (близко к контролю $40,5^\circ$), что в 2,4 раза превышало показатель группы с ригидной фиксацией ($16,2^\circ$). Толщина *m. erector spinae* при нагрузке после динамической фиксации ($2,15 \pm 0,05$ см) соответствовала контролю ($2,20 \pm 0,03$ см), в то время как при ригидной фиксации отмечалось истончение ($1,21 \pm 0,14$ см). Средний индекс контрактильности после динамической фиксации ($60,59\% \pm 0,14\%$) был значительно ниже ($p < 0,05$), чем после ригидной ($84,65 \pm 0,35\%$), и близок к контрольному значению ($53,9\%$), что указывает на сохранение сократительной способности мышцы. Относительная асимметрия была минимальной в группе динамической фиксации (1,6 %) по сравнению с ригидной (2,24 %) и контролем (2,96 %).

Заключение. Использованная в исследовании ультразвуковая методика показала высокую эффективность в оценке состояния паравертебральных мышц. Вентральная динамическая фиксация грудного сколиоза продемонстрировала сохранение функциональной активности *m. erector spinae*, поддержание естественного сокращения и улучшение мышечной симметрии, тогда как дорсальная ригидная фиксация сопровождается структурными изменениями, включая снижение эластичности и дегенерацию мышечных волокон.

Ключевые слова: хирургия позвоночника; динамическая система; УЗИ-диагностика мышц.

Для цитирования: Распопов М.С., Колесов С.В., Швеи В.В., Еськин Н.А., Переверзев В.С., Казьмин А.И., Богдасhevская Е.Д., Морозова Н.С., Багиров С.Б., Домрачев И.Е. Ультразвуковое исследование *m. erector spinae* у пациентов с грудным сколиозом после динамической и ригидной фиксации // Хирургия позвоночника. 2025. Т. 22, № 3. С. 37–46. DOI: <http://dx.doi.org/10.14531/ss2025.3.37-46>

ULTRASOUND EXAMINATION OF M. ERECTOR SPINAE IN PATIENTS WITH THORACIC SCOLIOSIS AFTER DYNAMIC AND RIGID FIXATION

M.S. Raspopov, S.V. Kolesov, V.V. Shvets, N.A. Eskin, V.S. Pereverzev, A.I. Kazmin, E.D. Bogdashevskaya, N.S. Morozova, S.B. Bagirov, I.E. Domrachev

National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics n.a. N.N. Priorov, Moscow, Russia

Objective. To assess the condition and functional parameters of *m. erector spinae* in patients who underwent dynamic anterior and rigid posterior fixation for thoracic scoliosis, using ultrasound diagnostics (US) and a proprietary methodology.

Materials and Methods. The comparative study involved 95 patients aged 15–55 years with idiopathic right-sided thoracic scoliosis (Cobb angle 35–60°): 33 of them after dynamic fixation, 32 after rigid fixation, and 30 patients awaiting surgery (control group). The follow-up period exceeded 12 months. Ultrasound examination included measuring of the fiber pennation angle, muscle thickness, contractility index, and relative asymmetry at the apex of the scoliotic curve. Measurements were performed in two patient positions: at rest and during maximum extension (30°, controlled by a goniometer).

Results. Statistically significant differences ($p \leq 0.05$) between the groups were found. At rest, the pennation angle after dynamic fixation ($20.06^\circ \pm 0.15^\circ$) was 26.5% higher than after rigid fixation ($15.85^\circ \pm 0.62^\circ$), but lower than control values ($23.57^\circ \pm 0.93^\circ$). The thickness of *m. erector spinae* with dynamic fixation (1.23 cm \pm 0.01 cm) was close to the control (1.35 cm \pm 0.02 cm), whereas with rigid fixation

a pronounced decrease in thickness was observed ($0.89 \text{ cm} \pm 0.01 \text{ cm}$). During extension (30°), the pennation angle in patients operated on with the dynamic system sharply increased to 39.5° (close to the control value of 40.5°), which was 2.4 times higher than the indicator (16.2°) in the group with rigid fixation. The thickness of *m. erector spinae* ($2.15 \text{ cm} \pm 0.05 \text{ cm}$) under load after dynamic fixation corresponded to the control ($2.20 \text{ cm} \pm 0.03 \text{ cm}$), while rigid fixation showed thinning ($1.21 \text{ cm} \pm 0.14 \text{ cm}$). The mean contractility index after dynamic fixation was significantly lower ($p < 0.05$) than that ($84.65\% \pm 0.35\%$) after rigid fixation and close to the control value (53.9%), indicating preservation of muscle contractility. Relative asymmetry was minimal in the dynamic fixation group (1.6%) compared to that in the rigid fixation (2.24%) and control (2.96%) groups.

Conclusion. The ultrasound technique used in the study demonstrated high efficiency in assessing the condition of the paraspinal muscles. Anterior dynamic fixation for thoracic scoliosis provided the preservation of *m. erector spinae* functional activity, the maintenance of natural contraction and improved muscle symmetry, whereas posterior rigid fixation was accompanied by structural changes, including reduced elasticity and degeneration of muscle fibers.

Keywords: spine surgery; dynamic stabilization system; ultrasound diagnostics of muscles.

Please cite this paper as: Raspopov MS, Kolesov SV, Shvets VV, Eskin NA, Pereverzev VS, Kazmin AI, Bogdashevskaya ED, Morozova NS, Bagirov SB, Domrachev IE. Ultrasound examination of *m. erector spinae* in patients with thoracic scoliosis after dynamic and rigid fixation. Russian Journal of Spine Surgery (Khirurgiya Pozvonochnika). 2025;22(3):37–46. In Russian. DOI: <http://dx.doi.org/10.14531/ss2025.3.37-46>

Сколиоз – это трехмерная деформация позвоночника, которая затрагивает всю его структуру, влияя на биомеханику окружающих мышц [1].

Известно, что по мере развития сколиоза происходят изменения в тонусе и распределении нагрузок на мышцы спины, что может приводить к боли и дисфункции. С прогрессированием деформации идет перестройка *m. erector spinae*, динамические коэффициенты которой являются одним из ключевых предикторов сколиотической деформации и стабильности позвоночника [2, 3]. Исследования показали, что состояние и работа параспинальных мышц оказывают прямое влияние на сагиттальный баланс [4], поэтому роль мышечного фактора вызывает большой интерес и активно обсуждается [5].

