



# БИОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ПОЗВОНОЧНО-ДВИГАТЕЛЬНОГО СЕКМЕНТА В ПОЯСНИЧНОМ ОТДЕЛЕ ПОЗВОНОЧНИКА: СИСТЕМАТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

Д.Н. Дзукаев, А.Н. Пейкер, А.И. Топорский, А.В. Борзенков, И.А. Музышев, В.В. Пустовойтов,  
С.Т. Торчинов, В.В. Гулый

Городская клиническая больница № 67 им. Л.А. Ворохобова, Москва, Россия

**Цель исследования.** Определить наиболее валидные биомеханические показатели стабильности позвоночно-двигательных сегментов в поясничном отделе позвоночника, их значения в норме, воспроизводимость для применения в клинической практике хирургического лечения дегенеративных заболеваний.

**Материал и методы.** Для выявления наиболее значимых и чувствительных критериев оценки биомеханики позвоночно-двигательных сегментов в поясничном отделе позвоночника с использованием поисковых систем Pubmed и eLibrary отобраны 4784 публикации, из которых после оценки по установленным критериям включения и исключения выделено 16 статей, послуживших основой для дальнейшего анализа.

**Результат.** Все показатели сегментарной стабильности разделены на 3 группы: клинические, рентгенологические и экспериментальные. Отмечен достаточно субъективный характер клинических критериев, включающих в основном оценку боли при пальпации либо оценку двигательной активности. При этом боль не показала достоверной связи с наличием нестабильности и также может быть связана с корешковым синдромом. Рентгенологические критерии нестабильности (статическая, функциональная рентгенография, КТ) имеют погрешности на фоне выраженного болевого синдрома за счет рефлекторного спазма мышц или за счет ограничений самих исследований. По данным предоперационного обследования достаточно сложно спрогнозировать возможную величину нестабильности после декомпрессии во время операции. К биомеханическим показателям, которые устанавливаются в условиях эксперимента, относят объем углового движения, упругость позвоночно-двигательного сегмента, величину нейтральной зоны и внутридискное давление.

**Заключение.** Несомненным ограничением является отсутствие в настоящий момент технической возможности для интраоперационного измерения экспериментальных показателей нагрузки *in vivo*. Развитие технологий в указанном направлении с накоплением данных и анализом специфичности и воспроизводимости критериев позволит усовершенствовать протоколы диагностики, планирования объема и опций оперативного лечения.

**Ключевые слова:** биомеханика позвоночника; сегментарная нестабильность; дегенеративные заболевания поясничного отдела позвоночника; биомеханические критерии.

Для цитирования: Дзукаев Д.Н., Пейкер А.Н., Топорский А.И., Борзенков А.В., Музышев И.А., Пустовойтов В.В., Торчинов С.Т., Гулый В.В. Биомеханические показатели нестабильности позвоночно-двигательного сегмента в поясничном отделе позвоночника: систематический обзор // Хирургия позвоночника. 2025. Т. 22, № 2. С. 32–44.

DOI: <http://dx.doi.org/10.14531/ss2025.2.32-44>

## BIOMECHANICS OF SPINAL MOTION SEGMENT INSTABILITY IN THE LUMBAR SPINE: A SYSTEMATIC REVIEW

D.N. Dzukaeu, A.N. Peiker, A.I. Toporskiy, A.V. Borzenkov, I.A. Muzishev, V.V. Pustovoitov, S.T. Torchinov, V.V. Gulyi.

City Clinical Hospital No. 67 n.a. L.A. Vorokhobov, Moscow, Russia

**Objective.** To determine the most valid biomechanical indicators of the stability of spinal motion segments in the lumbar spine, their normal values, and reproducibility for use in clinical practice of surgical treatment of degenerative diseases.

**Material and Methods.** To identify the most significant and sensitive criteria for assessing the biomechanics of the spinal motion segments in the lumbar spine, 4784 publications were selected using the PubMed and eLibrary search systems, of which 16 articles were selected after evaluation according to the established inclusion and exclusion criteria and served as the basis for further analysis.

**Result.** All segmental stability indices are divided into 3 groups: clinical, radiological and experimental. The rather subjective nature of clinical criteria is noted, including mainly either pain assessment during palpation or assessment of motor activity. At the same time, pain did not show a reliable connection with the presence of instability and can also be associated with radicular syndrome. Radiological instability criteria (static and functional radiography, CT) are in error against the background of severe pain syndrome due to reflex muscle spasm or due to limitations of the studies themselves. Based on preoperative examination data, it is quite difficult to predict the possible magni-

tude of instability after decompression during surgery. Biomechanical indices that are established under experimental conditions include the volume of angular motion, elasticity of the spinal motion segment, the size of the neutral zone and intradiscal pressure.

**Conclusion.** An obvious limitation is the current lack of technical capability for intraoperative measurement of experimental load indices *in vivo*. Development of technologies in this direction with accumulation of data and analysis of specificity and reproducibility of criteria will improve diagnostic protocols, and planning the volume and options of surgical treatment.

**Key Words:** biomechanics of the spine; segmental instability; degenerative diseases of the lumbar spine; biomechanical criteria.

Please cite this paper as: Dzukaev DN, Peiker AN, Toporskiy AI, Borzenkov AV, Muzishev IA, Pustovoitov VV, Torchinov ST, Gulyi VV. Biomechanics of spinal motion segment instability in the lumbar spine: a systematic review. *Russian Journal of Spine Surgery (Khirurgiya Pozvonochnika)*. 2025;22(2):32–44. In Russian. DOI: <http://dx.doi.org/10.14531/ss2025.2.32-44>

При изучении механизмов движения позвоночника мы сталкиваемся с двумя крупными группами биомеханических показателей – глобальным сагиттальным балансом и сегментарной стабильностью. С нашей точки зрения, наиболее клинически интересны и наименее объективно изучены в клинике именно те, которые относятся к позвоночно-двигательному сегменту (ПДС).

Одним из основных факторов, обуславливающих применение в ходе операции той или иной стабилизирующей системы, является выявление сегментарной нестабильности. При выборе стабилизирующей системы хирург стремится к восстановлению опорной функции позвоночника таким образом, чтобы параметры подвижности ПДС были максимально приближены к норме. Чрезмерная жесткость системы приводит к перегрузке смежных сегментов и элементов конструкции, в особенности если речь идет о многоуровневом дегенеративном поражении. Недооценка нестабильности, как и необоснованное применение динамической системы, может приводить к продолжению или усугублению заболевания за счет смещения позвонка. В ряде случаев применение стабилизирующей системы, несмотря на наличие рентгенологических признаков смещения (грубой нестабильности), может быть не совсем оправдано, потому что к моменту операции в сегменте уже произошло формирование костного блока (блокирования), в том числе без субъективных жалоб.

В настоящий момент на рынке существует большое разнообра-

зие имплантатов для стабилизации позвоночника, что дает возможность индивидуально подходить к лечению нестабильности. В рамках первого этапа работы определена необходимость оценки биомеханических критериев сегментарной нестабильности в поясничном отделе позвоночника, которые максимально точно определяют показания к выбору технологии лечения для конкретного пациента.

### Материал и методы

В систематическом обзоре А.Ю. Мущкина и соавт. [1] выделены 5 типов литературных источников, затрагивающих тему биомеханики:

- 1) изучение прочности анатомических структур, формирующих переднюю и заднюю колонны позвоночника;
- 2) изучение кинематических свойств изолированных ПДС и отделов позвоночника;
- 3) изучение биомеханики деформаций позвоночника;
- 4) изучение процессов перестройки (ремоделирования) костных трансплантатов в условиях деформации;
- 5) изучение биомеханики имплантатов и позвоночника при его инструментальной фиксации.

Для реализации цели исследования были отобраны статьи, относящиеся к первой и второй группам. Методология обзора реализована в соответствии с протоколом PRISMA [2]. Анализ проводили путем подачи поисковых запросов в системах Pubmed и eLibrary и сплошного изучения полученных результатов. Ключевыми словами для поиска явились в русскоязычной

базе «биомеханика позвоночника», «биомеханика поясничного отдела позвоночника», «биомеханика дегенеративных заболеваний позвоночника», «сегментарная нестабильность в поясничном отделе позвоночника»; в англоязычной – «biomechanics of lumbar spine», «degenerative disease biomechanics», «degenerative stenosis biomechanics», «biomechanics after spine fusion», «anterior spine fusion biomechanics», «neutral zone of spinal motion».

