

DOI: <https://doi.org/10.17816/vto322858>

Дифференциальная диагностика очаговых изменений позвоночника с использованием стандартного и радиомического анализа: ретроспективное исследование

Н.И. Сергеев, П.М. Котляров, В.А. Солодкий

Российский научный центр рентгенорадиологии, Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование. При обнаружении очаговых изменений в костях врач-рентгенолог должен исключить или подтвердить наличие метастатического характера поражения. Хотя семиотика метастатических и неонкологических изменений по данным магнитно-резонансной томографии (МРТ) достаточно известна, на практике могут встречаться различные сочетания сигнальных характеристик, отражающие течение хронических параллельных процессов, значительно затрудняющих интерпретацию. Использование методов компьютерного анализа изображений имеет большие перспективы и способно повысить диагностическую точность стандартных методов визуализации.

Цель. Повысить точность диагностики рентгенологических заключений очаговых изменений позвоночника с помощью дополнительной оценки изображений алгоритмами компьютерного анализа.

Материалы и методы. Обследованы 30 пациентов, 15 из которых — с метастатическими изменениями в костях вследствие рака молочной железы и ещё 15 — с очаговыми изменениями в костях неонкологической природы. Компьютерный анализ очаговых изменений тел позвонков проведён по T₁ВИ, T₂ВИ, STIR MPT-последовательностям. Для компьютерного анализа использовали оператор сложности изображения Арцела, гистограммное распределение яркостей.

Результаты. Установлены основные дифференциальные показатели для гемангиомы, условно-нормальных участков костного мозга и метастатических очагов. Оператор сложности изображений Арцела для гемангиомы составил ~0,07, для метастазов (mts) — ~0,05, для позвонка — ~0,04. Гистограммный оператор яркостей для гемангиомы составил ~1,12, для mts — ~0,94. Отличие показателей между собой оказалось равным около 20–25% между гемангиомой и костным мозгом и 35% — между mts и костным мозгом, что позволяет эффективно использовать перечисленные показатели вместе с другими маркерами.

Заключение. Полученные в работе с помощью радиомического анализа критерии дифференциальной диагностики показали значимые различия между очаговыми изменениями в позвонках различной этиологии. С математической точки зрения они носят рекомендательный характер, а в центре системы принятия решений остаётся врач с его опытом.

Ключевые слова: метастазы в кости; онкология; магнитно-резонансная томография; радиомика.

Как цитировать:

Сергеев Н.И., Котляров П.М., Солодкий В.А. Дифференциальная диагностика очаговых изменений позвоночника с использованием стандартного и радиомического анализа: ретроспективное исследование // Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова. 2023. Т. 30, № 1. С. 77–85. DOI: <https://doi.org/10.17816/vto322858>

DOI: <https://doi.org/10.17816/vto322858>

Differential diagnosis of focal changes in the spine using standard and radiomic analysis

Nikolay I. Sergeev, Petr M. Kotlyarov, Vladimir A. Solodky

Russian Scientific Center of Roentgenoradiology, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: If focal changes in the bones are detected, the radiologist must exclude or confirm the presence of a metastatic lesion. Although the semiotics of metastatic and non-oncological changes according to magnetic resonance imaging (MRI) data is well known, in practice, there may be various combinations of their characteristics that are influenced by other chronic diseases and parallel processes, which significantly complicate interpretation. The use of computer image analysis methods has great prospects and can improve the diagnostic accuracy of standard imaging methods.

OBJECTIVE: To improve the accuracy of diagnosing radiographic findings of focal changes in the spine using additional image evaluation by computer analysis algorithms.

MATERIALS AND METHODS: Thirty patients were examined, and 15 of them had metastatic bone lesions from breast cancer, and 15 had focal changes in the spine of a non-oncological nature. Computer analysis of focal changes in the vertebral bodies was conducted according to T₁WI, T₂WI, and STIR MRI sequences. For the computer analysis, the operator of the complexity of the image Arzela and histogram distribution of brightness were used.

RESULTS: The main differential indicators for hemangioma, conditionally normal areas of the bone marrow, and metastatic foci have been established. The Arzela data image complexity operator was approximately 0.07 for hemangioma, approximately 0.05 for metastases (mts), and approximately 0.04 for vertebrae. The brightness histogram operator was approximately 1.12 for haemangioma and approximately 0.94 for mts. Regarding the difference between indicators, the difference is 20%–25%, between hemangioma and bone marrow and 35% between mts and bone marrow, which make it possible to effectively use these indicators together with other markers.