На сегодняшний день золотым стандартом хирургического лечения идиопатического грудного сколиоза является коррекция деформации с помощью ригидных металлоконструкций из дорсального доступа [6, 7]. Но с недавнего времени для коррекции сколиоза стали применять вентральную динамическую систему, основным преимуществом которой является сохранение подвижности в зоне фиксации при удовлетворительной коррекции деформации [8]. Кроме того, осуществляют переднебоковой доступ к позвоночнику, поэтому сохранение паравертебральной мускулатуры приводит к более раннему вос-

становлению пациентов по сравнению с ригидной фиксацией [9, 10].

Имеются единичные работы, исследующие характеристику мышц у пациентов со сколиотической деформацией после хирургического лечения с использованием различных методов оценки [11–13].

Например, электромиография в ряде исследований показывает снижение мышечного тонуса у пациентов со сколиотической деформацией после ригидной фиксации, снижение мышечного тонуса связано с атрофией на уровне оперированных сегментов [11, 14], что может быть определено прямым визуальным УЗ-мониторингом, который для изучения мускулатуры спины позволяет оценить размеры, структуру, расположение мышечных пучков [15] без инвазивных методов [16, 17]. Публикаций по поводу применения УЗИ и характеристики угла пинации после операций на позвоночнике с использованием динамической фиксации мы не нашли. В данной статье исследуется влияние двух типов систем (динамической и ригидной) на глубокие мышцы спины, в частности *m. erector spinae*, с помощью ультразвуковой диагностики по собственной методике.

Цель исследования – оценка *m. erector spinae* у пациентов после селективной динамической и ригидной фиксации грудного сколиоза методом ультразвуковой диагностики.

Материал и методы

Данное исследование выполнено в формате сравнительного когортного анализа с ретроспективно-проспективным дизайном. В него включены пациенты от 15 до 55 лет, проходившие оперативное лечение грудного сколиоза с помощью вентральной динамической и дорсальной ригидных систем в 2018–2023 гг.

Критерии включения в исследование: идиопатический грудной сколиоз, угол Cobb – от 35° до 60° до операции, завершённый рост, хирургическое лечение, селективная фиксация грудного отдела позвоночника, срок наблюдения более 12 мес. Критерии исключения: неврологические заболевания, предвещающие операции на позвоночнике, системные патологии.

Согласно методу хирургической фиксации пациентов разделили на 3 группы (табл. 1). Первая группа – 33 пациента, которые прооперированы с использованием вентральной динамической системы коррекции (рис. 1); вторая группа – 32 пациента, прооперированные с применением ригидной транспедикулярной фиксации из дорсального доступа (рис. 2), третья (контрольная) группа – 30 пациентов до хирургического вмешательства.

Всем пациентам ультразвуковое исследование паравертебральных мышц на аппарате Canon Aplio700 выполнял

Таблица 1

Демографические и клинические характеристики пациентов исследуемых групп

Группа	Возраст, лет (среднее ± стандартное отклонение)	Пол (М/Ж), n	Уровни фиксации (наиболее частые)	Период наблюдения, мес. (среднее ± стандартное отклонение)
1 (n = 33)	19,8 ± 4,7	10/23	Th ₅ –Th ₁₂ (n = 22); Th ₆ –L ₁ (n = 11)	14,2 ± 3,5
2 (n = 32)	20,1 ± 5,0	12/20	Th ₃ –L ₁ (n = 18); Th ₅ –Th ₁₂ (n = 14)	16,8 ± 4,2
Контрольная (n = 30)	21,5 ± 5,2	8/22	–	–



Рис. 1

Рентгенограммы до (а, в) и после (б, г) хирургического лечения с применением вентральной динамической системы с фиксацией на уровне Th₆–L₁



Рис. 2

Рентгенограммы до (а, в) и после (б, г) хирургического лечения с применением дорсальной ригидной системы с фиксацией на уровне Th₃–L₁

ки [2]. Исследование проводили в двух позициях: расслабленное положение лежа для оценки базового состояния *m. erector spinae* и максимальная экстензия для анализа функции мышцы при нагрузке. Для стандартизации измерения угла экстензии поясничного отдела фиксировали гониометром, целевой диапазон которого составлял 25–35°, что соответствует физиологическим возможностям и позволяет избежать компенсаторных движений [18]. Гониометр размещали между подвздошным гребнем (неподвижная планка) и подмышечной линией (подвижная планка) для обеспечения контроля наклона туловища (рис. 3).

Методика визуализации. Для диагностики использовали линейный ультразвуковой датчик с частотой 7,5–10,0 МГц. Сонограф устанавливали под углом 30–45° и смещали латерально на 2 см от остистых отростков в области вершины сколиотической дуги, что обеспечивало четкую визуализацию *m. erector spinae*. Выполняли по два снимка в области вершины деформации при разных функциональных положениях, что позволило провести сравнительный анализ состояния мышц.

Угол пинации (ϑ) волокон мышц определяли как угол, создаваемый линией между направлением мышечных волокон и линией апоневроза [19]. Индекс контрактильности рассчитывали как отношение толщины при нагрузке к толщине в покое × 100, асимметрию – по формуле: |(левая сторона – правая сторона)| / среднее значение × 100.

Толщина мышцы по ультразвуковому исследованию определяется

один исследователь со стажем работы более 15 лет.

