

Магнитно-резонансная томография с аксиальной нагрузкой в диагностике нарушений статики поясничного отдела позвоночника

А.В. Бажин^{1,3}, Е.А. Егорова², Д.А. Лежнев², А.Ю. Васильев², В.П. Трутень², М.В. Смысленова²

¹Государственное бюджетное учреждение здравоохранения «Городская поликлиника № 2 Департамента здравоохранения г. Москвы», г. Москва, Россия

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный медико-стоматологический университет им. А.И. Евдокимова», г. Москва, Россия

³Государственное бюджетное учреждение здравоохранения «Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы», г. Москва, Россия

Axial-loaded Magnetic Resonance Imaging in the Diagnosis of Static Disorders of the Lumbar Spine

A.V. Bazhin^{1,3}, E.A. Egorova², D.A. Lezhnev², A.Yu. Vasilyev², V.P. Truten², M.V. Smyslenova²

¹Municipal City Polyclinic № 2, Department of Healthcare of Moscow, Moscow, Russian Federation

²Moscow State University of Medicine and Dentistry named after A. I. Evdokimov, Moscow, Russian Federation

³State Budget-Funded Health Care Institution of the City of Moscow

"Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of Moscow Health Care Department", Moscow, Russian Federation

Введение. Диагностика нарушений статики позвоночника требует проведения исследования без аксиальной нагрузки и при ее воздействии. Стандартные мультисрезовая компьютерная (МСКТ) и магнитно-резонансная томографии (МРТ) ограничены исследованием пациента в положении лежа. Методики с аксиальной нагрузкой позволили расширить показания к применению высокотехнологичных методов лучевой диагностики в оценке статики поясничного отдела позвоночника. **Материалы и методы.** 124 пациентам проводилось рентгенография поясничного отдела позвоночника в прямой и боковой проекциях в положении стоя, а также МР-исследование до и во время аксиальной нагрузки. При смещениях позвонков пациентам проводилась рентгенография с функциональными пробами. Для сравнения данных использовался коэффициент корреляции Пирсона, значимость методик оценивалась при помощи расчетов показателей диагностической эффективности. **Результаты.** При аксиальной нагрузке отмечалось увеличение угла лордоза ($r = 0,93$). Показатели сколиотической деформации при МРТ с аксиальной нагрузкой соответствовали данным рентгенографии ($r = 0,89$). Диагностическая эффективность МРТ с дозированной аксиальной нагрузкой достигали: Se = 91,7 %, Sp = 89,2 %, Ac = 90,6 %, показатели МРТ в вертикальном положении несколько ниже: Se = 89,2 %, Sp = 73,9 %, Ac = 83,3 %. Листезы выявлены у 11 пациентов. Данные о нестабильности, полученные при сравнении МР-исследований до и во время аксиальной нагрузки с рентгенографией с функциональными пробами, позволили выявить их практически полное соответствие ($r = 0,88$). **Дискуссия.** МРТ с аксиальной нагрузкой способна предоставить дополнительную информацию о статике, что необходимо для оценки характера патологических изменений. МР-методики, выполняемые на низкочастотных томографах, ограничены в диагностике протяженных деформаций. МРТ с аксиальной нагрузкой может быть методом выбора, особенно при необходимости динамического контроля, ввиду отсутствия ионизирующего излучения. Использование аппаратов дозированной аксиальной нагрузки при проведении МСКТ может быть перспективным.

Ключевые слова: магнитно-резонансная томография, нарушения статики, исследование с аксиальной нагрузкой

Introduction The diagnosis of spinal statics disorders requires a study conducted both with and without axial load. Standard multislice computed tomography (MSCT) and magnetic resonance imaging (MRI) are limited to the examination of the patient in the supine position. Axial loading techniques have expanded the indications for the use of high-tech methods of radiological diagnosis in assessing the statics of the lumbar spine. **Methods** 124 patients underwent conventional radiographic examination of the lumbar spine in the frontal and lateral projections in a standing position and an MRI study before and during axial load. Radiography with functional tests was used for cases with displaced vertebrae. The Pearson correlation coefficient was used to compare the data; the significance of the methods was evaluated using calculations of diagnostic performance indicators. **Results** An increase of the angle of lordosis was noted in tests with axial load ($r = 0.93$). Indicators of scoliotic deformity obtained with MRI with axial load corresponded to X-ray data ($r = 0.89$). The diagnostic efficiency of MRI with a dosed axial load was the following: Se = 91.7 %, Sp = 89.2 %, Ac = 90.6 %; the results of MRI in the upright position were slightly lower: Se = 89.2 %, Sp = 73.9 %, Ac = 83.3 %. Spondylolisthesis was found in 11 patients. The instability data obtained by comparing MR studies before and during the axial load with radiography with functional tests revealed their almost complete correspondence ($r = 0.88$). **Discussion** Axial-loaded MRI can provide additional information on statics, which is necessary to assess the nature of pathological changes. MR techniques based on low-field tomographic systems are limited in the diagnosis of extended deformations. MRI with axial load is a method of choice, especially when dynamic monitoring is necessary, due to the absence of ionizing radiation. Axial loading of the spine in MSCT study seems promising.