CONCLUSION: The criteria for differential diagnosis obtained using radiomic analysis showed significant differences between focal changes in the vertebrae of various etiologies. From a mathematical point of view, they are advisory, and the doctor with experience remains at the center of the decision-making system.

Keywords: bone metastases; oncology; MRI; radiomics.

To cite this article:

Sergeev NI, Kotlyarov PM, Solodky VA. Differential diagnosis of focal changes in the spine using standard and radiomic analysis. *N.N. Priorov Journal of Traumatology and Orthopedics*. 2023;30(1):77–85. DOI: <https://doi.org/10.17816/vto322858>

ВВЕДЕНИЕ

Статистически метастазы (mts) в кости определяются примерно у 40% больных раковыми заболеваниями с различной частотой встречаемости в зависимости от типа и локализации первичной опухоли [1]. Современные методы медицинской визуализации, такие как мультиспиральная компьютерная, магнитно-резонансная (МРТ) и позитронно-эмиссионная томография, обладают высокими показателями диагностической эффективности, однако вариабельность течения mts в кости определяет свойственные каждому методу преимущества и недостатки [2, 3]. Современные алгоритмы анализа изображений направлены на улучшение трактовки полученных результатов исследований. Состояние пациента с точки зрения МР-изображения можно описать различными способами и с разной степенью детализации изучаемого объекта, одним из которых является попиксельный анализ изображений при различных патологиях и модальностях [4, 5]. Здесь можно выделить большой спектр методов, которые в основном сводятся к тем или иным статистикам: статистике яркости, гистограммам, распределению групп пикселей, т.е. текстуры. Ввиду такой большой вариабельности значений, несмотря на попытки систематизировать и унифицировать подход, на данном этапе существует множество различных методик анализа, при использовании которых зачастую получают противоречивые или недостоверные результаты [6]. Постепенно, по мере совершенствования способов распознавания объекта (болезни), включается всё большее число признаков вплоть до прямого распознавания объектов человеком или нейронной сетью [7, 8].

Цель исследования — повысить точность диагностики рентгенологических заключений очаговых изменений позвоночника с помощью дополнительной оценки изображений алгоритмами компьютерного анализа.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Дизайн исследования

Проведено одноцентровое выборочное ретроспективное исследование.

Критерии соответствия

МРТ-данные пациентов с очаговыми изменениями в позвоночнике были независимо проанализированы двумя рентгенологами с опытом работы более 10 лет каждый. При совпадении заключений рентгенологов результаты изображений были разделены на 3 группы (гемангиомы, mts, нормальный костный мозг), после чего подвергнуты радиомическому анализу с выделением характерных для каждой группы признаков.

Условия проведения

Ретроспективный анализ МР-изображений осуществляли на рабочей станции «ПО Видар» (Россия),

анализ изображений с помощью специализированного программного обеспечения — на «Radiomica Applata» (Германия). Первичные МР-исследования пациентов выполняли с помощью стандартных, утверждённых в ФГБУ РНЦПР (Москва), протоколов.

Методы оценки целевых показателей

Методы исследования

Диагностический алгоритм включал использование МРТ на аппаратах различных производителей («Aera», Siemens, Германия; «Atlas», Canon, Япония) с напряжённостью магнитного поля в 1,5 Тл. Всем онкологическим пациентам в рамках протокола обследования была выполнена остеосцинтиграфия. Для повышения достоверности все исследования были независимо оценены 2 рентгенологами, опыт работы которых составляет более 10 лет.

Методы анализа

Ключевой МР-последовательностью для радиомического анализа выступали T_2 -взвешенное изображение (T_2 ВИ), в качестве вспомогательных были использованы T_1 -взвешенное изображение (T_1 ВИ) и STIR (inversion-recovery). После нормализации изображений был выполнен попиксельный анализ с оценкой формы, анализа гистограмм распределения яркостей изображения [9]. При использовании указанных алгоритмов важным параметром считается достаточная гомогенность объекта, однако это требование является сильным, но не всегда применимым для многих приложений. Именно поэтому, как и следует в диагностике, а особенно в дифференциальной, требуется подключать дополнительные сведения об объекте, ограничивая применимость [10].

На рабочем столе специализированного программного обеспечения «Radiomica Applata» (частная разработка IT-исследователей) выделяли изучаемый объект в режиме гистограммы, которая графически отображает частоту встречаемости яркостей в шкале серого и позволяет задать верхнее и нижнее пороговое значение. Например, при анализе гемангиомы, если взять соответствующее окно яркостей на гистограмме, можно выделить слабоотличимые объекты гомогенной структуры, как это сделано на приведённом рисунке для гемангиомы (рис. 1).