Техника ультразвукового исследования. Подготовка пациента к исследованию заключалась в занятии им комфортного положения лежа

на животе для расслабления мышц спины, что важно для достижения качественного и информативного изображения *m. erector spinae* – наиболее мощной и длинной мышцы спины, выбранной для количественной оцен-

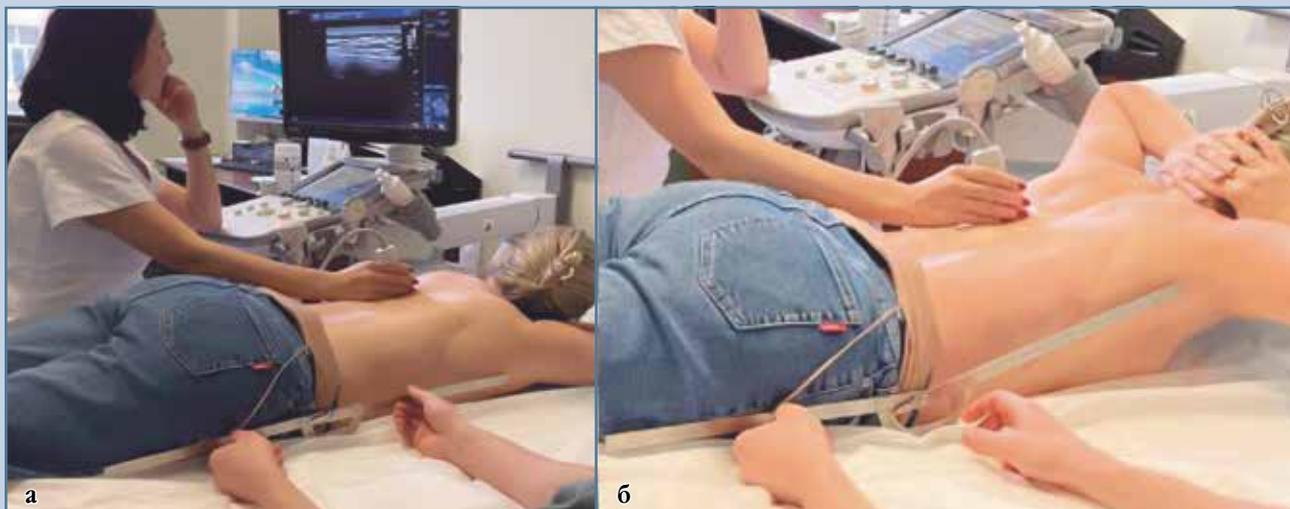


Рис. 3
 Методология ультразвукового исследования структуры разгибателей спины в расслабленном (а) и напряженном (б) положении с использованием гониометра

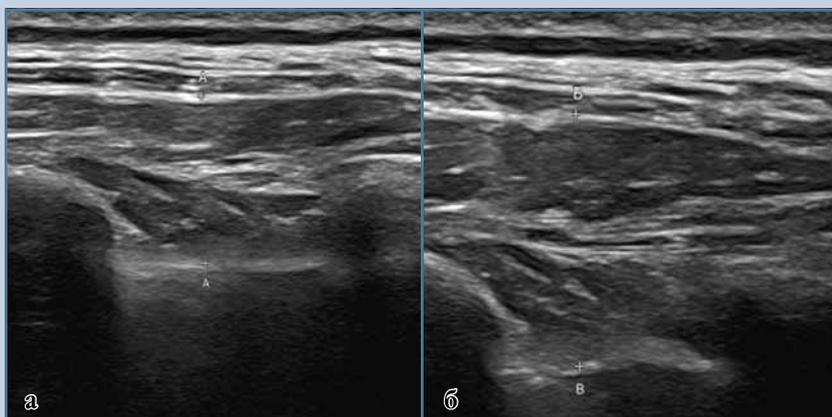


Рис. 4
 Сонограмма *m. erector spinae*: а – расслабленное положение; б – максимальная экстензия

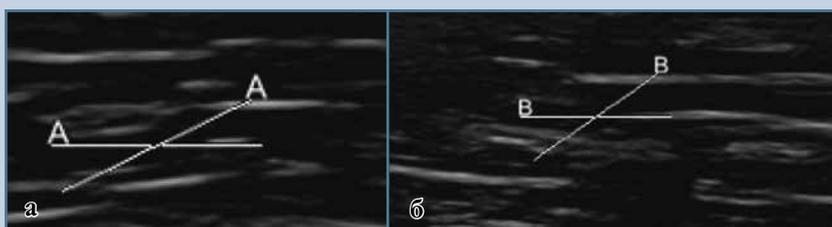


Рис. 5
 Угол пинации волокон *m. erector spinae* в условиях покоя (а – пассивное состояние) и при максимальной экстензии (б – активное состояние)

как расстояние между поверхностной и глубокой фасциями мышцы, измеренное перпендикулярно к ее длине [15, 20] (рис. 4).

Толщина \varnothing волокон *m. erector spinae* была измерена в условиях покоя (пассивное состояние) и при максимальной экстензии (активное состояние). В каждой позиции были получены ультразвуковые изображения структуры исследуемых мышц (рис. 5).

Статистический анализ. Ультразвуковые изображения сохраняли на жестком диске ультразвуковой системы, полученные результаты анализировали с помощью программного обеспечения Statistica 6.1.2. При анализе данных рассчитывали среднее значение и стандартное отклонение ($M \pm SD$). Для сравнения групп применяли непараметрические критерии Манна – Уитни и Краскела – Уолиса. Различия считали статистически значимыми при уровне $p < 0,05$.

Результаты

Исследование выявило статистически значимые различия ($p < 0,05$) в функциональных параметрах *m. erector*