Keywords: magnetic resonance imaging, static disorders, axial loading techniques

ВВЕДЕНИЕ

Деформации позвоночника как приобретенного, так и врожденного характера представляют сложную проблему с точки зрения диагностики. При планировании лечения требуется применение различных модальностей для оценки протяженности, степени и характера нарушения взаиморасположения функциональных элементов – позвоночно-двигательных сегментов. Данная информация полезна для планирования лечения и при необходимости оценки возможностей хирургиче-

ской коррекции. Наиболее объективные данные о вышеуказанных характеристиках могут быть получены с помощью методов лучевой диагностики [1].

Традиционно методом выбора в определении характеристики нарушений статики была рентгенография и все возможные ее методики, в том числе и функционального характера, т.е. исследования в положении стоя, а также с пробами при сгибании, разгибании, наклонах [2]. Недостатками данного метода, а точнее его

Магнитно-резонансная томография с аксиальной нагрузкой в диагностике нарушений статики поясничного отдела позвоночника / А.В. Бажин, Е.А. Егорова, Д.А. Лежнев, А.Ю. Васильев, В.П. Трутень, М.В. Смысленова // Гений ортопедии. 2020. Т. 26, № 3. С. 376-381. DOI 10.18019/1028-4427-2020-26-3-376-381

Bazhin A.V., Egorova E.A., Lezhnev D.A., Vasilyev A.Yu., Truten V.P., Smyslenova M.V. Axial-loaded Magnetic Resonance Imaging in the Diagnosis of Static Disorders of the Lumbar Spine. *Genij Ortopedii*, 2020, vol. 26, no 3, pp. 376-381. DOI 10.18019/1028-4427-2020-26-3-376-381

физическими особенностями, являются проекционные искажения и суммационный эффект. Эти характеристики в ряде случаев не позволяют достоверно судить о выявленных изменениях и способны привести к значительным погрешностям в измерениях.

Современные методики диагностики, использующие принципы классической рентгенографии, однозначно расширили возможности исследования позвоночника. При их выполнении возможно получение трехмерного изображения скелета, которое строится в виде компьютерной модели на основании референсных точек, вычисленных по двухплоскостным рентгенограммам [3, 4].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для изучения возможностей функциональных МР-методик проводилось исследование 124 пациентов с хроническим болевым синдромом в области поясницы. Возраст пациентов варьировал от 20 до 55 лет (женщины – 56 %, мужчины 44 %).

Перед МР-исследованиями с аксиальной нагрузкой пациентам проводилось клинико-инструментальное обследование, которое состояло из осмотра врачом клинической специальности (невролог, нейрохирург, ортопед), стандартной рентгенографии поясничного отдела позвоночника в прямой и боковой проекциях. При выявлении во время исследования смещений позвонков выполнялась рентгенография с функциональными пробами (максимальным сгибанием и разгибанием).

Исследование в вертикальном положении ($n = 60$, 48,4 %) проводилось на низкопольном (0,25 Тл) МР-томографе открытого типа G-Scan Brio (Esaote, Италия) (рис. 1, а). Методика исследования включала 2 этапа. На 1-м пациент исследовался в горизонтальном положении по стандартному протоколу. На 2-м производилась вертикализация с получением Т2-взвешенных изображений (ВИ) в 3-х плоскостях. Для получения максимально объективных данных о положении структур ПДС достигали угла $> 84^\circ$ по отношению к горизонтали. Данный угол позволял перенести основную массу тела на позвоночник и при этом сохранить минимальную опору, что необходимо для сохранения неподвижности.

Для имитации вертикального положения ($n = 64$; 51,6 %) использовался аппарат с возможностью до-

Наиболее подробное и достоверное отображение структур позвоночника можно получить при помощи МСКТ и МРТ. Однако эти методы ограничены в оценке структур скелета при функциональной нагрузке, что обусловлено конструктивными особенностями аппаратуры [5, 6, 7, 8, 9, 10].

Одним из способов решения данного вопроса была разработка низкопольных МР-томографов с возможностью вертикализации пациентов во время исследования, а также появление в клинической практике специализированных приставок, позволяющих имитировать вертикальное положение человека при исследовании лежа [11, 12, 13].