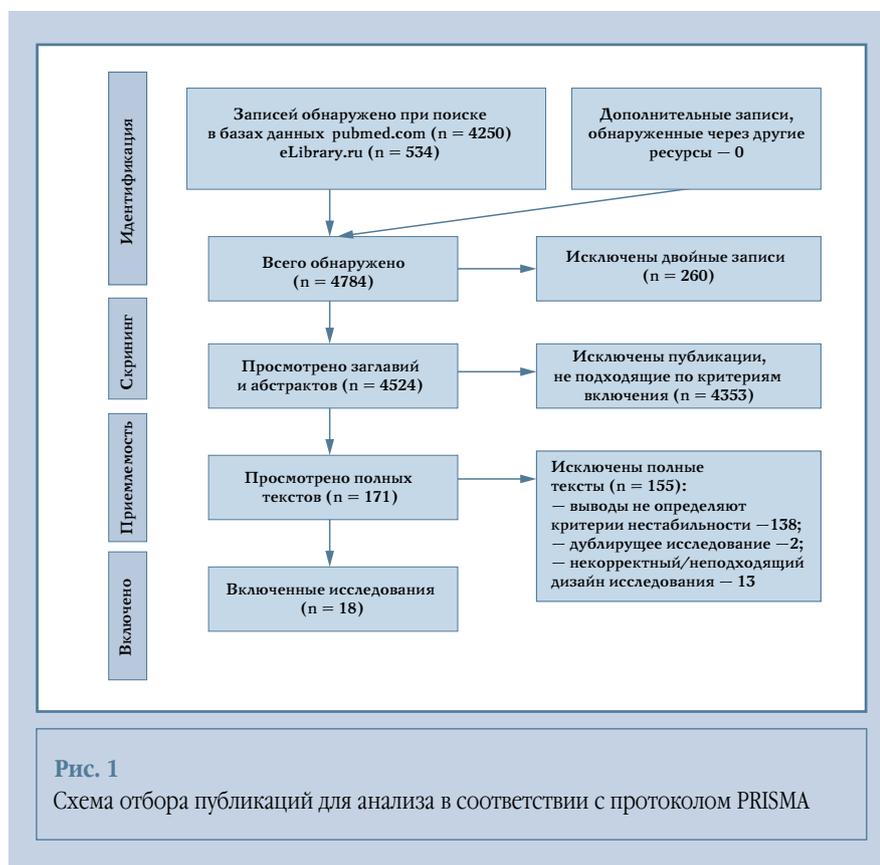
На первом этапе отобрано 4784 публикации: 4250 публикаций на английском языке на платформе pubmed.com и 534 по русскоязычным запросам на ресурсе eLibrary.ru (рис. 1), глубина поиска 50 лет (с 1975 по 2025 гг.).

Критерии включения научных публикаций:

- 1) статьи и литературные обзоры, которые касаются биомеханики поясничного отдела позвоночника;
- 2) в публикации идет речь о нормальной анатомии и физиологии позвоночника либо о дегенеративной патологии;
- 3) в публикации рассматриваются биомеханические показатели, которые имеют единицы измерения.

Критерии исключения:

- 1) публикация рассматривает показатели стабильности у оперированных больных (с имплантатами и без);
- 2) в публикации идет речь о показателях глобального сагиттального баланса;
- 3) рассматриваемые критерии не обладают высокой степенью воспроизводимости, цитируемость публикации менее 10;
- 4) возраст пациентов до 18 лет;



5) исследования, которые связаны с использованием метода конечных элементов;

б) дублирующие публикации и статьи с погруженным цитированием, выводы в которых повторяют выводы ранее опубликованных исследований.

Включение и исключение из исследования публикаций проводили 3 специалиста-эксперта в сфере нейрохирургии (опыт работы в спинальной хирургии и хирургии дегенеративных заболеваний позвоночника более 10 лет). В случае спорности вопроса о применении критериев включения или исключения к конкретной публикации решение принимали простым большинством экспертов.

## Результаты

Анализ источников (табл. 1) позволяет заключить, что большинство базовых исследований биомеханики позвоночника выполняли в 1980–1990-х гг. В связи с активным внедрением имплантатов в хирургическую

практику интерес исследователей смещается в сторону биомеханики позвоночника в условиях фиксации. Небольшое число исследований рассматривает клинические и рентгенологические критерии как основу определения сегментарной стабильности, большая часть биомеханических исследований сконцентрирована на экспериментальных показателях, применение которых в клинической практике по сей день остается ограниченным ввиду отсутствия технологий измерения *in vivo*. Большинство исследований, попавших в настоящий обзор, обладают средним уровнем доказательности (3 по Мельнику и Файнаут-Оверхолт).

*Стабильность позвоночно-двигательного сегмента.* Определение понятия «стабильность ПДС» важно для понимания того, что можно считать нормой опорной функции позвоночника и где начинается патология. Однако до настоящего момента не существует четких критериев стабильности, что часто затрудняет

принятие решения о фиксации и ее типе. Таким образом, чем четче будут определены эти критерии, тем более точным будет выбор хирургической тактики и подходящего имплантата для конкретного пациента.

В классической работе White et al. [3] определяли стабильность как способность позвоночника ограничивать смещение позвонков в условиях физиологической нагрузки с целью предупреждения повреждения или раздражения нервных корешков, а также инвалидирующих деформаций и боли, обусловленной структурными изменениями элементов позвоночника. Исходя из этого, позднее те же авторы [4] определили нестабильность позвоночника как потерю способности поддерживать такие паттерны движений, при которых нет нарастания неврологического дефицита, значимой деформации или инвалидирующей (существенно ухудшающей качество жизни) боли. Американская академия хирургов-ортопедов дала более упрощенное определение стабильности позвоночника: это способность позвонков оставаться сплоченными и сохранять нормальные смещения при любых физиологических движениях [5]. Необходимо отметить, что во всех приведенных определениях нет конкретности: нигде не приводятся измеряемые критерии, понятия относительно размыты и могут по-разному пониматься различными специалистами (например, что такое физиологическая нагрузка и физиологические движения). Оценка нестабильности сегмента в лучшем случае сводится к оценке наличия/отсутствия остеофитов и стадии дегенерации диска по данным КТ, в худшем – ПДС фиксируют имплантатами во всех случаях, остерегаясь нестабильности даже при прочном костном блоке. В случае функциональной рентгенографии существуют более точные критерии, однако и у этого метода есть существенные ограничения: невозможность использования в период острой боли, погрешность измерения за счет патологического мышечного тонуса, неопределенность методологии про-

Таблица 1

Публикации, анализируемые в настоящем систематическом обзоре

Публикация	Тип исследования	Контент исследования	Оценка исследования	Уровень доказательности по Мельнику и Файнаут-Оверхолт
А.Ю. Мушкин и соавт. [1]	Аналитический обзор	Определение основных групп статей, связанных с биомеханикой позвоночника	Рассматриваются все типы показателей	7
Panjabi [6]	Аналитический обзор	Описание анатомии фасеточных суставов, клиническая оценка нестабильности	Клинические, рентгенологические и экспериментальные критерии	7
Simmonds et al. [7]	Систематический обзор (23 публикации)	Предложена схема оценки сегментарной нестабильности на основании клинических и рентгенологических критериев	Клинические и рентгенологические критерии	5
Pearcy et al. [8]	Экспериментальное исследование <i>in vivo</i> (14 пациентов)	На группе асимптомных пациентов установлены пределы нормальных значений смещения и ротации поясничных позвонков в трех плоскостях	Рентгенологические показатели	3
А.В. Крутько и соавт. [33]	Аналитический обзор	Анализ публикаций по теме «Сегментарная нестабильность позвоночника»	Клинические, рентгенологические и экспериментальные критерии	7
Chazal et al. [10]	Экспериментальное исследование <i>in vitro</i> на кадаверном материале (46 препаратов поясничного отдела)	Выявление предельного удлинения связок и силы на разрыв в эксперименте на 46 кадаверных препаратах	Экспериментальные критерии	3
Berkson et al. [14]	Экспериментальное исследование <i>in vitro</i> на кадаверном материале (42 препарата поясничного отдела)	Измерение угловых деформаций, продольного смещения и изменения внутридискового давления в ответ на нагрузку с градиацией в зависимости от степени дегенерации диска на 42 кадаверных препаратах	Экспериментальные критерии	3
Panjabi [19]	Экспериментальное исследование на кадаверном материале ( <i>in vitro</i> ), животном материале ( <i>in vivo</i> ), дополненное математическим моделированием	Установлена корреляция величины нейтральной зоны с другими параметрами нестабильности	Экспериментальные критерии	3
Yamamoto et al. [21]	Экспериментальное исследование <i>in vitro</i> на кадаверном материале (10 препаратов поясничного отдела)	Уточнение величины нейтральной, эластичной зон и угла движений в норме в эксперименте на 10 кадаверных препаратах	Экспериментальные критерии	3
Crisco [23]	Диссертация (5 экспериментальных исследований)	Сравнение стабильности позвоночника <i>in vitro</i> и <i>in vivo</i> и определение стабилизирующей роли мышц	Экспериментальные критерии	3