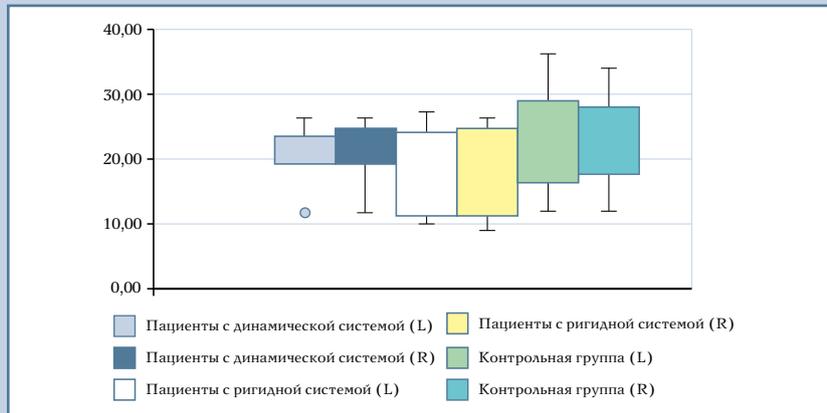


Рис. 6

Угол пинации в покое по группам: L – левая сторона; R – правая сторона

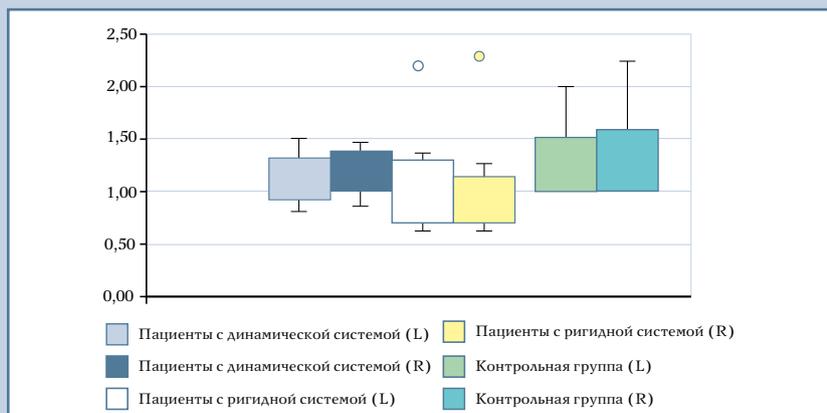


Рис. 7

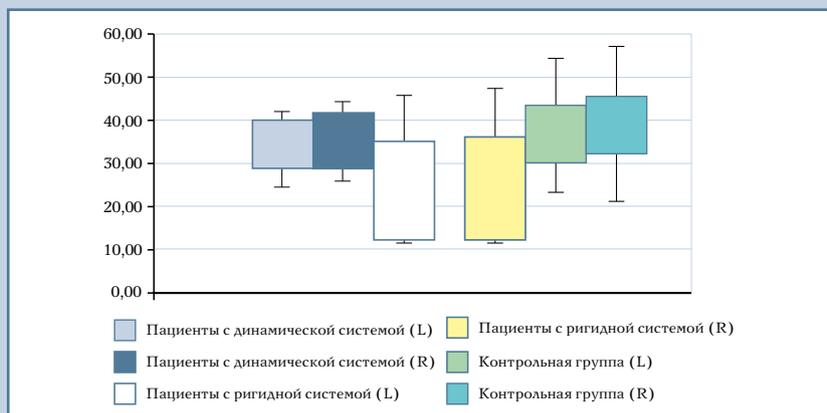
Толщина *m. erector spinae* в покое по группам: L – левая сторона; R – правая сторона

Рис. 8

Угол пинации при напряжении по группам: L – левая сторона; R – правая сторона

spinae между группами после хирургической коррекции грудного сколиоза. В состоянии покоя θ в группе динамической фиксации ($20,06 \pm 0,15^\circ$; L: $19,91^\circ$ /R: $20,21^\circ$) на 26,5 % превышал показатели ригидной группы ($15,85 \pm 0,62^\circ$; L: $15,25^\circ$ /R: $6,48^\circ$), хотя оставался ниже контрольных значений ($23,57 \pm 0,93^\circ$; L: $2,64^\circ$ /R: $24,5^\circ$), что визуализировано на рис. 6. Аналогично, толщина мышц в покое при динамическом методе ($1,23 \pm 0,01$ см; L: $1,24$ /R: $1,22$) демонстрировала близость к контрольной группе ($1,35 \pm 0,02$ см), в отличие от выраженного снижения при ригидной фиксации ($0,89 \pm 0,01$ см; L: $0,90$ /R: $0,88$), что отражено на рис. 7. При функциональной нагрузке (экстензия 30°) динамическая система обеспечила резкий прирост до $39,5^\circ$ (L: 38° /R: 41°), что в 2,4 раза превышало ригидную группу ($16,2^\circ$; L: $16,2^\circ$ /R: $16,25^\circ$) и соответствовало физиологической норме (контроль: $40,5^\circ$; L: 39° /R: 42°), как показано на рис. 8. Толщина *m. erector spinae* при нагрузке в динамической группе ($2,15 \pm 0,05$ см; L: $2,10$ /R: $2,20$) практически не отличалась от контроля ($2,20 \pm 0,03$ см), тогда как ригидная фиксация сопровождалась критическим истончением мышц ($1,21 \pm 0,14$ см; L: $1,35$ /R: $1,08$), что иллюстрирует рис. 9. Индекс контрактильности подтвердил сохранение сокращения при динамической методике ($60,59 \pm 0,14$; L: $60,73$ %/R: $60,45$ %) в сравнении с его резким снижением при ригидной фиксации ($84,65 \pm 0,35$; L: $85,0$ %/R: $84,3$ %) и близостью к контрольным значениям (53,9 %), что представлено на рис. 10. Минимальная относительная асимметрия в динамической группе (1,6 % против 2,24 % в ригидной и 2,96 % в контроле) свидетельствует о восстановлении симметрии. Все количественные данные, включая прирост угла при нагрузке ($+19,44^\circ$ при динамике vs $+0,4^\circ$ при ригидной фиксации), систематизированы в табл. 2, где также отражены межгрупповые различия толщины, индекса контрактильности и стандартных отклонений, подтверждающие преимущество динамической систе-

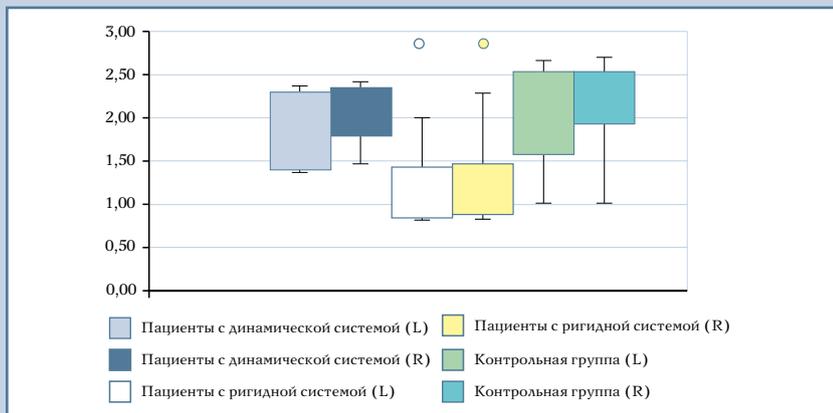


Рис. 9

Толщина *m. erector spinae* при напряжении по группам: L – левая сторона; R – правая сторона