зированной аксиальной нагрузки DynaWell L-Spine (DynaWell Int. AB, Швеция), совместимый с МР- и рентгеновскими компьютерными томографами. Данный аппарат состоял из 2 элементов – жесткого основания и мягких жилетов, которые соединены между собой ремнями, расположенными по боковым поверхностям. Жилеты имели различные размеры и подбирались в соответствии с телосложением исследуемых, так как плотное их прилегание позволяло оптимально распределить нагрузку на исследуемого, тем самым снизив неприятные ощущения. В жесткое основание аппарата дозированной аксиальной нагрузки встроены весы (отдельно для каждой нижней конечности), позволяющие получить информацию об оказываемой нагрузке и оценить ее симметричность). МР-исследование проводилось на высокопольном (1,5 Тл) МР-томографе VANTAGE Atlas (Toshiba, Япония) (рис. 1, б). Методика проведения исследования включала 2 этапа. Вначале пациент исследовался без нагрузки с получением изображений по стандартному протоколу. Затем, во время воздействия дозированной аксиальной нагрузкой, получали Т2-ВИ во фронтальной, сагиттальной и аксиальной плоскостях. Согласно рекомендациям производителя и результатам многочисленных работ для адекватной имитации вертикального положения дозированная аксиальная нагрузка должна составлять 40–50 % от массы тела пациента. При этом экспозиция нагрузки до получения изображений с достоверными геометрическими характеристиками должна быть не менее 5 минут [7, 14, 15, 16].



Рис. 1. Вид магнитно-резонансного томографа с возможностью вертикализации (а), укладка пациента во время исследования с дозированной аксиальной нагрузкой (б)

По результатам исследований оценивались ось позвоночника (ее отклонение в сагиттальной и фронтальной плоскостях) по методике Cobb – Lippmann (1974); взаиморасположение тел позвонков в соответствии с модифицированной классификацией Lambl – Meyerding (1932). При определении стабильности листезов критерием был выбран показатель в 3 мм. Так, при смещении позвонков во время функциональной нагрузки более чем на 3 мм оно считалось нестабильным. Референсным методом в

оценке статики позвоночника была выбрана рентгенография в прямой и боковой проекциях, при наличии листезов – с использованием функциональных проб в положениях максимального сгибания и разгибания [16].

Для сравнения полученных в ходе рентгенографии и функциональных МР-методик данных рассчитывался коэффициент корреляции Пирсона и показатели диагностической эффективности (чувствительность, специфичность и точность).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Физиологической реакцией позвоночника на аксиальную нагрузку является увеличение угла шейного и поясничного лордозов и грудного кифоза. Данная реакция ожидаемо была отмечена у большинства пациентов ($n = 109$; 87,9 %) при функциональных МР-исследованиях поясничного отдела позвоночника как в вертикальном положении, так и при его имитации. На фоне дегенеративных изменений характер ответа поясничного отдела позвоночника на функциональную нагрузку мог быть аномальным. В 8,9 % ($n = 11$) наблюдений отмечалось уменьшение величины поясничного лордоза, в том числе с его выпрямлением и даже формированием патологического кифоза в 3,2 % ($n = 4$) (рис. 2, а – в). Изменения коррелировали с показателями, получаемыми у данных пациентов при проведении рентгенографии в вертикальном положении ($r = 0,93$).

При оценке смещений позвонков возможности МР-методик с аксиальной нагрузкой сравнивались с эталоном – стандартной рентгенографией поясничного отдела позвоночника с функциональными пробами (в положении максимального сгибания и разгибания). Листезы были выявлены у 19 (15,3 %) пациентов. У 1 (0,8 %) больного листез был лестничным – на уровне 2

тел позвонков, определялся только во время воздействия функциональной нагрузки.

Стабильные листезы или смещения с признаками гипермобильности определялись в 57,9 % ($n = 11$) наблюдений. При сравнении с данными рентгенографии с функциональными пробами показатели соответствовали друг другу в 90 % ($n = 9$), $r = 0,88$. Расхождение было выявлено в 1 (0,8 %) случае, когда при МРТ степень смещения находилась в пределах 2,5 мм (гипермобильность), а при рентгенографии достигала 3 мм (нестабильный листез).

Количество нестабильных смещений при сравнении данных рентгенографии и функциональных МР-методик соответствовали друг другу во всех наблюдениях ($n = 9$) (рис. 3, а – г). В то же время величина смещения позвонков при функциональной рентгенографии была более значимой – в 6 из 9 наблюдений.

МРТ с аксиальной нагрузкой обладала преимуществом при оценке статики позвоночника в связи с наличием высокого контраста мягких тканей. Это позволяло, в отличие от рентгенографии, оценить не только наличие деформации, но и особенности взаиморасположения тел позвонков и невралгических структур позвоночного канала.