## Окончание таблицы 1

Публикации, анализируемые в настоящем систематическом обзоре

Публикация	Тип исследования	Контент исследования	Оценка исследования	Уровень доказательности по Мельнику и Файнаут-Оверхолт
Nachemson и Morris [24]	Экспериментальное исследование <i>in vivo</i> (16 человек)	Определение внутридискового давления <i>in vivo</i>	Экспериментальные критерии	3
McNally и Adams [28]	Экспериментальное исследование <i>in vitro</i> (7 препаратов поясничного отдела)	Особенности распределения внутридискового давления в диске в норме и при патологии <i>in vitro</i>	Экспериментальные критерии	3
McNally et al. [29]	Экспериментальное исследование <i>in vivo</i> (10 человек)	Особенности распределения внутридискового давления в диске в норме и при патологии <i>in vivo</i>	Экспериментальные критерии	3
Brown et al. [30]	Экспериментальное исследование <i>in vivo</i> (298 человек)	Измерение упругости позвоночно-двигательных сегментов в разных стадиях дегенерации диска <i>in vitro</i>	Экспериментальные критерии	3
Di Pauli von Treuheim [27]	Экспериментальное исследование <i>in vivo</i> на материале животных	Сравнение методов расчета нейтральной зоны	Экспериментальные критерии	3
Cannella et al. [26]	Экспериментальное исследование <i>in vitro</i> на кадаверном материале (17 препаратов поясничного отдела)	Сравнение величины нейтральной зоны и угла движения сегмента до и после дискэктомии	Экспериментальные критерии	3
Cornaz et al. [31]	Экспериментальное исследование <i>in vitro</i> на кадаверном материале (5 препаратов поясничного отдела)	Определение стабильности сегмента путем определения упругости с использованием динамометрического инструмента собственной разработки	Экспериментальные критерии	3
McAfee et al. [32]	Экспериментальное исследование <i>in vitro</i> (1 препарат)	Определение стабильности сегмента путем определения упругости с использованием динамометрического роботизированного инструмента собственной разработки	Экспериментальные критерии	3

ведения исследования (в положении стоя или лежа, какая сила сгибания и т.п.). Кроме того, в клинической практике на основании дооперационного рентгенологического обследования практически невозможно четко спрогнозировать изменение стабильности позвоночника после декомпрессии.

*Клинические критерии нестабильности* мало рассматриваются в научной литературе. К ним можно отнести изменяющуюся при движении

боль в поясничном отделе позвоночника и неврологический дефицит. Rajabi [6] предложил балльную систему оценки нестабильности на основе клинических и рентгенологических критериев, учитывающую разрушение элементов передней (1 балл) и задней (1 балл) колонн, смещение позвонка в сагиттальной плоскости более чем на 4,5 мм или 15 % по данным функциональной (2 балла) или статической (2 балла) рентгенографии, ангуляция позвонка при статической

рентгенографии более 22° (2 балла), изменение угла ангуляции при функциональной рентгенографии более 15° на уровне выше L<sub>4</sub>, более 20° – на уровне L<sub>4</sub>–L<sub>5</sub>, более 25° – на уровне L<sub>5</sub>–S<sub>1</sub> (2 балла), повреждение конского хвоста, неврологический дефицит (3 балла), предполагаемая высокая нагрузка на позвоночник (1 балл). Сумма 5 баллов и более может рассматриваться как нестабильность. Из данных критериев только неврологический дефицит – клинический.

	N	Movement in degrees Mean (SD)		
		Flex	Ext	Flex/ext
L1/2	6	8 (5)	5 (2)	13 (5)
L2/3	11	10 (2)	3 (2)	14 (2)
L3/4	11	12 (1)	1 (1)	13 (2)
L4/5	11	13 (4)	2 (1)	16 (4)
L5/S1	11	9 (6)	5 (4)	14 (5)

Рис. 2

Смещение позвонков (мм) при сгибании и разгибании [8]

Позднее Simmonds et al. [7] на основании систематического обзора разработали систему оценки нестабильности по комбинации клинических и рентгенологических критериев, выделив 3 группы: стабильный сегмент, потенциально нестабильный и нестабильный. Для оценки степени нестабильности использовали следующие критерии: поясничная боль (отсутствует, является не ведущей жалобой, является ведущей жалобой), наличие признаков рестабиллизации (высота диска и остеофиты), ангуляция диска (лордотический, нейтральный, кифотический), смещение на функциональных рентгенограм-

мах (<3 мм, 3–5 мм или >5 мм), наличие выпота в полости фасеточных суставов (нет, выпот без растяжения полости сустава, выпот с растяжением полости сустава).

В целом можно сделать вывод об отсутствии каких-то значимых исследований клинических критериев нестабильности, которые оцениваются только в совокупности с другими, в основном рентгенологическими критериями. Наличие неврологического дефицита не обладает высокой специфичностью при определении нестабильности сегмента, особенно у больных с грубым дегенеративным стенозом, сопровождающимся выраженной оссификацией. Таким образом, оценка клинических критериев не рассматривается как приоритет для определения сегментарной нестабильности.

*Рентгенологические критерии нестабильности* часто используются в клинической практике, но чувствительность этой методики снижается

за счет мышечного дефанса, болевого синдрома, отсутствия единого протокола исследования (какой степени сгибания необходимо достичь пациенту при функциональной рентгенографии и т.п.) и разных антропометрических показателей пациентов.

На рис. 2, 3 [8] показаны нормальные значения подвижности поясничных сегментов, полученные Pearcy et al. [8] по результатам функциональной спондилографии на 14 асимптомных пациентах. Наибольшие смещения (трансляции) и ротации позвонков отмечены в сагиттальной плоскости (ось Z на рис. 2, 3). В других плоскостях в стабильном ПДС смещений и угловых деформаций не происходит или они минимальны.

Такая стабильность достигается за счет особенностей пространственного расположения дугоотростчатых суставов в поясничном отделе позвоночника (сагиттальное либо более косое в нижних отделах) и связочного аппарата [9]. Связки поясничного отдела позвоночника обеспечивают его стабильность в эластичной зоне (EZ-elastic zone). Наглядно величина силы и максимального удлинения отдельных связок на разрыв представлена Chazal et al. [10] и White et al. [11] (табл. 2).

Elmose et al. [12] на основании систематического обзора 118 хирургических и нехирургических статей попытались выделить другие критерии стабильности ПДС. Наиболее частым во многих исследованиях считается сагиттальное смещение позвонка (при функциональной спондилографии) менее чем на 3 мм. Приводя данную цифру, большинство исследователей ссылаются на статью Boden

	N	Translations (mm) Mean (SD)		
		X	Y	Z
<b>Movements during flexion</b>				
L1/2	6	0 (1)	1 (1)	3 (1)
L2/3	11	1 (1)	1 (1)	2 (1)
L3/4	11	1 (1)	0 (1)	2 (1)
L4/5	11	0 (1)	0 (1)	2 (1)
L5/S1	11	0 (1)	1 (1)	1 (1)
<b>Movements during extension</b>				
L1/2	6	1 (1)	0 (0)	1 (1)
L2/3	11	0 (1)	0 (1)	1 (1)
L3/4	11	1 (1)	0 (1)	1 (1)
L4/5	11	0 (1)	0 (1)	1 (1)
L5/S1	11	1 (1)	0 (0)	1 (1)

Рис. 3

Ротация позвонков (град.) при сгибании и разгибании [8]

Таблица 2

Прочность и эластичность связок позвоночника [10, 11]

Связка	Сила разрыва	Предельное удлинение, %
Передняя продольная	450	26
Задняя продольная	324	26
Желтая	285	26
Межостистая	125	13
Надостистая	150	32