В качестве следующего расширения описания объекта использовали ангиогенез mts рака молочной железы (РМЖ), обладающий дополнительным свойством — хаотичным патологическим ростом сети сосудов в сравнении с нормальной тканью. Этим определяется сложность изображения: объект представляется хаотичнее, т.е. менее сложным, чем другой, если сумма границ частей его составляющих меньше, чем у другого, в тех же условиях измерения. Сумма границ вычисляется действием градиентного оператора на исследуемое изображение, т.е. уже функцией пар пикселей (оператор Арцела).

Для распознавания формы и использования других модальностей применяли нейронные сети с архитектурой

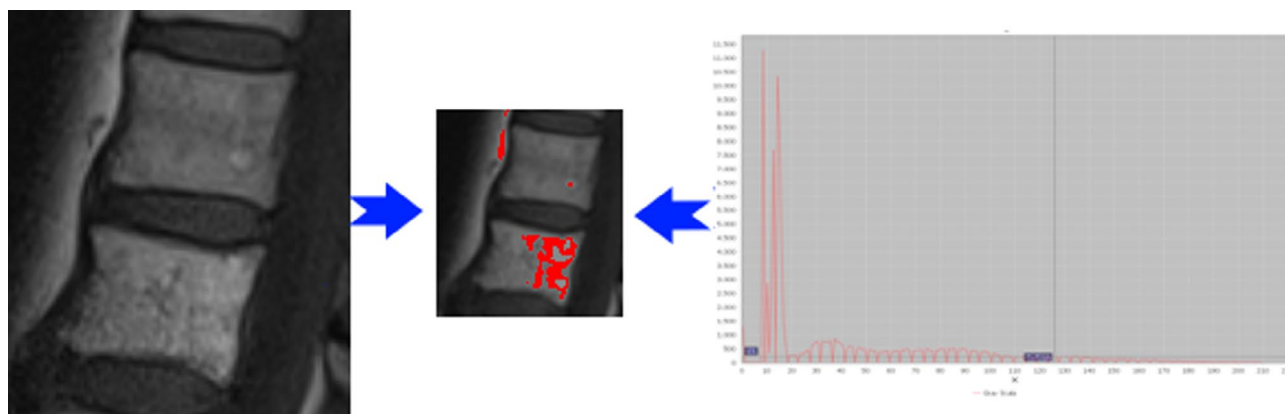


Рис. 1. T₁ tse sag-гемангиома, выделена с помощью окна на гистограмме яркостей, которая показана в правой части рисунка.

Fig. 1. T₁ tse sag-hemangioma, highlighted with a window on the brightness histogram, which is shown on the right side of the figure.

многослойного перцептрона при входном векторе 100×100 [11]. Для описанных примеров не требуется анализа на разделимость множества обучающих изображений (рис. 2).

В других случаях с этой целью использовали самообучающуюся сеть Кохонена. Для тренировки сетей были взяты следующие группы основных изображений:

- гемангиома (hema);
- нормальная ткань (norm);
- метастазы (mts).

В качестве дополнительных групп были использованы спондилолистез (spon) и участки жировой дистрофии в позвонках или так называемые жировые депозиты — локальные очаговые изменения с высоким содержанием жира на фоне неизменного костного мозга (lipr).

Этическая экспертиза

Не проводилась.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Участники (объекты) исследования

В работу были включены результаты обследования 30 больных с наличием очаговых изменений в телах позвонков грудного и поясничного отдела. У 15 пациентов присутствовал верифицированный морфологически РМЖ с наличием метастатических очаговых изменений в костях. Ещё у 15 пациентов отсутствовал подтверждённый морфологически диагноз злокачественного новообразования, обследование они проходили в связи с неспецифическими жалобами «боль или дискомфорт в позвоночнике», при этом в исследование были взяты наиболее диагностически показательные очаги. У этой категории больных определялись гемангиомы тел позвонков ($n=7$), участки субхондрального отёка в телах позвонков ($n=5$, у 3 из которых наблюдали явления спондилостенноза). Также для сравнения анализировали