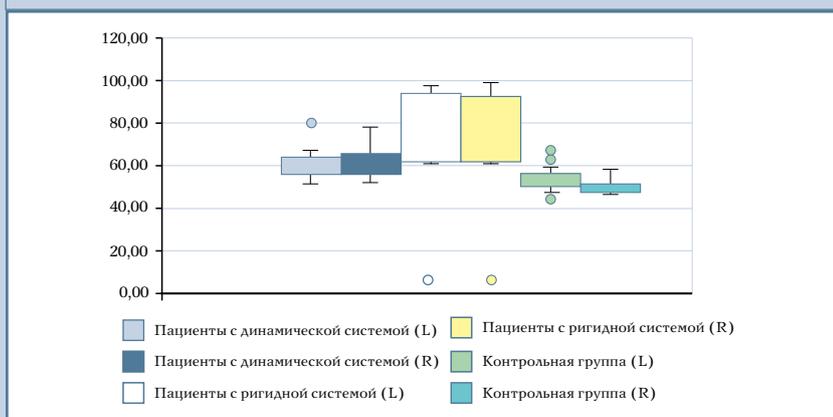


Рис. 10

Индекс контрактильности по группам: L – левая сторона; R – правая сторона

мы в сохранении функциональности паравертебральной мускулатуры.

Обсуждение

Первое описание θ (угла между мышечными волокнами и апоневрозом) в контексте физиологии мышц связано с работой Nicolaus Steno. В трактате «Elementorum Mythologiae Specimen» (1667) он использовал геометрические модели мышц и описал изменение углов между волокнами при сокращении, отметив «*dum contrahitur musculus, anguli eius acuti fiunt ampliores*», что означает «при сокращении мышцы ее углы увеличи-

ваются». Именно Steno впервые обратил внимание на связь архитектуры мышечных волокон с их функцией [21]. Позже, в XIX в., Ernst H. Weber (1846) формализовал математические отношения между мышечными размерами и силой, а Haxton (1944) разработал метод расчета физиологической поперечной площади сечения (PCSA), учитывающий данный угол, что связывал с механическими свойствами мышц [22]. В современных исследованиях с использованием ультразвуковой диагностики *in vivo* у шести испытуемых выявлено, что θ трехглавой мышцы голени увеличивается при переходе от дорсифлексии (-15°) к планта-

флексии ($+30^\circ$): на $6-12^\circ$ (39–67 %) в покое и на $9-16^\circ$ (29–43 %) при максимальном изометрическом сокращении [23]. В исследовании Franchi et al. [24] 10-недельные концентрические (CON) и эксцентрические (ECC) тренировки вызвали различные изменения θ в мышцах: CON увеличил на 30 % за счет укорочения волокон и добавления саркомеров параллельно, тогда как ECC привел к незначительному росту PA (+5 %) при удлинении волокна на 12 %, что связано с механическими стимулами и активацией системы митогенактивируемых протеинкиназ и подтверждает роль пинационного угла в отображении характеристики мышц при нагрузке. Sinha et al. [25] демонстрируют возможность *in vivo* с помощью диффузионно-тензорной визуализации (DTI) икроножных мышц человека для отслеживания ориентации мышечных волокон. С использованием EPI-последовательности на МРТ у пяти испытуемых измерены углы ориентации волокон относительно оси магнита (SI-ось), отражающие архитектуру мышц. Углы варьировали от $13,4^\circ$ (латеральная головка икроножной мышцы) до $48,5^\circ$ (медиальная головка камбаловидной мышцы), что согласуется с данными спектроскопии и ультразвуковых исследований. Роль паравертебральных мышц в патогенезе идиопатического сколиоза, их связь с болевым синдромом и функциональными ограничениями из-за дисбаланса развития мышц и фасций активно исследуется [26–29]. Pan et al. [16] при ультразвуковой диагностике выявили снижение эластичности и асимметрии паравертебральных мышц после хирургического лечения у пациентов с разными типами сколиоза. Lu et al. [14], анализируя электромиографическую активность параспинальных мышц у 19 пациентов с идиопатическим сколиозом до и после селективной стабилизации грудного отдела позвоночника, которую регистрировали билатерально по грудным и поясничным параспинальным мышцам в различных позах, отметили снижение асимметрии и актив-

Таблица 2

Сравнение ультразвуковых параметров *m. erector spinae* в группах пациентов

Параметр	Динамическая фиксация (n = 33)	Ригидная фиксация (n = 32)	Контрольная группа (n = 30)	p-значение*
Угол пинации в покое, град.	20,06 (19,91L*/20,20R*)	15,85 (15,25L/16,48R)	23,57 (22,64L/24,5R)	0,009
Угол пинации при разгибании 30°, град.	39,5 (38L/41R)	16,2 (16,2L/16,25R)	40,5 (39L/42R)	0,001
Увеличение угла пинации при разгибании 30°, град.	+19,44	+0,40	+19,50	0,001
Толщина в покое, см	1,23°	0,89	1,35	0,05
Толщина при нагрузке, см	2,15	1,21	2,20	0,001
Индекс контрактности (левая сторона)	60,73	85,00	55,17	0,001
Индекс контрактности (правая сторона)	60,45	84,30	52,63	0,001
Средний индекс контрактности, %	60,59	84,65	53,90	0,001
Относительная асимметрия, %	1,60	2,24	2,96	0,001

* Показатель статистической значимости по критерию Краскела – Уоллиса; L – левая сторона; R – правая сторона.