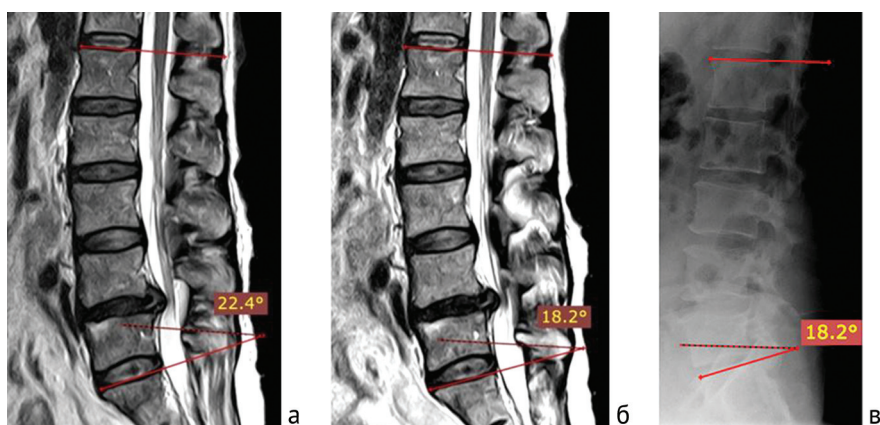


Рис. 2. МР-томограммы (Т2-ВИ) поясничного отдела позвоночника в сагиттальной плоскости: а – в положении лежа, б – во время дозированной аксиальной нагрузки; в – рентгенограмма поясничного отдела позвоночника в боковой проекции. Величина лордоза, выявленная при МРТ с функциональной нагрузкой и рентгенографии, сопоставима

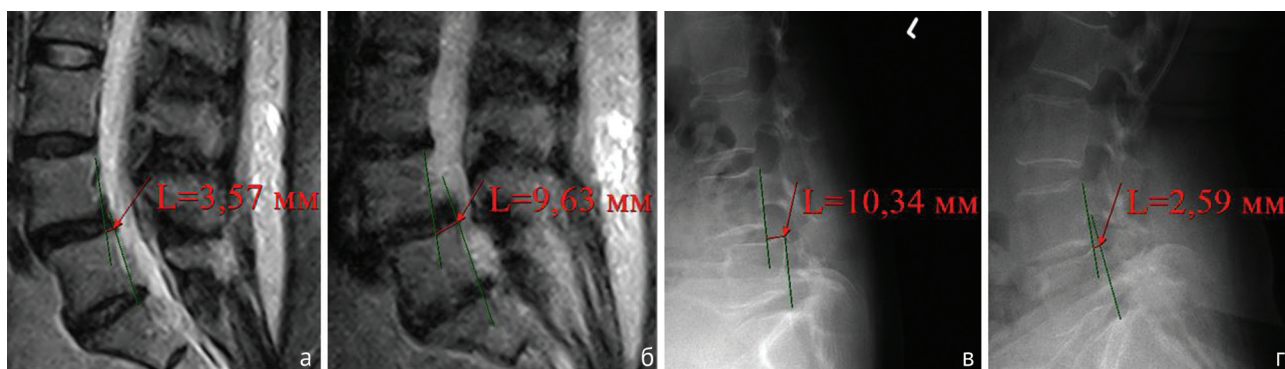


Рис. 3. МР-томограммы (Т2-ВИ) поясничного отдела позвоночника в сагиттальной плоскости: а – в положении лежа; б – в вертикальном положении. Рентгенограммы поясничного отдела позвоночника в боковой проекции: в – в положении сгибания; г – в положении разгибания. Величина смещения позвонков при функциональной нагрузке, полученная при рентгенографии и МРТ, сопоставима

Однако в ряде случаев ($n = 10$, 8,0 %) отсутствие суммационного эффекта, наоборот, затрудняло интерпретацию изображений, что связано со сложностями оценки степени торсии тел позвонков и необходимости учета величины лордоза. Последнее требовало дополнительной обработки изображений с получением мультипланарных реконструкций для более достоверной оценки деформации оси позвоночника.

Сколиотическая деформация более 5° выявлялась в 59,7 % ($n = 74$) случаев. Данные, полученные в ходе рентгенографии, выполненной в вертикальном положении, были сопоставимы с результатами функциональных методик МРТ, $r = 0,89$ (табл. 1).

Таблица 1

Величина угла сколиотической деформации при стандартной рентгенографии, выполненной в вертикальном положении, и во время проведения МРТ с функциональной нагрузкой

Метод	Величина угла сколиоза, град.	Уровень достоверности
Стандартная рентгенография	$6,1 \pm 1,5$	$p < 0,001$
МРТ с функциональной нагрузкой	$6,5 \pm 1,8$	$p < 0,001$

Сложности в оценке и значимые расхождения полученных данных возникали при сравнении выраженных деформаций позвоночника ($n = 6$, 4,8 %), которые сопровождались значительной торсией тел позвонков и латеролистезами (рис. 4, а, б).