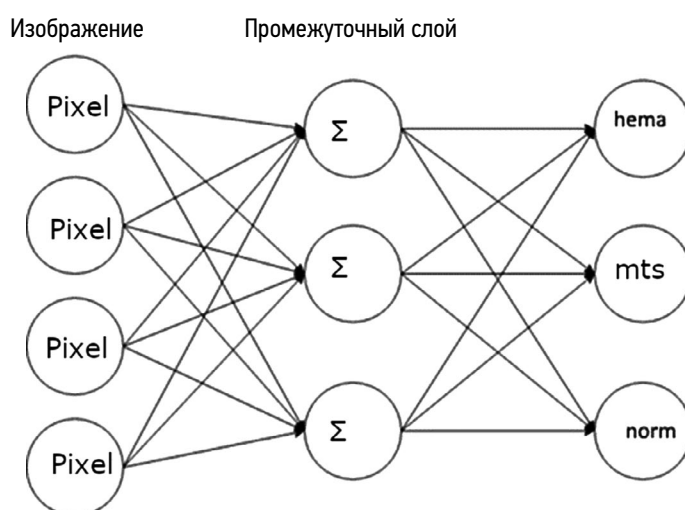


Рис. 2. Многослойный перцептрон для распознавания в T₂.

Примечание (здесь и на рис. 3). hema — гемангиома, mts — метастаз, norm — нормальная ткань.

Fig. 2. Multilayer perceptron for recognition in T₂.

Note (here and in Fig. 3). hema — hemangioma, mts — metastasis, norm — normal tissue.

участки локальной отграниченной жировой дегенерации костного мозга ($n=5$), и у 5 человек были измерены участки неизменных позвонков. Общее число измерений в работе составило 40.

Основные результаты исследования

При анализе интенсивностей в изучаемых объектах были получены значения соотношений светлых, средних и тёмных интенсивностей. Тёмные участки определялись как микрофокусы или так называемые кальдеры. В качестве «гистограммной» оценки выбрано отношение средней яркости объекта (гемангиомы, mts или участка условно-неизменённого костного мозга) к яркости

окружающей костной ткани тела позвонка в шкале серого. Результаты радиомического анализа гемангиом представлены в табл. 1, анализа метастатических очагов РМЖ с максимально близкими клиническими характеристиками — в табл. 2. В таблице жёлтым обозначены микрофокусы с яркостью, существенно больше средней по RoI (Region of Interest, зона интереса), красным — ISO, т.е. изоинтенсивный окружению сигнал, зелёным — участки с пониженной интенсивностью в сравнении со средней.


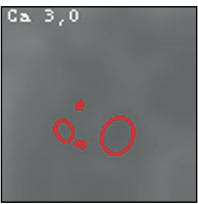

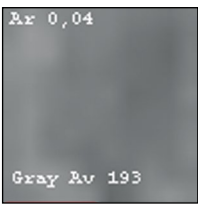
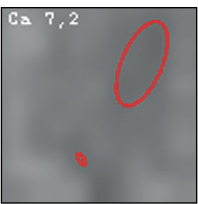


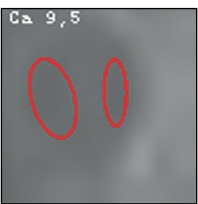


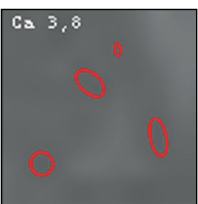


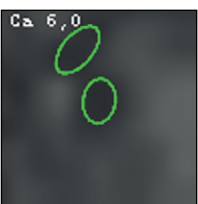

Установлено, что гемангиома проявляет себя повышенной яркостью в сравнении с нормальной тканью с отношением между 1,11 и 1,27 во взятых случаях, а также

Таблица 1. Результаты радиомического анализа гемангиом в зависимости от используемых операторов в режиме T₂WI sag

Table 1. Results of radiomic analysis of hemangiomas depending on the operators used in T₂WI sag mode

Описание RoI	Арцела RoI	Кальдеры RoI	Арцела окружения	RoI / окружение в сером
Гемангиома-1, T ₂ -sagittal	Ar 0,06 Gray 128	Ca 4,1	Ar 0,05 Gray 101	1,27
Гемангиома-1, T ₂ -сагиттал, субтотал	Ar 0,06 Gray Av 157	Ca 3,1	Ar 0,03 Gray Av 135	1,16
Гемангиома-2, T ₂ -сагиттал	Ar 0,04 Gray Av 155	Ca 6,6	Ar 0,02 Gray Av 134	1,16
Гемангиома, T ₂ -сагиттал	Ar 0,04 Gray Av 137	Ca 2,2	Ar 0,03 Gray Av 123	1,11
Жировая дистрофия, T ₂ -сагиттал	Ar 0,04 Gray Av 132	Ca 4,5	Ar 0,03 Gray Av 123	1,07
Гемангиома-2, T ₂ -сагиттал	Ar 0,06 Gray Av 185	Ca 5,8	Ar 0,04 Gray Av 157	1,17