ности, что, вероятно, связано с атрофией. В долгосрочном исследовании Kim et al. [30] с участием 42 пациентов со сколиотической деформацией, перенесших заднюю фиксацию позвоночника, проанализировали данные КТ за 9,9 года. Выявлено, что площадь поперечного сечения большинства паравертебральных мышц значительно уменьшилась за период наблюдения. Исключение составила поясничная мышца, которая, напротив, демонстрировала тенденцию к симметричному развитию. Такие различия обусловлены хирургической техникой: при заднем доступе происходит повреждение мышц-выпрямителей позвоночника и многораздельных мышц, тогда как глубоко расположенная поясничная мышца практически не затрагивается. Более того, со временем она берет на себя компенсаторную нагрузку, обеспечивая вертикальное положение тела, что и объясняет

ее выраженный рост [31]. В настоящем исследовании мы применили парасагиттальное УЗИ для оценки влияния ригидной и динамической фиксации на морфофункциональные параметры мышцы-выпрямителя позвоночника, *m. erector spinae*: θ (индикатор функциональной активности), индекс контрактности и толщину мышцы (маркер гипер-/атрофии) [12, 32]. Данный подход позволил детально изучить воздействие методов коррекции на ключевую мышцу, обеспечивающую вертикальную стабильность, что важно для оптимизации лечения идиопатического сколиоза.

Заключение

Примененная ультразвуковая методика продемонстрировала высокую эффективность в оценке состояния паравертебральных мышц, обеспечивая объективное сравнение резуль-

татов ригидной дорсальной и динамической вентральной фиксации при коррекции грудного сколиоза. Вентральная динамическая фиксация грудного сколиоза предпочтительна для сохранения функциональной активности *m. erector spinae*, поддержания естественной биомеханики и улучшения мышечной симметрии, тогда как дорсальная ригидная фиксация сопровождается структурными изменениями, включая снижение эластичности и дегенерацию мышечных волокон.

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. Yaman O, Dalbayrak S. Idiopathic scoliosis. *Turk Neurosurg.* 2014;24:646–657. DOI: 10.5137/1019-5149.JTN.8838-13.0
2. Stokes IA. Mechanical effects on skeletal growth. *J Musculoskelet Neuronal Interact.* 2002;2:277–280.
3. Yagi M, Machida M, Asazuma T. Pathogenesis of adolescent idiopathic scoliosis. *JBS Rev.* 2014;2:e4. DOI: 10.2106/JBS.REV.M.00037