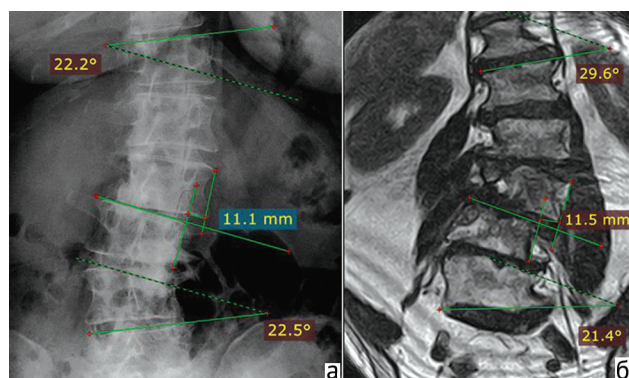


Рис. 4. Рентгенограмма поясничного отдела позвоночника в прямой проекции (а); МР-томограмма (T2-ВИ) поясничного отдела позвоночника во фронтальной плоскости (б) в вертикальном положении. Отмечается разница в величинах углов сколиотической деформации

Проблема оценки статики при деформациях позвоночника актуальна ввиду появления новых методик их коррекции и возникновения необходимости более точной и подробной оценки геометрических характеристик. Важность использования томографических методик неоспорима в предоперационной диагностике, так как позволяет более точно спланировать оперативное вмешательство [17].

Общеизвестными ограничениями рентгенографии являются выраженные суммационный и проекционный эффекты, которые снижают диагностическую эффективность полученных данных. Применение новых рентгенологических методик также до конца не решает всех проблем.

Выходом из данной ситуации является внедрение в арсенал исследований деформаций позвоночника

Для сравнения диагностической эффективности функциональных МР-методик со стандартной рентгенографией в оценке статики позвоночника были рассчитаны показатели специфичности (Sp), чувствительности (Se) и точности (Ac) (рис. 5).

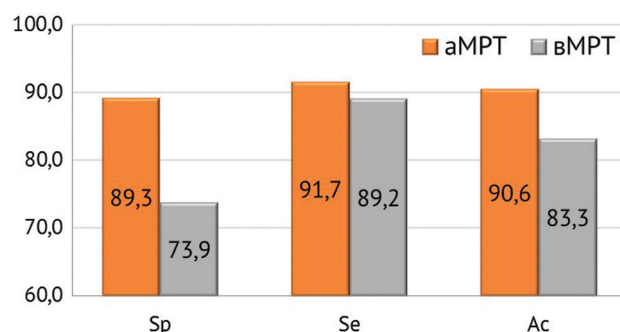


Рис. 5. Показатели диагностической эффективности МРТ с аксиальной нагрузкой (aMPT) и в вертикальном положении (вМРТ) в оценке сколиотической деформации поясничного отдела позвоночника, в %, относительно стандартной рентгенографии

Отдельной проблемой при обеих функциональных методиках во время исследования было возникновение или усиление болевого синдрома ($n = 37$). Эта проблема приводила к появлению динамических артефактов ($n = 15$), что сводило к минимуму диагностическую значимость изображений. Более того, при исследовании с имитацией вертикального положения пациент для снижения болевого синдрома мог самостоятельно уменьшить нагрузку, согнув нижние конечности. Этот факт требовал правильного инструктажа до начала исследования, а также внимательного контроля медперсоналом показателей датчиков нагрузки во время исследования.

У 17 пациентов вышесказанное потребовало коррекции нагрузки для снижения болевого синдрома. Так, при исследовании в вертикальном положении можно было уменьшать угол вертикализации и тем самым снижать аксиальную нагрузку. При имитации вертикального положения проблема была более сложной, т.к. дозированно уменьшить натяжение ремней ввиду особенностей конструкции аппарата было сложно. В то же время уменьшение нагрузки в большинстве случаев все же приводило к значимому снижению выраженности болевого синдрома с возможностью продолжения исследования.

ОБСУЖДЕНИЕ

методик лучевой диагностики без значимых эффектов суммации и проекционных искажений, на данный момент - это МСКТ и МРТ. При использовании совместно с функциональной нагрузкой они позволяют не только более точно оценить геометрию костных и мягкотканых структур, но и дать информацию об их положении при функциональной нагрузке.

В нашей работе продемонстрированы возможности технологий МРТ с применением аксиальной нагрузки. Данные методы показали себя достаточно эффективно в определении всех характеристик статики позвоночника, в том числе и выраженных, со значительными углами искривления и смещениями позвонков на фоне дегенеративных изменений.

В то же время отмечены расхождения в оценке смещений позвонков при классической рентгенографии и

функциональных МР-методиках при значительной корреляции полученных показателей. При функциональных МР-исследованиях реакция смещенных позвонков была ожидаемой: при стабильных смещениях – отсутствовала, при нестабильных прогрессировала. Данные характерные изменения также отмечались в ряде других работ [14,18, 19, 20, 21]. Судить о диагностической эффективности полученных данных не представляется возможным ввиду ограниченной выборки пациентов с данной патологией.