Таблица 2. Результаты T_2WI радиомического анализа метастазов рака молочной железы (РМЖ)**Table 2.** Results of T_2WI radiomic analysis of breast cancer (PMЖ) metastases

Метастаз РМЖ 1				0,915
Метастаз РМЖ 2				0,965
Метастаз РМЖ 3				0,945
Метастаз РМЖ 4				0,88
Метастаз РМЖ				0,98

повышенной структурированностью (множественные ISO-микрофокусы) и повышенной сложностью (Арцела) к нормальной ткани. Приведены также случаи жировой дистрофии, основным отличием которой, в сравнении с гемангиомой, является окружение. Наши параметры (статистика интенсивностей, сложность рисунка, наличие микрофокусов, которые могут и не присутствовать вовсе) не отражают окружения и режима съёмки (подавление жира, например) и являются, таким образом, только необходимыми, но недостаточными.

Как видно из табл. 2, метастазы РМЖ проявляют себя пониженной яркостью в сравнении с нормальной тканью на ТВИ с отношением примерно 0,9. Кроме того, отмечено некоторое повышение сложности изображения. Кальдера также отчётливо повышена и варьирует от ISO до затемнённой, что выражено в % к общей площади снимка. По результатам исследования установлены основные дифференциальные показатели для гемангиомы,

условно-нормальных участков костного мозга и метастатических очагов. Оператор сложности изображений Арцела для гемангиомы составил ~0,07, для mts — ~0,05, для позвонка — ~0,04. Гистограммный оператор яркостей для гемангиомы составил ~1,12, для mts — ~0,94. Отличие показателей между собой оказалось равным около 20–25% между гемангиомой и костным мозгом и 35% — между mts и костным мозгом, что позволяет эффективно использовать перечисленные показатели вместе с другими маркерами.

На рис. 3 представлен результат распознавания объекта с рис. 1 (см. разд. «Материалы и методы», гистограмма). Мы видим, что значение Арцела превосходит такое на «нормальной» сопредельной ткани (крайнее слева изображение), что характерно для гемангиомы. Кроме того, отношение средней интенсивности к «нормальной» ткани, равное 1,15, также характерно для гемангиомы. Указаны условные вероятности отождествления объекта,

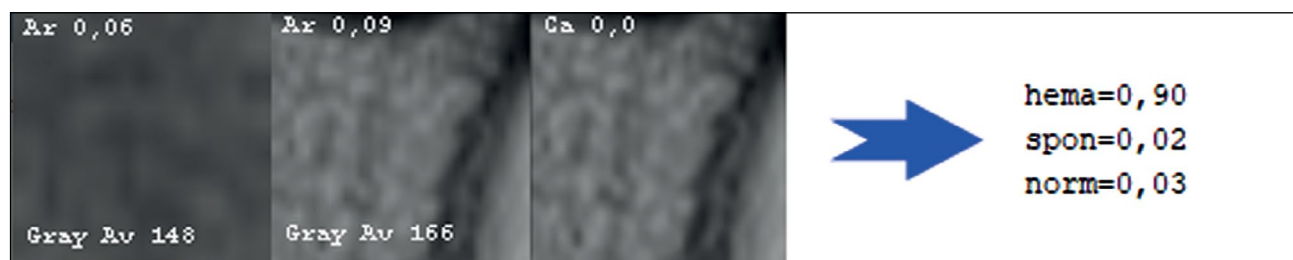


Рис. 3. Результаты анализа гемангиомы оператором сложности рисунка Арцела.

Fig. 3. The results of the analysis of hemangioma by the Artzel drawing complexity operator.

из которых следует, что гемангиома распознана с условной вероятностью 0,9 по форме.

Далее в качестве контрольного измерения нами был проведён анализ тех же параметров в МР-последовательности STIR, которая считается важным диагностическим компонентом в дифференциальной диагностике очаговых изменений позвоночника. Здесь гемангиома также проявила себя повышенной яркостью в сравнении с нормальной тканью с отношением между 1,02 и 1,24 во взятых случаях. Важным установленным критерием стала повышенная структурированность и, следовательно, повышенная сложность оператора Арцела по отношению к нормальной ткани.