4. **Yagi M, Hosogane N, Watanabe K, Asazuma T, Matsumoto M.** The paravertebral muscle and psoas for the maintenance of global spinal alignment in patient with degenerative lumbar scoliosis. *Spine J.* 2016;14:451–458. DOI: 10.1016/j.spinee.2015.07.001
5. **Diab AA.** The role of forward head correction in management of adolescent idiopathic scoliotic patients: a randomized controlled trial. *Clin Rehabil.* 2012;26:1123–1132. DOI: 10.1177/0269215512447085
6. **Lenke IG, Betz RR, Clements D, Merola A, Haheer T, Lowe T, Newton P, Bridwell KH, Blanke K.** Curve prevalence of a new classification of operative adolescent idiopathic scoliosis: does classification correlate with treatment? *Spine (Phila. Pa. 1976).* 2002;27:604–611. DOI: 10.1097/00007632-200203150-00008
7. **Newton PO, Bartley CE, Bastrom TP, Kluck DG, Saito W, Yaszay B.** Anterior spinal growth modulation in skeletally immature patients with idiopathic scoliosis: a comparison with posterior spinal fusion at 2 to 5 years postoperatively. *J Bone Joint Surg Am.* 2020;102:769–777. DOI: 10.2106/JBJS.19.01176
8. **Pehlivanoglu T, Oltulu I, Erdag Y, Akturk UD, Korkmaz E, Yildirim E, Sarioglu E, Ofluoglu E, Aydogan M.** Comparison of clinical and functional outcomes of vertebral body tethering to posterior spinal fusion in patients with adolescent idiopathic scoliosis and evaluation of quality of life: preliminary results. *Spine Deform.* 2021;9:1175–1182. DOI: 10.1007/s43390-021-00323-5
9. **Колесов С.В., Переверзев В.С., Пантелеев А.А., Швеи В.В., Горбатьюк Д.С.** Первый опыт вентральной динамической коррекции сколиозов у подростков с законченным ростом и взрослых: хирургическая техника и ближайшие результаты. *Хирургия позвоночника.* 2021;18(3):19–29. [Kolesov SV, Pereverzev VS, Panteleyev AA, Shvets VV, Gorbatyuk DS. The first experience of anterior dynamic correction of scoliosis in adolescents with complete growth and adults: Surgical technique and immediate results. *Russian Journal of Spine Surgery (Khirurgiya Pozvonochnika).* 2021;18(3):19–29]. DOI: 10.14531/ss2021.3.19-29 EDN: DBPVYY
10. **Переверзев В.С., Колесов С.В., Казьмин А.И., Морозова Н.С., Швеи В.В.** Вентральная динамическая или дорсальная транспедикулярная коррекция и фиксация при хирургическом лечении идиопатического сколиоза типа Lenke 5: сравнение отдаленных результатов. *Травматология и ортопедия России.* 2023;29(2):18–28. [Pereverzev VS, Kolesov SV, Kazmin AI, Morozova NS, Shvets VV. Anterior dynamic versus posterior transpedicular spinal fusion for Lenke type 5 idiopathic scoliosis: a comparison of long-term results. *Traumatology and Orthopedics of Russia.* 2023;30(2):18–28]. DOI: 0.17816/2311-2905-3189 EDN: DSCCDA
11. **Tsai YT, Leong CP, Huang YC, Kuo SH, Wang HC, Yeh HC, Lau YC.** The electromyographic responses of paraspinal muscles during isokinetic exercise in adolescents with idiopathic scoliosis with a Cobb's angle less than fifty degrees. *Chang Gung Med J.* 2010;33:540–550.
12. **Stokes M, Hides J, Elliott J, Kiesel K, Hodges P.** Rehabilitative ultrasound imaging of the posterior paraspinal muscles. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2007;37:581–595. DOI: 10.2519/jospt.2007.2599
13. **Wong C, Shayestehpour H, Koutras C, Dahl B, Otaduy MA, Rasmussen J, Bencke J.** Using electric stimulation of the spinal muscles and electromyography during motor tasks for evaluation of the role in development and progression of adolescent idiopathic scoliosis. *J Clin Med.* 2024;13:1758. DOI: 10.3390/jcm13061758
14. **Lu WW, Hu Y, Luk KD, Cheung KM, Leong JC.** Paraspinal muscle activities of patients with scoliosis after spine fusion: an electromyographic study. *Spine (Phila. Pa. 1976).* 2002;27:1180–1185. DOI: 10.1097/00007632-200206010-00009
15. **Smith JM, Jones SP, White LD.** Rapid Communication. *Gastroenterology.* 1977;72:193. DOI: 10.1016/S0016-5085(77)80340-5
16. **Pan A, Cao W, Wu B, Yin L, Ding H, Guo R, Liu Y, Hai Y, Zhou L.** Elasticity change of the paravertebral fascia and muscle in adolescent idiopathic scoliosis after posterior selective fusion surgery. *Clin Biomech (Bristol).* 2022;99:105763. DOI: 10.1016/j.clinbiomech.2022.105763
17. **Peterson G, Leary SO, Nilsson D, Moodie K, Tucker K, Trygg J, Peolsson A.** Ultrasound imaging of dorsal neck muscles with speckle tracking analyses – the relationship between muscle deformation and force. *Sci Rep.* 2019;9:13688. DOI: 10.1038/s41598-019-49916-1
18. **Chertman C, Campoy Dos Santos HM, Pires L, Wajchenberg M, Martins DE, Puertas EB.** A comparative study of lumbar range of movement in healthy athletes and non-athletes. *Rev Bras Ortop.* 2010;45:389–394. DOI: 10.1016/S2255-4971(15)30385-2
19. **Narici M V, Binzoni T, Hiltbrand E, Fasel J, Terrier F, Cerretelli P.** *In vivo* human gastrocnemius architecture with changing joint angle at rest and during graded isometric contraction. *J Physiol.* 1996;496:287–297. DOI: 10.1113/jphysiol.1996.sp021685
20. **Kawakami Y, Ichinose Y, Fukunaga T.** Architectural and functional features of human triceps surae muscles during contraction. *J Appl Physiol (1985).* 1998;85:398–404. DOI: 10.1152/jappl.1998.85.2.398
21. **Narici M, Franchi M, Maganaris C.** Muscle structural assembly and functional consequences. *J Exp Biol.* 2016;219:276–284. DOI: 10.1242/jeb.128017
22. **Haxton H.A.** Absolute muscle force in the ankle flexors of man. *J Physiol.* 1944;103:267–273. DOI: 10.1113/jphysiol.1944.sp004075
23. **Maganaris CN, Baltzopoulos V, Sargeant AJ.** *In vivo* measurements of the triceps surae complex architecture in man: implications for muscle function. *J Physiol.* 1998;512:603–614. DOI: 10.1111/j.1469-7793.1998.603be.x
24. **Franchi MV, Atherton PJ, Reeves ND, Flck M, Williams J, Mitchell WK, Selby A, Beltran Valls RM, Narici MV.** Architectural, functional and molecular responses to concentric and eccentric loading in human skeletal muscle. *Acta Physiol (Oxf).* 2014;210:642–654. DOI: 10.1111/apha.12225
25. **Sinha S, Sinha U, Edgerton VR.** *In vivo* diffusion tensor imaging of the human calf muscle. *J Magn Reson Imaging.* 2006;24:182–190. DOI: 10.1002/jmri.20593
26. **Burwell RG, Dangerfield PH.** Pathogenesis of progressive adolescent idiopathic scoliosis. Platelet activation and vascular biology in immature vertebrae: an alternative molecular hypothesis. *Acta Orthop Belg.* 2006;72:247–260.
27. **Whyte Ferguson L.** Adolescent idiopathic scoliosis: The Tethered Spine III: Is fascial spiral the key? *J Bodyw Mov Ther.* 2017;21:948–971. DOI: 10.1016/j.jbmt.2017.01.013
28. **Lpez-Torres O, Mon-Lpez D, Gomis-Marz C, Lorenzo J, Guadalupe-Grau A.** Effects of myofascial release or self-myofascial release and control position exercises on lower back pain in idiopathic scoliosis: A systematic review. *J Bodyw Mov Ther.* 2021;27:16–25. DOI: 10.1016/j.jbmt.2021.02.017
29. **Rigo M.** Patient evaluation in idiopathic scoliosis: Radiographic assessment, trunk deformity and back asymmetry. *Physiother Theory Pract.* 2011;27:7–25. DOI: 10.3109/09593985.2010.503990
30. **Kim HJ, Yang JH, Chang DG, Suk SI, Suh SW, Nam Y, Kim SI, Song KS.** Long term influence of paraspinal muscle quantity in adolescent idiopathic scoliosis following deformity correction by posterior approach. *J Clin Med.* 2021;10:4790. DOI: 10.3390/jcm10204790
31. **Watanabe K, Ohashi M, Hirano T, Katsumi K, Shoji H, Mizouchi T, Endo N, Hasegawa K.** The influence of lumbar muscle volume on curve progression after skeletal maturity in patients with adolescent idiopathic scoliosis: a long-term follow-up study. *Spine Deform.* 2018;6:691–698.e1. DOI: 10.1016/j.jspsd.2018.04.003
32. **Hebert JJ, Kopenhagen SL, Parent EC, Fritz JM.** A systematic review of the reliability of rehabilitative ultrasound imaging for the quantitative assessment of the abdominal and lumbar trunk muscles. *Spine (Phila. Pa. 1976).* 2009;34:E848–E856. DOI: 10.1097/BRS.0b013e3181ae625c

Адрес для переписки:

Распопов Михаил Сергеевич
НМИЦ травматологии и ортопедии
им. Н.Н. Приорова,
127299, Россия, Москва, ул. Приорова, 10,
mihail.raspopov74@mail.ru

Статья поступила в редакцию 10.06.2025

Рецензирование пройдено 19.08.2025

Подписано в печать 27.08.2025

Address correspondence to:

Raspopov Mikhail Sergeevich
National Medical Research Center
of Traumatology and Orthopedics n.a. N.N. Priorov,
10 Priorova str., Moscow, 127299, Russia,
mihail.raspopov74@mail.ru