Classification	Rotations (°) due to 10.6Nm moment				Displacements (cm) due to 145N shear		
	Flexion	Extension	Lateral bend	CW* torsion	Anterior shear	Posterior shear	Rt. lateral shear
Degeneration Grades 0, 1, 2	5.5	2.9	5.6	1.5	.12	.08	.10
Grades 3, 4				1.0(3)	.06	.07(0)	.06(0)

Рис. 4

Угловая деформация и смещения, полученные в исследовании Berkson et al. [14]

Classification of segments	Increase Due to 10.6Nm Moment (kPa)				Increase due to 145N shear (kPa)		
	Flexion	Extension	Rt. lateral bend	Torsion	Anterior	Posterior	Rt. lateral
Degeneration Grades 0, 1, 2	267	58	279	30	39	6	44
Grades 3, 4				18(3)	26(3)		39(3)

Рис. 5

Изменения внутридискового давления, полученные в исследовании Berkson et al. [14]

и Wiesel [13], измеривших сагиттальное смещение позвонков по данным функциональных спондилограмм 40 здоровых добровольцев-мужчин и нашедших среди обследованных максимальное сагиттальное смещение позвонка на 3 мм и боковое – на 8 % ширины тела позвонка. Эти критерии исторически приняты за норму.

**Экспериментальные критерии нестабильности.** Существует ряд более чувствительных показателей нестабильности, измерение которых в рутинной клинической практике в настоящий момент не проводится ввиду отсутствия необходимых технических средств. К ним относят коэффициент упругости сегмента, соотношение нейтральной и эластичной зон его движения. Измерение этих показателей в настоящий момент доступно только при кадаверных биомеханических исследованиях либо путем математического моделирования методом конечных элементов.

Упругость – это сила, которую необходимо приложить к ПДС для изменения его длины на 1 мм. Коэффициент упругости измеряется в Н/мм. Усредненные коэффициенты упругости для интактных сегментов получены в тестах *in vitro* [11, 14–17]:

- шейный отдел: боковое растяжение – 33 Н/мм, компрессия – 1317 Н/мм;
- грудной отдел: боковое растяжение – 100 Н/мм, переднезаднее растяжение – 900 Н/мм, компрессия – 1250 Н/мм;
- поясничный отдел: растяжение – 100–200 Н/мм, компрессия – 600–700 Н/мм;
- крестцово-подвздошные сочленения: растяжение – 100–300 Н/мм.

Большой интерес представляют данные Berkson et al. [14] по 42 свежезаготовленным кадаверным ПДС. Измерялись угловые деформации, продольные смещения и повышение внутридискового давления в ответ на нагрузку. Угловая деформация измерялась при наложении крутящего момента в 10,6 Нм (величина измерения момента силы – 1 Нм, это сила в 1 Ньютон, которая приложена к крутящему рычагу длиной в 1 м), а смещение при наложении силы в 145 Н. Измерения проводили с вертикальной преднагрузкой в 400 Н, которая имитировала вес тела человека, с дифференцировкой исследуемых сегментов по возрасту, полу, уровню диска и степени дегенерации. Полученные данные

представлены на рис. 4. Значимые различия были установлены только при дифференцировке по полу – женщины оказались несколько более гибкими по сравнению с мужчинами. Однако для нас это исследование представляет интерес в плане понимания нормальных значений смещения и угловой деформации позвонков в ответ на нагрузку. Для этих целей можно рассматривать только строку с группой дегенерации диска 0, 1, 2, в которую попали 39 препаратов из 42 исследуемых.

В той же работе представлены данные об изменении внутридискового давления в процессе наложения тех же нагрузок (данные приведены в килопаскалях). Также возможно использовать только данные из строки степени дегенерации 0, 1, 2 (рис. 5).

Очень большое количество исследований биомеханики позвоночника проведено в конце 1980-х гг. Panjabi et al. [17] в Йельском университете. Ими разработана концепция нейтральной и эластичной зон в движении позвоночника, которая представляет большой интерес для дальнейшего развития способов определения стабильности ПДС. Показатель ширины нейтральной зоны и его отношение к полному объему движения сегмента имеют перспективу стать наиболее чувствительными средствами определения нестабильности.

Установлено, что движение ПДС в любую сторону в ответ на нагрузку происходит нелинейно и при увеличении прилагаемой силы смещение позвонка не будет пропорциональным. В самом начале движение происходит легко, позвонок как бы просто скользит по межпозвонковому диску без приложения значимого усилия. Однако, когда он начинает встречать сопротивление связок, нагрузка, требуемая для смещения позвонка на то же расстояние, начинает увеличиваться в геометрической прогрессии.

На рис. 6 представлена кривая «нагрузка–смещение» (load-displacement curve), которая суммирует представления Panjabi о движении в ПДС.

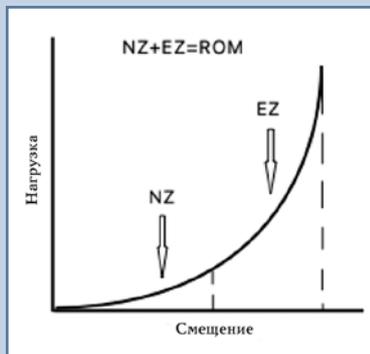


Рис. 6

Кривая «нагрузка–смещение» [19]

Кривая демонстрирует, что в начале движения необходима минимальная нагрузка (Н). Этот сегмент кривой соответствует нейтральной зоне (NZ). Далее следует эластичная зона, в которой за счет сопротивления суставов и связок позвоночника происходит резкое увеличение требуемой для смещения позвонка нагрузки. Вместе эти зоны составляют объем движения (range of motion, ROM). В случае нестабильности ПДС произойдет смещение кривой вправо, она станет более пологой, а при стабилизации смещение будет происходить в противоположную сторону [19].

Panjabi et al. и Yamamoto et al. [20, 21] представили нормальные величины NZ, EZ и ROM для различных сегментов (рис. 7). Препарат кадаверного позвоночника подвергли исследованию в динамической машине. Накладывалась физиологическая нагрузка, после ее снятия ПДС не возвращался в исходное положение, а сохранялось остаточное смещение. Этот феномен использован для определения величины нейтральной зоны. Проводилось 3 цикла накладывания–снятия физиологической нагрузки с перерывом в 30 с. Измерение остаточного смещения проводили перед самым началом третьего цикла. Так, измерялось смещение при сгибании, разгибании. Суммирование этих величин давало величину нейтральной зоны. Соот-

ветственно, эластическая зона определялась как разница между объемом движения в сегменте и нейтральной зоной. Однако определение физиологической нагрузки дано не было, а она для каждого индивидуума разная.

Значение величины нейтральной зоны и соотношения нейтральной зоны будет увеличиваться в условиях появления нестабильности ПДС. При его стабилизации за счет естественного или хирургического костного блока величина нейтральной зоны будет уменьшаться.

Немного более четкое описание того, как определять величину нагрузки для нейтральной зоны, дано Busscher et al. [22]: граница нейтральной зоны определена как точка максимального изменения кривой «нагрузка–смещение» (load-displacement curve).