Использованные операторы анализа изображений не продемонстрировали значительных различий дифференциальных признаков представленных наблюдений отёка и жирового депозита позвонка. Вероятно, это связано с параллельно идущими процессами: так, на фоне субкортикального перитрабекулярного отёка определяются участки жировой дистрофии, имеющей сниженный сигнал в STIR, а также неравномерные зоны субкортикального остеосклероза (рис. 4).

ОБСУЖДЕНИЕ

Обсуждение основного результата исследования

Методики компьютерного анализа изображений — радиомика, текстурный анализ, CAD (computer aid system) и другие — имеют огромные перспективы, а некоторые решения уже применяют на практике, например, при скрининге очаговых изменений в лёгких, прогнозировании результатов лечения опухолей головного мозга, непосредственной оценке эффективности лечения метастазов РМЖ и др. [12–14]. Хотя проведённое нами исследование показало достаточно высокую эффективность в разграничении доброкачественных и злокачественных очаговых изменений позвоночника, это можно объяснить в том числе тем, что в нашей работе были проанализированы наиболее характерные с рентгенологической точки зрения клинические примеры. На практике наибольшую сложность для врача-рентгенолога при оценке костей составляют несколько параллельно идущих хронических процессов, когда изменения могут

накладываться друг на друга. Повышение диагностической эффективности метода заключается в перекрёстном анализе различных последовательностей и операторов, поиске новых радиомических маркёров изображений, что требует дальнейшего исследования и большего числа наблюдений.

Ограничения исследования

Для повышения достоверности полученных результатов требуются большее число наблюдений и статистический анализ полученных результатов. Некоторая погрешность измерений может зависеть от разницы фильтров изображений, реализованных на аппаратах различных производителей.

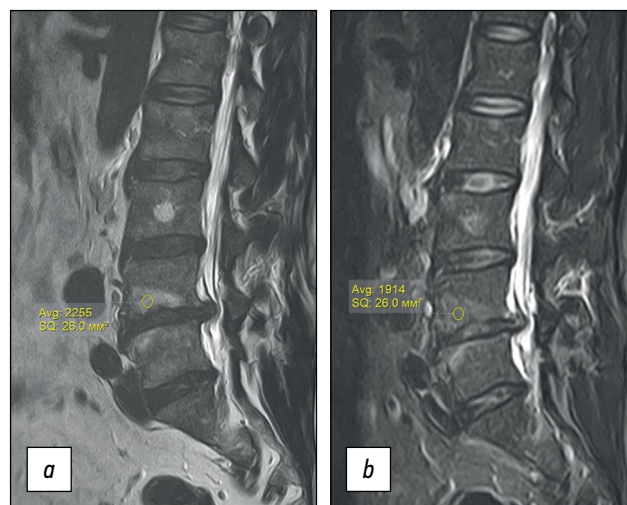


Рис. 4. МРТ поясничного отдела позвоночника в сагиттальной проекции. T₂ВИ, дегенеративно-дистрофические изменения у пациента без онкологического анамнеза. а) Определяются зоны неоднородного субкортикального отёка в телах позвонков L_{IV}, L_V на фоне грыжи межпозвоночного диска. б) В режиме STIR степень выраженности отёка представляется сниженной по отношению к T₂ВИ за счёт участков жировой дистрофии и субкортикального склероза.

Fig. 4. MRI of the lumbar spine in the sagittal projection. T₂WI, degenerative-dystrophic changes in a patient without an oncological history. а) Zones of heterogeneous subcortical edema are determined in the bodies of the vertebrae L_{IV}, L_V against the background of a herniated disc. б) In the STIR mode, the severity of edema appears to be reduced in relation to T₂WI due to areas of fatty degeneration and subcortical sclerosis.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Продemonстрированные в работе критерии дифференциальной диагностики, в том числе данные, полученные с помощью нейронных сетей, являются необходимыми, но не достаточными с математической точки зрения, носят рекомендательный характер. В центре системы принятия решений остаётся врач с его опытом.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО / ADDITIONAL INFO

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение

исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Author's contribution. Thereby, all authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

Источник финансирования. Не указан.