Received 10.06.2025

Review completed 19.08.2025

Passed for printing 27.08.2025

Михаил Сергеевич Распопов, врач-травматолог-ортопед, аспирант, Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова, Россия, 127299, Москва, ул. Приорова, 10, eLibrary SPIN: 1843-2864, ORCID: 0009-0005-9517-7347, mihail.raspopov74@mail.ru;
Сергей Васильевич Колесов, д-р мед. наук, врач-травматолог-ортопед, заведующий отделением патологии позвоночника, Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова, Россия, 127299, Москва, ул. Приорова, 10, eLibrary SPIN: 1989-6994, ORCID: 0000-0001-9657-8584, dr-kolesov@yandex.ru;

Владимир Викторович Швеиц, д-р мед. наук, ведущий научный сотрудник отделения патологии позвоночника, Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова, Россия, 127299, Москва, ул. Приорова, 10, ORCID: 0000-0001-8884-2410, vshvetcv@yandex.ru;

Николай Александрович Еськин, д-р мед. наук, врач-травматолог-ортопед, заведующий отделением функциональной диагностики, Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова, Россия, 127299, Москва, ул. Приорова, 10, eLibrary SPIN: 1215-9279, ORCID: 0000-0003-4738-7348, cito-uchsovet@mail.ru;

Владимир Сергеевич Переверзев, канд. мед. наук, врач отделения патологии позвоночника, Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова, Россия, 127299, Москва, ул. Приорова, 10, eLibrary SPIN: 8164-1389, ORCID: 0000-0002-6895-8288, vcpereverz@gmail.com;

Аркадий Иванович Казьмин, канд. мед. наук, врач-травматолог-ортопед отделения патологии позвоночника, Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова, Россия, 127299, Москва, ул. Приорова, 10, eLibrary SPIN: 4944-4173, ORCID: 0000-0003-2330-0172, KazminAI@cito-priorov.ru;

Екатерина Дмитриевна Богдасhevская, врач ультразвуковой диагностики, Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова, Россия, 127299, Москва, ул. Приорова, 10, ORCID: 0009-0005-8217-0808, bogdashevskaya83@mail.ru;

Наталья Сергеевна Морозова, канд. мед. наук, врач отделения патологии позвоночника, Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова, Россия, 127299, Москва, ул. Приорова, 10, eLibrary SPIN: 4593-3231, ORCID: 0000-0003-4504-6902, morozcito@gmail.com;

Самир Бекюшиши оглы Багиров, врач-травматолог-ортопед отделения патологии позвоночника, Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова, Россия, 127299, Москва, ул. Приорова, 10, eLibrary SPIN: 9620-7038, ORCID: 0000-0003-1038-1815, bagirov.samir22@gmail.com;

Иван Евгеньевич Домрачев, врач-травматолог-ортопед, аспирант, Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова, Россия, 127299, Москва, ул. Приорова, 10, eLibrary SPIN: 1367-3096, ORCID: 0009-0005-9014-3068, VaniaD97@yandex.ru.

Mikhail Sergeevich Raspopov, MD, orthopedic surgeon, Spine Pathology Department, National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics n.a. N.N. Priorov, 10 Priorova str., Moscow, 127299, Russia, eLibrary SPIN: 1843-2864, ORCID: 0009-0005-9517-7347, mihail.raspopov74@mail.ru;

Sergey Vasilyevich Kolesov, DMSc, Prof., traumatologist-orthopedist, head of the Spine Pathology Department, National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics n.a. N.N. Priorov, 10 Priorova str., Moscow, 127299, Russia, eLibrary SPIN: 1989-6994, ORCID: 0000-0001-9657-8584, dr-kolesov@yandex.ru;

Vladimir Viktorovich Shvetz, DMSc, orthopedic surgeon, leading researcher at the Spine Pathology Department, National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics n.a. N.N. Priorov, 10 Priorova str., Moscow, 127299, Russia, ORCID: 0000-0001-8884-2410, vshvetcv@yandex.ru;

Nikolay Aleksandrovich Eskin, DMSc, traumatologist-orthopedist, head of the Functional Diagnostics Department, National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics n.a. N.N. Priorov, 10 Priorova str., Moscow, 127299, Russia, eLibrary SPIN: 1215-9279, ORCID: 0000-0003-4738-7348, cito-uchsovet@mail.ru;

Vladimir Sergeevich Pereverzev, MD, PhD, orthopedic surgeon, Spine Pathology Department, National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics n.a. N.N. Priorov, 10 Priorova str., Moscow, 127299, Russia, eLibrary SPIN: 8164-1389, ORCID: 0000-0002-6895-8288, vcpereverz@gmail.com;

Arkadii Ivanovich Kazmin, MD, PhD, orthopedic surgeon, Spine Pathology Department, National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics n.a. N.N. Priorov, 10 Priorova str., Moscow, 127299, Russia, eLibrary SPIN: 4944-4173, ORCID: 0000-0003-2330-0172, KazminAI@cito-priorov.ru;

Ekaterina Dmitryevna Bogdashevskaya, MD, ultrasound specialist, National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics n.a. N.N. Priorov, 10 Priorova str., Moscow, 127299, Russia, ORCID: 0009-0005-8217-0808, bogdashevskaya83@mail.ru;

Nataliia Sergeevna Morozova, MD, PhD, orthopedic surgeon, Spine Pathology Department, National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics n.a. N.N. Priorov, 10 Priorova str., Moscow, 127299, Russia, eLibrary SPIN: 4593-3231, ORCID: 0000-0003-4504-6902, morozcito@gmail.com;
Samir Beyukisbi oglu Bagirov, MD, orthopedic surgeon, Spine Pathology Department, National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics n.a. N.N. Priorov, 10 Priorova str., Moscow, 127299, Russia, eLibrary SPIN: 9620-7038, ORCID: 0000-0003-1038-1815, bagirov.samir22@gmail.com;
Ivan Evgenyevich Domrachev, MD, orthopedic surgeon, postgraduate student, Spine Pathology Department, National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics n.a. N.N. Priorov, 10 Priorova str., Moscow, 127299, Russia, eLibrary SPIN: 1367-3096, ORCID: 0009-0005-9014-3068, VaniaD97@yandex.ru.