Немаловажную роль в поддержании стабильности поясничного отдела играют мышцы позвоночника, брюшного пресса. Для демонстрации их эффекта можно использовать величину критической нагрузки – ту минимальную силу, которую нужно приложить к верхней части какой-либо колонны, чтобы произошло ее минимальное сгибание. В экспериментальных исследованиях установлено, что критическая нагрузка для поясничного отдела позвоночника равна 90 Н [23]. Это значительно меньше, чем нагрузка, которая применялась в исследованиях *in vivo*, где она составила 1500 Н и более [24]. Такая разница может быть объяснена стабилизирующим влиянием мышечно-

	Flexion			Extension			One-side lat. bend			One-side ax rotation						
	NZ	EZ	ROM	NZR	NZ	EZ	ROM	NZR	NZ	EZ	ROM	NZR	NZ	EZ	ROM	NZR
C0-C1	1.1	2.4	3.5	31.4	1.1	19.9	21.0	5.2	1.5	4.0	5.5	27.3	1.6	5.6	7.2	22.2
C1-C2	3.2	8.3	11.5	27.8	3.2	7.7	10.9	29.4	1.2	5.5	6.7	17.9	29.6	9.3	38.9	76.1
L4-L5	10.1	6.0	14.8	26.1	3.5	3.4	8.2	16.2	3.5	6.5	13.6	16.4	2.6	8.3	14.0	38.3
L5-S1	1.5	6.1	7.6	19.7	1.5	2.3	3.8	39.5	1.6	5.0	6.6	24.2	0.7	1.7	2.4	29.2
	3.0	7.0	10.0	30.0	3.0	4.8	7.8	38.5	1.8	3.7	5.5	32.7	0.4	1.0	1.4	28.6

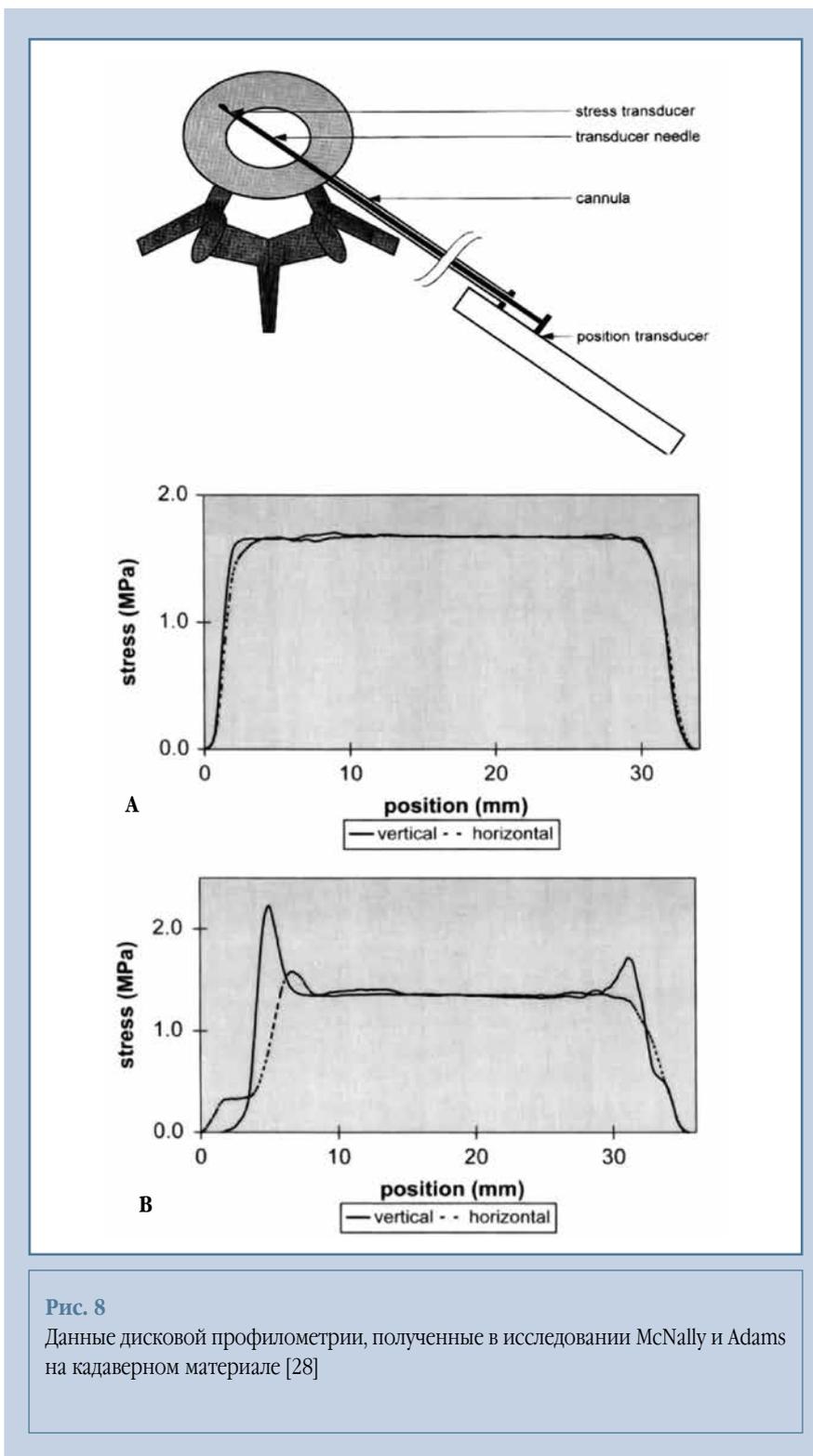
Рис. 7

Нормальные значения нейтральной зоны (NZ), эластичной зоны (EZ), объема движений (ROM) и соотношения нейтральной зоны (NZR) в градусах для различных сегментов [20, 21]

го корсета позвоночника. Panjabi et al. [25] оценили влияние мышц на стабильность позвоночника в условиях острой травмы и установили, что при моделировании стабилизирующей мышечной силы в 60 Н в препарате с поврежденным позвонком показатель ROM сохраняется на значительно более высоком уровне, чем в неповрежденном, однако показатель NZ возвращается практически к исходному. Это позволяет сделать заключение о важности мышц в поддержании нормальной величины нейтральной зоны и экстраполировать полученные данные на дегенеративные поражения позвоночника.

Чувствительность параметра NZ подтверждают Cannella et al. [26] в эксперименте на 12 кадаверных препаратах с измерением биохимических параметров до и после частичного повреждения межпозвонкового диска (симуляция дегенеративного процесса или дискэктомии) – при этом получено существенное увеличение нейтральной зоны и угла движения после повреждения межпозвонкового диска.

К настоящему моменту концепция нейтральной зоны Panjabi до сих пор не обрела окончательные черты. Разработаны несколько различных методик, которые позволяют определить границы между нейтральной и эластичной зоной на кривой «нагрузка–смещение». К ним относят трехфазный метод, двойной сигмовидный метод, метод нулевой нагрузки, метод порога жесткости и метод экстраполируемой эластичной зоны.



При сравнении этих методик Di Pauli von Treuheim et al. [27] пришли к выводу, что между ними нет существенного согласия, после подсчетов были получены данные с существенным разли-

чием. Наиболее близкими оказались двойной сигмовидный метод и метод порога жесткости.

McNally и Adams [28] провели исследование внутридискового давления

в норме и при выраженной дегенерации *in vitro*, измеряя его путем пункционной профилометрии: в диск вводилась игла с датчиком и снимались данные в каждой точке ее прохождения через диск. Результаты представлены на рис. 8, где на верхней схеме – методика установки иглы с датчиком давления. График А показывает распределение давления на протяжении нормального диска. На горизонтальной оси X распределены точки снятия внутридискового давления с задних отделов фиброзного кольца через пульпозное ядро к передним отделам фиброзного кольца. Согласно этому графику, в нормальном диске основное давление приходится на пульпозное ядро в центре, фиброзное кольцо (задние и передние отделы) практически не испытывает нагрузки. В противоположность этому при дегенерации происходит перераспределение давления за счет уменьшения пульпозного ядра в размерах. На графике В представлены данные профилометрии, полученные с дегенерировавших дисков. Отмечается значительное снижение нагрузки на пульпозное ядро и ее повышение на фиброзное кольцо, преимущественно на его задние отделы.

В 1996 г. группа ученых опубликовала похожее исследование, проведенное *in vivo* [29]. Выполнена профилометрия дегенерированных дисков поясничного отдела позвоночника у симптомных пациентов с выраженной поясничной болью. После измерения давления подтверждалась связь боли с исследуемым диском путем пункционной провокационной дискографии (введение контрастного вещества в диск вызывало усиление болевого синдрома в пояснице и регистрировалось на рентгенографии). Получены сходные с предыдущим исследованием *in vitro* данные и подтверждена теория о связи поясничной боли с перегрузкой задних отделов фиброзного кольца.