Funding source. Not specified.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Padalkar P., Tow B. Predictors of survival in surgically treated patients of spinal metastasis // *Indian J Orthop.* 2011. Vol. 45, N 4. P. 307–313. doi: 10.4103/0019-5413.82333
2. Сергеев Н.И., Фомин Д.К., Котляров П.М., Солодкий В.А. Сравнительное исследование возможностей ОФЭКТ/КТ и магнитно-резонансной томографии всего тела в диагностике костных метастазов // *Вестник Российского научного центра рентгено-радиологии.* 2015. Т. 15, № 3. С. 8.
3. Haraldsen A., Bluhme H., Røhl L., et al. Single photon emission computed tomography (SPECT) and SPECT/low-dose computerized tomography did not increase sensitivity or specificity compared to planar bone scintigraphy for detection of bone metastases in advanced breast cancer // *Clin Physiol Funct Imaging.* 2016. Vol. 36, N 1. P. 40–46. doi: 10.1111/cpf.12191
4. Иозефи Д.Я., Сергеев Н.И., Солодкий В.А., Винидченко М.А. Возможности текстурного анализа изображений (коэффициента структурной гетерогенности и карт исчисляемого коэффициента диффузии) в дифференциальной диагностике метастатического поражения костей по данным магнитно-резонансной томографии // *Вестник Российского научного центра рентгено-радиологии.* 2022. Т. 22, № 3. С. 1–17.
5. Tian Z., Chen C., Fan Y., et al. Glioblastoma and Anaplastic Astrocytoma: Differentiation Using MRI Texture Analysis // *Front Oncol.* 2019. N 9. P. 876. doi: 10.3389/fonc.2019.00876
6. Литвин А.А., Буркин Д.А., Кропинов А.А., Парамзин Ф.Н. Радиомика и анализ текстур цифровых изображений в онкологии (обзор) // *Современные технологии в медицине.* 2021. Т. 13, № 2. С. 97–104. doi: 10.17691/stm2021.13.2.11
7. Özgül H.A., Akin I.B., Mutlu U., Balci A. Diagnostic value of machine learning-based computed tomography texture analysis

for differentiating multiple myeloma from osteolytic metastatic bone lesions in the peripheral skeleton // *Skeletal Radiol.* 2023. doi: 10.1007/s00256-023-04333-4. Epub ahead of print.

- 8. Park H.J., Park B., Lee S.S. Radiomics and Deep Learning: Hepatic Applications // *Korean J Radiol.* 2020. Vol. 21, N 4. P. 387–401. doi: 10.3348/kjr.2019.0752
- 9. Shinohara R.T., Sweeney E.M., Goldsmith J., et al. Statistical normalization techniques for magnetic resonance imaging // *Neuroimage Clin.* 2014. N 6. P. 9–19. doi: 10.1016/j.nicl.2014.08.008
- 10. Pencheva T.D. Hochaufgelöste MRT zur Quantifizierung veränderter trabekulärer Knochen-Architektur bei Patientinnen mit und ohne Mammakarzinom und osteoporotischer Wirbelkörper-Fraktur: dissertation. München: Universitätsbibliothek der TU München, 2013. Available from: <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1129206/1129206.pdf>. Accessed: 14.05.2023.
- 11. Steinhauer V., Steinhauer L. Neuroph and DL4J // *Java Magazine.* 2021. N 6. P. 79–82.
- 12. Морозов С.П., Кокина Д.Ю., Павлов Н.А., и др. Клинические аспекты применения искусственного интеллекта для интерпретации рентгенограмм органов грудной клетки // *Туберкулез и болезни легких.* 2021. Т. 99, № 4. С. 58–64. doi: 10.21292/2075-1230-2021-99-4-58-64
- 13. Ye J., Huang H., Jiang W., et al. Tumor Grade and Overall Survival Prediction of Gliomas Using Radiomics // *Scientific Programming.* 2021. Vol. 2021. Article ID 9913466. doi: 10.1155/2021/9913466
- 14. Штайнгауз В., Сергеев Н.И. Радиомика при раке молочной железы: использование глубокого машинного анализа МРТ-изображений метастатического поражения позвоночника // *Современные технологии в медицине.* 2022. Т. 14, № 2. С. 16. doi: 10.17691/stm2022.14.2.02

REFERENCES

1. Padalkar P., Tow B. Predictors of survival in surgically treated patients of spinal metastasis. *Indian J Orthop.* 2011;45(4):307–313. doi: 10.4103/0019-5413.82333
2. Sergeev NI, Fomin DK, Kotlyarov PM, Solodkiy VA. Comparative study of the possibilities of SPECT/CT and whole body MRI in the

diagnosis of bone metastases. *Vestnik of the Russian Scientific Center of Roentgenoradiology.* 2015;15(3):8. (In Russ).