Несмотря на эффективность и физиологичность МР-методик с аксиальной нагрузкой были расхождения в определении стабильности листезов. Отчасти это связано с особенностями функциональных рентгенологических методик. В последнем случае при оценке стабильности используется рентгенография с функциональными пробами со сгибанием и разгибанием туловища, т.е. при максимальной нагрузке на ПДС. При проведении вышепредставленных функциональных МР-методик мы ограничены сравнением исследования до и во время нагрузки. Рентгенография – это проекционный метод, и, следовательно, получаемые показатели имеют искажения в сторону увеличения.

Еще одной из важных проблем диагностики является сколиотическая деформация позвоночника. Для определения ее угла до сих пор используется рентгенография в прямой проекции в положении стоя. МРТ с функциональными пробами при исследовании во время аксиальной нагрузки способна предоставить аналогичную информацию. Метод не связан с лучевой нагрузкой, что особенно важно учитывать у пациентов молодого возраста, которым необходимо динамическое наблюдение. По данным P. Wessberg et al. [22] и P. Knott et al. [23], величина ошибки при измерении угла сколиоза по методике Cobb–Lippmann (1974) при классической рентгенографии и функциональной МРТ сопоставимы с ошибкой при повторной экспертной оценке рентгенограмм одного пациента другим специалистом. Это же подтверждается и в нашей работе, где рассчи-

танные показатели диагностической эффективности приближаются к референтному методу.

В то же время, оценка сложных деформаций позвоночника, сопровождающихся выраженной торсией тел позвонков, может быть затруднительна по плоскостным МР-изображениям. Отчасти эта проблема может быть решена при использовании мультипланарных реконструкций.

МРТ в вертикальном положении показала себя менее эффективной, что было связано с особенностями оборудования. Томограф имеет небольшую зону однородного магнитного поля, что приводило к искажениям нормальной геометрии по краям изображения и невозможности оценки истинной дуги искривления. При МРТ с аксиальной нагрузкой практически единственным ограничением была выраженная ротация позвонков и усиление лордоза, которые нельзя было устранить с помощью построения мультипланарных реконструкций [16].

Использование МРТ в оценке сколиотической деформации может иметь преимущество, т.к. приведет к снижению лучевой нагрузки на пациентов в результате исключения из алгоритма стандартного рентгенологического исследования, что особенно важно при необходимости динамического контроля у детей. При этом можно ограничиться получением только Т2-ВИ во фронтальной плоскости, что значительно сократит время повторного исследования.

Перспективным является использование имитации вертикального положения с использованием аппаратов дозированной аксиальной нагрузки при МСКТ. Данный метод обладает более высоким пространственным разрешением, а также практически не ограничен по протяженности зоны сканирования. Более того, получив изначально изображения с изотропным вокселем при МСКТ, мы имеем возможность выполнения трехмерной и мультипланарной реконструкции, что является очень важным в оценке сложных и выраженных деформаций позвоночника.

ВЫВОДЫ

МР-методики с аксиальной нагрузкой обладают сопоставимыми по диагностической эффективности возможностями в оценке деформаций позвоночника и смещений позвонков. Методики обладают рядом преимуществ – высокий мягкотканый контраст, отсутствие суммационного эффекта, не сопрово-

ждаются лучевой нагрузкой. Все это позволяет рекомендовать МР-методики с аксиальной нагрузкой для уточнения характера статических нарушений и деформаций позвоночника при необходимости динамического наблюдения, особенно у детей и при планировании лечения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rothman-Simeone The Spine. 6th Ed. / H. Herkowitz, S. Garfin, F. Eismont, G. Bell, R. Balderston. Philadelphia: Elsevier, 2011. 2096 p.
2. Panjabi M.M. Clinical spinal instability and low back pain // J. Electromyogr. Kinesiol. 2003. Vol. 13, No 4. P. 371-379. DOI: 10.1016/s1050-6411(03)00044-0.
3. Lumbar disc height assessment: a comparative study between EOS and digital radiography / V. Freire, M. Benhamou, F. Rannou, S. Poiraudau, J.-L. Drapé, A. Feydy // ECR (European Congress of Radiology). 2012. Poster No C-1178. DOI: 10.1594/ecr2012/C-1178.
4. Assessing structural changes in axial spondyloarthritis using a low-dose biplanar imaging system / A. Moltó, V. Freire, A. Feydy, S. Paternotte, W.P. Maksymowycz, M. Benhamou, F. Rannou, M. Dougados, L. Gossec // Rheumatology (Oxford). 2014. Vol. 53, No 9. P. 1669-1675. DOI: 10.1093/rheumatology/keu143.
5. Spinal Imaging. Diagnostic Imaging of the Spine and Spinal Cord / Ed. by Van Goethem J.W.M., van den Hauwe L., Parizel P.M. Springer. 2007. 581 p.
6. Dynamic lumbar spinal stenosis: the usefulness of axial loaded MRI in preoperative evaluation / K.C. Choi, J.S. Kim, B. Jung, S.H. Lee // J. Korean Neurosurg. Soc. 2009. Vol. 46, No 3. P. 265-268. DOI: 10.3340/jkns.2009.46.3.265.
7. The narrowing of the lumbar spinal canal during loaded MRI: the effects of the disc and ligamentum flavum / T. Hansson, N. Suzuki, H. Hebelka, A. Gaulitz // Eur. Spine J. 2009. Vol. 18, No 5. P. 679-686. DOI: 10.1007/s00586-009-0919-7.
8. Kinematic evaluation of the spine: a kinetic magnetic resonance imaging study / Y. Morishita, H. Hymanson, M. Miyazaki, H.H. Zhang, W. He, G. Wu, M.H. Kong, J.C. Wang // J. Orthop. Surg. (Hong Kong). 2008. Vol. 16, No 3. P. 348-350. DOI: 10.1177/230949900801600316.
9. Routine Upright Imaging for Evaluating Degenerative Lumbar Stenosis: Incidence of Degenerative Spondylolisthesis Missed on Supine MRI / B. Segebarth, M.F. Kurd, P.H. Haug, R. Davis // J. Spinal. Disord. Tech. 2015. Vol. 28, No 10. P. 394-397. DOI: 10.1097/BSD.0000000000000205.