Выбор метода фиксации рационально проводить на основе интраоперационного измерения стабильности ПДС. Специалистами отделения ортопедии и реабилитации универси-

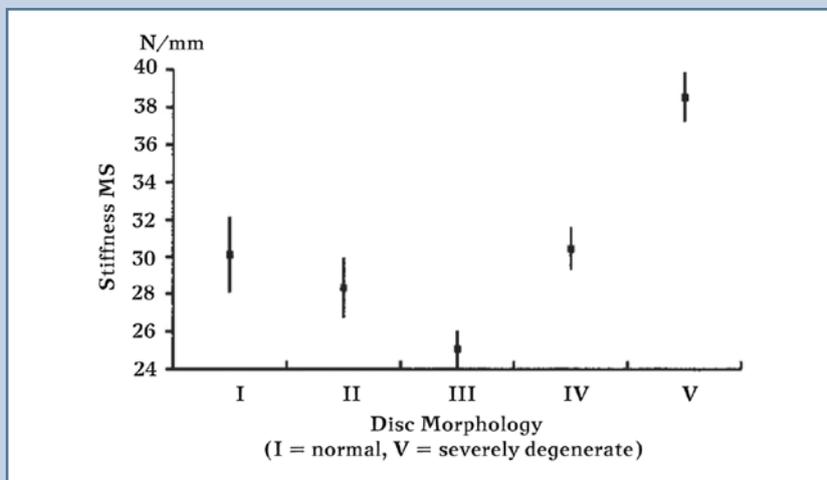


Рис. 9

Данные о величине упругости в зависимости от стадии дегенерации диска, полученные интраоперационно с использованием специального устройства, описанного в исследовании Brown et al. [30]

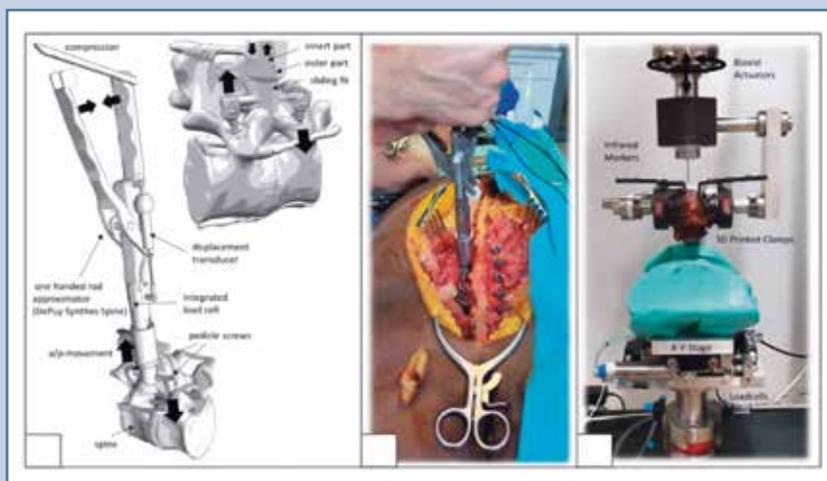


Рис. 10

Динамометрический инструмент из работ Cornaz et al. [31]

тета Майами (США) разработано устройство интраоперационного определения стабильности позвоночника. Это устройство устанавливается между остистыми отростками позвонков и, прилагая нагрузку, измеряет величину деформации, произошедшей в ответ на нее. Таким образом возможно получить наиболее точные данные об упругости конкретного ПДС у конкретного пациента (рис. 9) [30].

Другое устройство интраоперационного измерения стабильности позвоночника предложено Cornaz et al. [31]. Оно регистрирует величину переднезаднего смещения позвонков в ответ на нагрузку, прилагаемую к ним через установленные транспедикулярные винты (рис. 10).

К настоящему моменту в США уже существует роботизированная пневматическая система для интраопераци-

онного измерения упругости сегмента и оценки его стабильности. Роботизированная система имеет пневмопривод и обеспечивает приложение к установленным транспедикулярным винтам необходимой силы на растяжение. В то же время под электронно-оптическим преобразователем регистрируется изменение расстояния между замыкательными пластинками позвонков. На рис. 11 представлены результаты такого измерения до и после дискэктомии. Оценка производится в сагиттальной плоскости на растяжение [32].

## Обсуждение

Сложная анатомия позвоночника создает большие трудности в определении четких критериев стабильности/нестабильности ПДС.

Существующие критерии сегментарной стабильности могут быть разделены на большие группы: клинические и биомеханические. Клинические критерии (боль при пальпации, боль при нагрузке или определенных движениях, неврологический дефицит) могут быть связаны не только с чрезмерной подвижностью позвонка, растяжением фиброзного кольца и связок позвоночника, но и с компрессией корешка или спинного мозга. В связи с этим клинические критерии в большинстве случаев обладают низкой специфичностью и являются слабым инструментом для четкого определения сегментарной нестабильности.

Биомеханические показатели стабильности могут быть оценены по следующим данным:

- 1) рентгенологическому исследованию (функциональная рентгенография с оценкой смещения позвонков);
- 2) экспериментальным моделям (*in vitro* на кадаверном материале с использованием динамометрических машин, *in vivo* интраоперационно – дископрофилометрия, измерение упругости с использованием специализированных динамометров).

Применение рентгенологических критериев оценки нестабильности в настоящий момент очень распространено

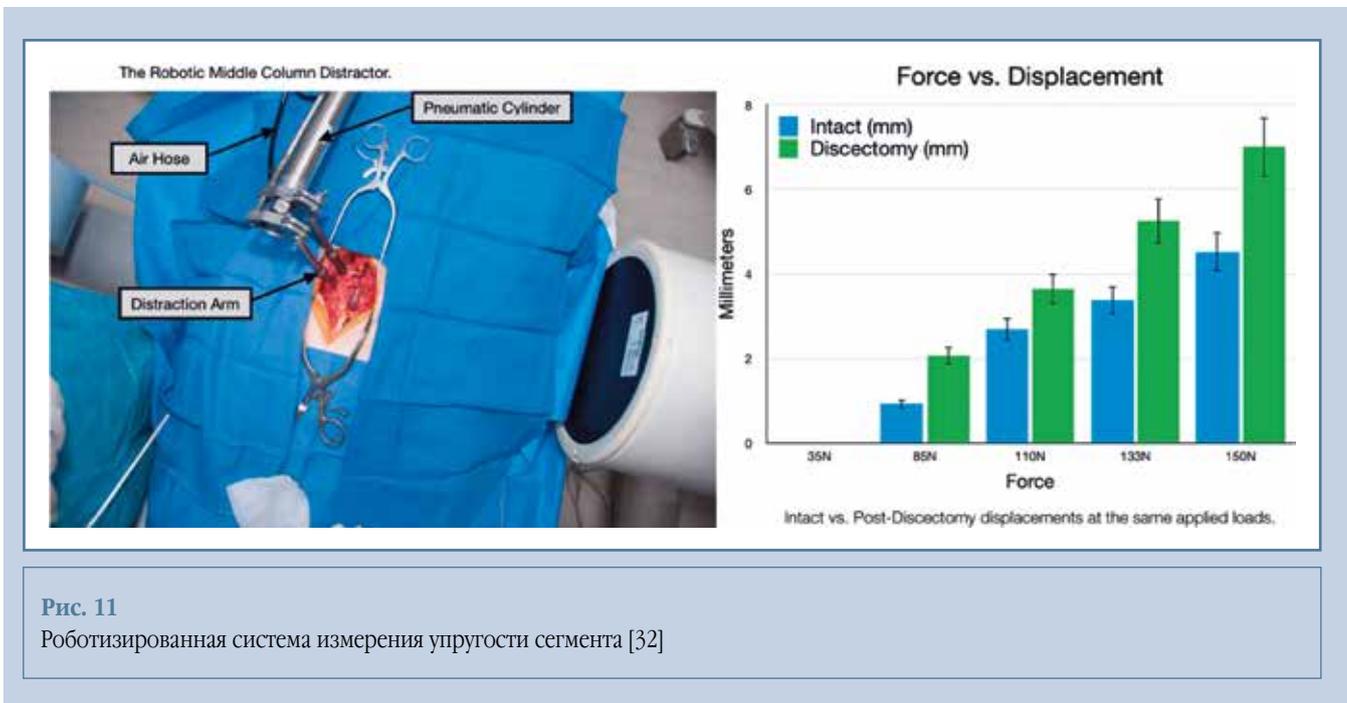


Рис. 11

Роботизированная система измерения упругости сегмента [32]

в клинической практике, однако стоит отметить их не очень высокую чувствительность. Чувствительность статических методов может ограничиваться невозможностью достоверной оценки сформировавшегося костного блока (например, фиксированный спондилолистез). Что касается функциональной рентгенографии, то всегда нужно учитывать невозможность ее адекватной оценки в условиях выраженного болевого синдрома за счет рефлекторного действия мышц.