- 3. Haraldsen A, Bluhme H, Røhl L, et al. Single photon emission computed tomography (SPECT) and SPECT/low-dose computerized tomography did not increase sensitivity or specificity compared

to planar bone scintigraphy for detection of bone metastases in advanced breast cancer. *Clin Physiol Funct Imaging*. 2016;36(1):40–46. doi: 10.1111/cpf.12191

4. Iosefi DYa, Sergeev N, Solodkiy VA, Vinidchenko MA. Possibilities of textural analysis of images (structural heterogeneity coefficient and maps of the apparent diffusion coefficient) for differential diagnosis of metastatic bone lesions according to magnetic resonance imaging. *Vestnik of the Russian Scientific Center of Roentgenoradiology*. 2022;22(3):1–17. (In Russ).

5. Tian Z, Chen C, Fan Y, et al. Glioblastoma and Anaplastic Astrocytoma: Differentiation Using MRI Texture Analysis. *Front Oncol*. 2019;9:876. doi: 10.3389/fonc.2019.00876

6. Litvin AA, Burkin DA, Kropinov AA, Paramzin FN. Radiomics and Digital Image Texture Analysis in Oncology (Review). *Sovrem Tekhnologii Med*. 2021;13(2):97–104. (In Russ). doi: 10.17691/stm2021.13.2.11

7. Özgül HA, Akin IB, Mutlu U, Balci A. Diagnostic value of machine learning-based computed tomography texture analysis for differentiating multiple myeloma from osteolytic metastatic bone lesions in the peripheral skeleton. *Skeletal Radiol*. 2023. doi: 10.1007/s00256-023-04333-4. Epub ahead of print.

8. Park HJ, Park B, Lee SS. Radiomics and Deep Learning: Hepatic Applications. *Korean J Radiol*. 2020;21(4):387–401. doi: 10.3348/kjr.2019.0752

9. Shinohara RT, Sweeney EM, Goldsmith J, et al. Statistical normalization techniques for magnetic resonance imaging. *Neuroimage Clin*. 2014;6:9–19. doi: 10.1016/j.nicl.2014.08.008

10. Pencheva TD. *Hochaufgelöste MRT zur Quantifizierung veränderter trabekulärer Knochen-Architektur bei Patientinnen mit und ohne Mammakarzinom und osteoporotischer Wirbelkörper-Fraktur* [dissertation]. München: Universitätsbibliothek der TU München, 2013. Available from: <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1129206/1129206.pdf>. Accessed: 14.05.2023. (In German).

11. Steinhauer V, Steinhauer L. Neuroph and DL4J. *Java Magazine*. 2021;6:79–82.

12. Morozov SP, Kokina DYu, Pavlov NA, et al. Clinical aspects of using artificial intelligence for the interpretation of chest X-rays. *Tuberculosis and Lung Diseases*. 2021;99(4):58–64. (In Russ). doi: 10.21292/2075-1230-2021-99-4-58-64

13. Ye J, Huang H, Jiang W, et al. Tumor Grade and Overall Survival Prediction of Gliomas Using Radiomics. *Scientific Programming*. 2021;2021:9913466. doi: 10.1155/2021/9913466

14. Steinhauer V, Sergeev NI. Radiomics in Breast Cancer: In-Depth Machine Analysis of MR Images of Metastatic Spine Lesion. *Sovrem Tekhnologii Med*. 2022;14(2):16. doi: 10.17691/stm2022.14.2.02

ОБ АВТОРАХ

* **Сергеев Николай Иванович**, д.м.н.,

ведущий научный сотрудник;

адрес: Россия, 117485, Москва, ул. Профсоюзная, д. 86;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4147-1928>;

eLibrary SPIN: 2408-6502; e-mail: sergeevnickolay@yandex.ru

Котляров Петр Михайлович, д.м.н., профессор;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1940-9175>;

eLibrary SPIN: 1781-2199; e-mail: marnad@list.ru

Солодкий Владимир Алексеевич, д.м.н., профессор, академик РАН;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1641-6452>;

eLibrary SPIN: 9556-6556; e-mail: director@mcrr.ru

AUTHORS' INFO

* **Nikolai I. Sergeev**, MD, Dr. Sci. (Med.),

leading researcher;

address: 86 Profsoyuznaya Str., 117485, Moscow, Russia;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4147-1928>;

eLibrary SPIN: 2408-6502; e-mail: sergeevnickolay@yandex.ru

Petr M. Kotlyarov, MD, Dr. Sci. (Med.), Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1940-9175>;

eLibrary SPIN: 1781-2199; e-mail: marnad@list.ru

Vladimir A. Solodkiy, MD, Dr. Sci. (Med.), Prof., Academician of RAS;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1641-6452>;

eLibrary SPIN: 9556-6556; e-mail: director@mcrr.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author