10. Body posture and backpack loading: an upright magnetic resonance imaging study of the adult lumbar spine / S. Shymon, A.R. Hargens, L.A. Minkoff, D.G. Chang // *Eur. Spine J.* 2014. Vol. 23, No 7. P. 1407-1413. DOI: 10.1007/s00586-014-3247-5.
11. Magnetic resonance imaging (MRI) of the lumbar spine with dedicated G-scan machine in the upright position: a retrospective study and our experience in 10 years with 4305 patients / A. Splendiani, M. Perri, G. Grattacaso, V. Di Tunno, C. Marsecano, L. Panebianco, A. Gennarelli, V. Felli, M. Varrassi, A. Barile, E. Di Cesare, C. Masciocchi, M. Gallucci // *Radiol. Med.* 2016. Vol. 121, No 1. P. 38-44. DOI: 10.1007/s11547-015-0570-9.
12. Бажин А.В., Егорова Е.А. Функциональные магнитно-резонансные исследования поясничного отдела позвоночника (обзор литературы) // *Радиология – практика.* 2015. № 4. С. 40-50.
13. Бажин А.В., Егорова Е.А. Функциональная магнитно-резонансная методика в оценке дегенеративных изменений поясничного отдела позвоночника // *Медицинский вестник МБД.* 2018. Т. 94, № 3. С. 54-59.
14. Effect of intervertebral disk degeneration on spinal stenosis during magnetic resonance imaging with axial loading / T.J. Ahn, S.H. Lee, G. Choi, Y. Ahn, W.C. Liu, H.J. Kim, H.Y. Lee // *Neurol. Med. Chir. (Tokyo).* 2009. Vol. 49, No 6. P. 242-247. DOI 10.2176/nmc.49.242.
15. Factors affecting disability and physical function in degenerative lumbar spondylolisthesis of L4-5: evaluation with axially loaded MRI / K.Y. Huang, R.M. Lin, Y.L. Lee, J.D. Li // *Eur. Spine J.* 2009. Vol. 18, No 12. P. 1851-1857. DOI: 10.1007/s00586-009-1059-9.
16. Бажин А.В. Возможности функциональных лучевых методик в исследовании дегенеративных изменений межпозвоноковых дисков поясничного отдела позвоночника: дис... канд. мед. наук. М., 2015. 140 с.
17. Губин А.В., Рябых С.О., Бурцев А.В. Ретроспективный анализ мальпозиции винтов после инструментальной коррекции деформаций грудного и поясничного отделов позвоночника // *Хирургия позвоночника.* 2015. Т. 12, № 1. С. 8-13.
18. Evaluation of intervertebral disc herniation and hypermobile intersegmental instability in symptomatic adult patients undergoing recumbent and upright MRI of the cervical or lumbosacral spines / A. Ferreira Perez, M. Garcia Isidro, E. Ayerbe, J. Castedo, J.R. Jinkins // *Eur. J. Radiol.* 2007. Vol. 62, No 3. P. 444-448.
19. Repeat upright positional magnetic resonance imaging for diagnosis of disorders underlying chronic noncancer lumbar pain / J.W. Gilbert, G.R. Wheeler, M.P. Kreft, S.P. Upadhyay, B.B. Storey, J.R. Spitalieri, G.E. Mick, R.A. Gibbs // *J. Manipulative Physiol. Ther.* 2008. Vol. 31, No 8. P. 627-631. DOI: 10.1016/j.jmpt.2008.09.005.
20. Spondylolysis and spondylolisthesis: prevalence of different forms of instability and clinical implications / P. Niggemann, J. Kuchta, H.K. Beyer, D. Grosskurth, T. Schulze, K.S. Delank // *Spine.* 2011. Vol. 36, No 22. P. E1463-E1468. DOI: 10.1097/BRS.0b013e3181d47a0e.
21. Differences between supine and orthostatic positions in facet joint fluid and spondylolisthesis at lumbar-spine MRI / C. Ottonello, A. Giardino, P. Giuliani, C. Messina, G. Di Leo, F. Sardanelli // *Insights Imag.* 2015. No 6. P. 368.
22. Wessberg P., Danielson B.I., Willén J. Comparison of Cobb angles in idiopathic scoliosis on standing radiographs and supine axially loaded MRI // *Spine.* 2006. Vol. 31, No 26. P. 3039-3044. DOI: 10.1097/01.brs.0000249513.91050.80.
23. Comparing axial loaded MRI to standing radiographs in the evaluation of AIS / P. Knott, S. Mardjetko, R. Kim, T. Cotter, F. Techy, M. Rollet // *Scoliosis.* 2010. Vol. 5, No Suppl. 1. P. O12. DOI: 10.1186/1748-7161-5-S1-O12.