Среди биомеханических параметров, измеряемых экспериментально, следует особо выделить величину нейтральной зоны, которая дает возможность разработки очень чувствительного метода для определения нестабильности и показаний к стабилизации. Недостатком этого показателя является отсутствие консенсуса среди ученых в вопросе определения границ нейтральной зоны на кривой «нагрузка–смещение». Другие показатели (упругость сегмента, величина смещения позвонка и величина угловой деформации) тоже могут быть очень информативны в вопросе определения нестабильности. Особенно интересной может быть возможность определения этих показателей *in vivo*. При анализе литературы об экспери-

ментальных биомеханических критериях не выявляется публикаций с уровнем доказательности 1, однако высокая чувствительность и специфичность величины нейтральной зоны, упругости ПДС в вопросе определения сегментарной нестабильности обладает значимым уровнем внутриэкспертного консенсуса.

В аналитическом обзоре А.В. Крутько с соавт. [33] рассмотрены публикации по теме сегментарной нестабильности позвоночника с целью выявления критериев для четкого определения тактики лечения и сделан вывод об отсутствии в настоящий момент однозначного способа. Авторы полагают, что разработка четкого клинко-рентгенологического алгоритма является необходимой для дальнейшего развития спинальной хирургии, что в целом подтверждает результаты нашего исследования.

### Заключение

Проведенный анализ литературы дал возможность оценить современное состояние медицинской науки в области определения сегментарной нестабильности позвоночника. Мы можем отметить, что рутинно в клинической

практике для этого используют методики, которые обладают низкой чувствительностью и специфичностью – оценка боли при движениях, оценка боли при пальпации, данные простой и функциональной рентгенографии, КТ. Существующие теоретические сведения о биомеханических показателях, которые возможно измерить экспериментально (ROM, упругость, нейтральная зона), показывают, что они могут быть успешно использованы в клинической практике и служить основой для разработки чувствительной методики определения нестабильности ПДС. Однако в настоящий момент требуется установление единого механизма определения границ нейтральной зоны и технические разработки для измерения этих показателей *in vivo* в операционной.

*Исследование поддержано грантом Правительства Москвы на реализацию научно-практического проекта в медицине № 1503-23/23.*

*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. **Мушкин А.Ю., Ульрих Э.В., Зуев И.В.** Биомеханика позвоночника в норме и при патологических состояниях: основные аспекты исследований // Хирургия позвоночника. 2009. № 4. С. 53–61. [Mushkin AYU, Ulrikh EV, Zuev IV. Normal and pathological biomechanics of the spine: major aspects of investigation. Russian Journal of Spine Surgery (Khirurgiya Pozvonochnika). 2009;(4):53–61]. DOI: 10.14531/ss2009.4.53-61
2. **Liberati A, Altman DG, Tetzlaff J, Mulrow C, G tzsche PC, Ioannidis JP, Clarke M, Devereaux PJ, Kleijnen J, Moher D.** The PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate health care interventions: explanation and elaboration. *Ann Intern Med.* 2009;151:W65–W94. DOI: 10.7326/0003-4819-151-4-200908180-00136
3. **White AA 3rd, Johnson RM, Panjabi MM, Southwick WO.** Biomechanical analysis of clinical stability in the cervical spine. *Clin Orthop Relat Res.* 1975;(109):85–96. DOI: 10.1097/00003086-197506000-00011
4. **White AA 3rd, Panjabi MM.** The basic kinematics of the human spine. A review of past and current knowledge. *Spine.* 1978;3:12–20. DOI: 10.1097/00007632-197803000-00003
5. **Kirkaldy-Willis WH.** Presidential symposium on instability of the lumbar spine. Introduction. *Spine.* 1985;10:254.
6. **Panjabi MM.** Clinical spinal instability and low back pain. *J Electromyogr Kinesiol.* 2003;13:371–379. DOI: 10.1016/s1050-6411(03)00044-0
7. **Simmonds AM, Rampersaud YR, Dvorak MF, Dea N, Melnyk AD, Fisher CG.** Defining the inherent stability of degenerative spondylolisthesis: a systematic review. *J Neurosurg Spine.* 2015;23:178–189. DOI: 10.3171/2014.11.SPINE1426
8. **Pearcy M, Portek I, Shepherd J.** Three-dimensional x-ray analysis of normal movement in the lumbar spine. *Spine.* 1984;9:294–297. DOI: 10.1097/00007632-198404000-00013
9. **Panjabi MM, Oxland T, Takata K, Goel V, Duranceau J, Krag M.** Articular facets of the human spine. Quantitative three-dimensional anatomy. *Spine.* 1993;18:1298–1310. DOI: 10.1097/00007632-199308000-00009
10. **Chazal J, Tanguy A, Bourges M, Gaurel G, Escande G, Guillot M, Vanneuville G.** Biomechanical properties of spinal ligaments and a histological study of the supraspinal ligament in traction. *J Biomech.* 1985;18:167–176. DOI: 10.1016/0021-9290(85)90202-7
11. **White AA 3rd, Panjabi MM, eds.** *Clinical Biomechanics of the Spine.* 2nd ed. Philadelphia: J.B. Lippincott, 1990.
12. **Elmose SF, Andersen GO, Carreon LY, Sigmundsson FG, Andersen MO.** Radiological definitions of sagittal plane segmental instability in the degenerative lumbar spine – a systematic review. *Global Spine J.* 2023;13:523–533. DOI: 10.1177/21925682221099854
13. **Boden SD, Wiesel SW.** Lumbosacral segmental motion in normal individuals. Have we been measuring instability properly? *Spine.* 1990;15:571–576. DOI: 10.1097/00007632-199006000-00026
14. **Berkson MH, Nachemson AL, Schultz AB.** Mechanical properties of human lumbar spine motion segments – Part II: Responses in compression and shear; influence of gross morphology. *J Biomech Eng.* 1979;101:52–57. DOI: 10.1115/1.3426225
15. **McGlashen KM, Miller JA, Schultz AB, Andersson GB.** Load displacement behavior of the human lumbosacral joint. *J Orthop Res.* 1987;5:488–496. DOI: 10.1002/jor.1100050404
16. **Moroney SP, Schultz AB, Miller JA, Andersson GB.** Load-displacement properties of lower cervical spine motion segments. *J Biomech.* 1988;21:769–779. DOI: 10.1016/0021-9290(88)90285-0
17. **Panjabi MM, Brand RA Jr, White AA 3rd.** Mechanical properties of the human thoracic spine as shown by three-dimensional load-displacement curves. *J Bone Joint Surg Am.* 1976;58:642–652. DOI: 10.2106/00004623-197658050-00011
18. **Schultz AB, Warwick DN, Berkson MH, Nachemson AL.** Mechanical properties of human lumbar spine motion segments. Part I: Responses in flexion, extension, lateral bending and torsion. *J Biomech Eng.* 1979;101:46–52. DOI: 10.1115/1.3426223
19. **Panjabi MM.** The stabilizing system of the spine. Part II. Neutral zone and instability hypothesis. *J Spinal Disord.* 1992;5:390–396; discussion 397. DOI: 10.1097/00002517-199212000-00002
20. **Panjabi M, Dvorak J, Duranceau J, Yamamoto I, Gerber M, Rauschnig W, Bueff HU.** Three dimensional movements of the upper cervical spine. *Spine.* 1988;13:726–730. DOI: 10.1097/00007632-198807000-00003
21. **Yamamoto I, Panjabi MM, Crisco T, Oxland T.** Three-dimensional movements of the whole lumbar spine and lumbosacral joint. *Spine.* 1989;14:1256–1260. DOI: 10.1097/00007632-198911000-00020
22. **Busscher I, van der Veen AJ, van Die n JH, Kingma I, Verkerke GJ, Veldhuizen AG.** In vitro biomechanical characteristics of the spine: a comparison between human and porcine spinal segments. *Spine.* 2010;35:E35–E42. DOI: 10.1097/BRS.0b013e3181b21885
23. **Crisco JJ 3rd.** *The Biomechanical Stability of the Human Spine: Experimental and Theoretical Investigations.* PhD thesis. Yale University, New Haven, CT, 1989.
24. **Nachemson A, Morris JM.** In vivo measurements of the intradiscal pressure: discovery, a method for the determination of pressure in the lower lumbar discs, *J Bone Joint Surg Am.* 1964;46:1077–1092. DOI: 10.2106/00004623-196446050-00012
25. **Panjabi M, Abumi K, Duranceau J, Oxland T.** Spinal stability and intersegmental muscle forces. A biomechanical model. *Spine.* 1989;14:194–200. DOI: 10.1097/00007632-198902000-00008
26. **Cannella M, Arthur A, Allen S, Keane M, Joshi A, Vresilovic E, Marcolongo M.** The role of the nucleus pulposus in neutral zone human lumbar intervertebral disc mechanics. *J Biomech.* 2008;41:2104–2111. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2008.04.037
27. **Di Pauli von Treuheim T, Torre OM, Mosley GE, Nasser P, Iatridis JC.** Measuring the neutral zone of spinal motion segments: Comparison of multiple analysis methods to quantify spinal instability. *JOR Spine.* 2020;3:e1088. DOI: 10.1002/jsp2.1088
28. **McNally DS, Adams MA.** Internal intervertebral disc mechanics as revealed by stress profilometry. *Spine.* 1992;17:66–73. DOI: 10.1097/00007632-199201000-00011
29. **McNally DS, Shackelford IM, Goodship AE, Mulholland RC.** *In vivo* stress measurement can predict pain on discography. *Spine.* 1996;21:2580–2587. DOI: 10.1097/00007632-199611150-00007
30. **Brown MD, Holmes DC, Heiner AD, Wehman KF.** Intraoperative measurement of lumbar spine motion segment stiffness. *Spine.* 2002;27:954–958. DOI: 10.1097/00007632-200205010-00014
31. **Cornaz F, Haupt S, Farshad M, Widmer J.** Real-time assessment of anteroposterior stability of spinal segments. *Eur Spine J.* 2022;31:2368–2376. DOI: 10.1007/s00586-022-07286-9
32. **McAfee PC, Eisermann L, Mullinix K.** Robot for ligament tensioning and assessment of spinal stability. *Global Spine J.* 2021;12(2 Suppl):53S–58S. DOI: 10.1177/21925682211059178
33. **Крутько А.В., Байков Е.С., Коновалов Н.А., Назаренко А.Г.** Сегментарная нестабильность позвоночника: нерешенные вопросы // Хирургия позвоночника. 2017. Т. 14, № 3. С. 74–83. [Krutko AV, Baikov ES, Kononov NA, Nazarenko AG. Segmental spinal instability: unsolved problems. Russian Journal of Spine Surgery (Khirurgiya Pozvonochnika). 2017;14(3):74-83]. DOI: 10.14531/ss2017.3.74-83