Рукопись поступила 21.10.2019

Сведения об авторах:

1. Бажин Александр Владимирович, к. м. н., ГБУЗ г. Москвы «Городская поликлиника № 2 Департамента здравоохранения г. Москвы», г. Москва, Россия, ГБУЗ г. Москвы «Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы», г. Москва, Россия, ORCID ID 0000-0003-3198-1334, Researcher ID (WOS): P-6322-2017, SPIN-код: 6122-5786, Email: avbazine@yandex.ru
2. Егорова Елена Алексеевна, д. м. н., профессор, ФГБОУ ВО МГМСУ им. А.И. Евдокимова Минздрава России, г. Москва, Россия, SPIN-код: 3771-3676, Researcher ID (WOS): O-7304-2017, Author ID (Scopus): 57196761433, ORCID: 0000-0003-2580-5692, Email: tylsit@mail.ru
3. Лежнев Дмитрий Анатольевич, д. м. н., профессор, ФГБОУ ВО МГМСУ им. А.И. Евдокимова Минздрава России, г. Москва, Россия, SPIN-код: 6648-9613, Researcher ID (WOS): B-6854-2018, Author ID (Scopus): 24468778600, ORCID: 0000-0002-7163-2553
4. Васильев Александр Юрьевич, д. м. н., профессор, член-корреспондент РАН, ФГБОУ ВО МГМСУ им. А.И. Евдокимова Минздрава России, г. Москва, Россия, SPINкод: 3519-0938, AuthorID (РИНЦ): 242494, Researcher ID (WOS): O-8862-2017, Author ID (Scopus): 7402046692, ORCID: 0000-0002-0635-4438
5. Трутень Виктор Павлович, д. м. н., профессор, ФГБОУ ВО МГМСУ им. А.И. Евдокимова Минздрава России, г. Москва, Россия
6. Смысленова Маргарита Витальевна, д. м. н., профессор, ФГБОУ ВО МГМСУ им. А.И. Евдокимова Минздрава России, г. Москва, Россия

Information about the authors:

1. Alexandr V. Bazhin, M.D., Ph.D., Municipal City Polyclinic № 2, Department of Healthcare of Moscow, Moscow, Russian Federation, State Budget-Funded Health Care Institution of the City of Moscow "Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of Moscow Health Care Department", Moscow, Russian Federation, ORCID ID 0000-0003-3198-1334, Researcher ID (WOS): P-6322-2017, Email: avbazine@yandex.ru
2. Elena A. Egorova, M.D., Ph.D., Professor, Moscow State University of Medicine and Dentistry named after Evdokimov, Moscow, Russian Federation, Researcher ID (WOS): O-7304-2017, Author ID (Scopus): 57196761433, ORCID: 0000-0003-2580-5692, Email: tylsit@mail.ru
3. Dmitry A. Lezhnev, M.D., Ph.D., Professor, Moscow State University of Medicine and Dentistry named after Evdokimov, Moscow, Russian Federation, Researcher ID (WOS): B-6854-2018, Author ID (Scopus): 24468778600, ORCID: 0000-0002-7163-2553
4. Aleksandr Yu. Vasilyev, M.D., Ph.D., Professor, Corresponding Member RAS, Moscow State University of Medicine and Dentistry named after Evdokimov, Moscow, Russian Federation, Researcher ID (WOS): O-8862-2017, Author ID (Scopus): 7402046692, ORCID: 0000-0002-0635-4438
5. Viktor P. Truten, M.D., Ph.D., Professor, Moscow State University of Medicine and Dentistry named after Evdokimov, Moscow, Russian Federation
6. Margarita V. Smyslenova, M.D., Ph.D., Professor, Moscow State University of Medicine and Dentistry named after Evdokimov, Moscow, Russian Federation