**Адрес для переписки:**

Топорский Антон Игоревич  
123423, Россия, Москва, ул. Саяма Адиля, 2/44,  
Городская клиническая больница № 67 им. Л.А. Ворохобова,  
antontoporski@mail.ru

Статья поступила в редакцию 04.10.2024

Рецензирование пройдено 12.03.2025

Подписано в печать 21.03.2025

**Address correspondence to:**

Toporskiy Anton Igorevich  
City Clinical Hospital No. 67 n.a. L.A. Vorokhobov,  
2/44 Salyama Adilya str, Moscow, 123423, Russia,  
antontoporski@mail.ru

Received 04.10.2024

Review completed 12.03.2025

Passed for printing 21.03.2025

*Дмитрий Николаевич Дзукаев, руководитель Московского спинального нейрохирургического центра, Городская клиническая больница № 67 им. Л.А. Ворохобова, Россия, 123423, Москва, ул. Саяма Адиля, 2/44, ORCID: 0000-0002-5394-7738, dzuk@mail.ru;*

*Александр Николаевич Пейкер, заведующий нейрохирургическим отделением № 1, Городская клиническая больница № 67 им. Л.А. Ворохобова, Россия, 123423, Москва, ул. Саяма Адиля, 2/44, ORCID: 0009-0008-8552-0465, apeiker@yandex.ru;*

*Антон Игоревич Топорский, врач-нейрохирург Московского спинального нейрохирургического центра, Городская клиническая больница № 67 им. Л.А. Ворохобова, Россия, 123423, Москва, ул. Саяма Адиля, 2/44, ORCID: 0009-0003-1392-7489, antontoporski@mail.ru;*

*Антон Владимирович Борзенков, заведующий нейрохирургическим отделением № 3 Московского спинального нейрохирургического центра, Городская клиническая больница № 67 им. Л.А. Ворохобова, Россия, 123423, Москва, ул. Саяма Адиля, 2/44, ORCID: 0000-0002-8367-4101, anton-borzenkov@yandex.ru;*

*Ислам Айсаяевич Музышев, врач-нейрохирург Московского спинального нейрохирургического центра, Городская клиническая больница № 67 им. Л.А. Ворохобова, Россия, 123423, Москва, ул. Саяма Адиля, 2/44, islam.muzyshev@mail.ru, ORCID: 0000-0001-8671-0246;*

*Вадим Викторович Пустовойтов, врач-нейрохирург Московского спинального нейрохирургического центра, Городская клиническая больница № 67 им. Л.А. Ворохобова, Россия, 123423, Москва, ул. Саяма Адиля, 2/44, ORCID: 0009-0005-0871-5611, PustovoytovVV@zdrav.mos.ru;*

*Сослан Таймуразович Торчинов, врач-нейрохирург Московского спинального нейрохирургического центра, Городская клиническая больница № 67 им. Л.А. Ворохобова, Россия, 123423, Москва, ул. Саяма Адиля, 2/44, ORCID: 0000-0002-6657-9006, Soslan\_torchinov@mail.ru;*

*Владимир Викторович Гулый, врач-нейрохирург Московского спинального нейрохирургического центра, Городская клиническая больница № 67 им. Л.А. Ворохобова, Россия, 123423, Москва, ул. Саяма Адиля, 2/44, eLibrary SPIN: 3700-1515, ORCID: 0000-0001-8630-4010, VladimirVG87@gmail.com.*

*Dmitriy Nikolayevich DzukaeV, Head of the Moscow Neurosurgical Spinal Center, City Clinical Hospital No. 67 n.a. L.A. Vorokhobov, 2/44 Salyama Adilya str., Moscow, 123423, Russia, ORCID: 0000-0002-5394-7738, dzuk@mail.ru;*

*Aleksandr Nikolayevich Peiker, Head of neurosurgical department No.1, Moscow Neurosurgical Spinal Center, City Clinical Hospital No. 67 n.a. L.A. Vorokhobov, 2/44 Salyama Adilya str., Moscow, 123423, Russia, ORCID: 0009-0008-8552-0465, apeiker@yandex.ru;*

*Anton Igorevich Toporskiy, neurosurgeon, Moscow Neurosurgical Spinal Center, City Clinical Hospital No. 67 n.a. L.A. Vorokhobov, 2/44 Salyama Adilya str., Moscow, 123423, Russia, ORCID: 0009-0003-1392-7489, antontoporski@mail.ru;*

*Anton Vladimirovich Borzenkov, Head of neurosurgical department No.3, Moscow Neurosurgical Spinal Center, City Clinical Hospital No. 67 n.a. L.A. Vorokhobov, 2/44 Salyama Adilya str., Moscow, 123423, Russia, ORCID: 0000-0002-8367-4101, anton-borzenkov@yandex.ru;*

*Islam Aisayevich Muzishev, neurosurgeon, Moscow Neurosurgical Spinal Center, City Clinical Hospital No. 67 n.a. L.A. Vorokhobov, 2/44 Salyama Adilya str., Moscow, 123423, Russia, ORCID: 0000-0001-8671-0246, islam.muzyshev@mail.ru;*

*Vadim Viktorovich Pustovoytov, neurosurgeon, Moscow Neurosurgical Spinal Center, City Clinical Hospital No. 67 n.a. L.A. Vorokhobov, 2/44 Salyama Adilya str., Moscow, 123423, Russia, ORCID: 0009-0005-0871-5611, PustovoytovVV@zdrav.mos.ru;*

*Soslan Taimurazovich Torchinov, neurosurgeon, Moscow Neurosurgical Spinal Center, City Clinical Hospital No. 67 n.a. L.A. Vorokhobov, 2/44 Salyama Adilya str., Moscow, 123423, Russia, ORCID: 0000-0002-6657-9006, Soslan\_torchinov@mail.ru;*

*Vladimir Viktorovich Guliy, neurosurgeon, Moscow Neurosurgical Spinal Center, City Clinical Hospital No. 67 n.a. L.A. Vorokhobov, 2/44 Salyama Adilya str., Moscow, 123423, Russia, eLibrary SPIN: 3700-1515, ORCID: 0000-0001-8630-4010, VladimirVG87@gmail.com.*