



ISSN 1607-0763 (Print); ISSN 2408-9516 (Online)
<https://doi.org/10.24835/1607-0763-1472>

Исследование диагностической эффективности выявления метастазов в печени с использованием T1-взвешенного контрастного исследования с эффектом переноса намагниченности

© Санников М.Ю.^{1*}, Бородин О.Ю.^{1, 2}

¹ ОГАУЗ «Томский областной онкологический диспансер»; 634009 Томск, пр. Ленина, 115, Российская Федерация

² ФГБОУ ВО «Сибирский государственный медицинский университет» Минздрава России; 634050 Томск, Московский тракт, д. 2, Российская Федерация

Цель исследования: оценить диагностические возможности выявления метастатических очагов на постконтрастных изображениях при использовании эффекта переноса намагниченности с применением короткого липоспецифического преднасыщающего импульса.

Материал и методы. Материалом исследования являлись изображения динамической контрастной МРТ органов брюшной полости с метастатическим поражением печени. Параметры преднасыщающего импульса: $\Delta f = -210$ Гц, $FA = 600^\circ$. Для каждого очага рассчитывали коэффициент контраста (КК) по формуле: $KK = ((I_{\text{очаг}} - I_{\text{печень}}) / I_{\text{печень}}) \cdot 100\%$. Васкуляризацию оценивали по шкале из трех категорий: гиповаскулярный, изоваскулярный и гипervasкулярный. Пороговые значения каждой категории рассчитывали с помощью кластерного анализа. Для оценки чувствительности выявления очаги были разделены на группы по размеру: 1-я – от 5 до 10 мм; 2-я – от 10 до 20 мм. Статистическую обработку результатов выполняли при помощи критериев Манна–Уитни, Вилкоксона, Кохрена и Мак-Немара.

Результаты. В ходе клинического исследования получены неоднородные по полу и возрасту группы пациентов в зависимости от характера васкуляризации очагов в печени при анализе артериальной фазы динамического контрастного усиления (ДКУ): гипervasкулярные ($n = 14$) и гиповаскулярные ($n = 38$), которым суммарно выполнено 52 исследования, так как у одного пациента был динамический контроль. Выявлено пороговое значение для группы гипervasкулярных метастазов: $KK > 49,6\%$. В 1-й группе (от 5 до 10 мм) чувствительность выявления очагов на постконтрастных изображениях T1-TSE-MTC составила 47,7%. Во 2-й группе диагностика очагов размером от 10 мм и более между постконтрастными изображениями T1-TSE-MTC и всеми фазами ДКУ статистически значимых различий не выявила ($p < 0,0001$), а чувствительность составила 100%.

Выводы. 1. По данным кластерного анализа T1-взвешенное исследование на основе быстрого спинного эха с эффектом переноса намагниченности (T1-TSE-MTC) позволяет дифференцировать гипervasкулярные метастазы от переходных и гиповаскулярных ($p < 0,05$).

2. Контрастность гипervasкулярных метастазов в постконтрастной фазе на изображениях T1-TSE-MTC значимо не отличается от артериальной фазы ДКУ ($p > 0,05$).

3. Выявлена высокая чувствительность к усилению парамагнетиками в низких концентрациях на изображениях T1-TSE-MTC, которая снижает контрастность гиповаскулярных метастатических очагов размерами от 5 до 10 мм со значимым снижением их выявления в сравнении с ДКУ ($p < 0,05$), а при размерах от 10 до 20 мм без значимых различий с ДКУ ($p > 0,05$).

Ключевые слова: печень; метастазы; МРТ; перенос намагниченности

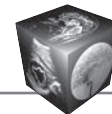
Авторы подтверждают отсутствие конфликтов интересов.

Для цитирования: Санников М.Ю., Бородин О.Ю. Исследование диагностической эффективности выявления метастазов в печени с использованием T1-взвешенного контрастного исследования с эффектом переноса намагниченности. *Медицинская визуализация*. 2025; 29 (1): 62–70.
<https://doi.org/10.24835/1607-0763-1472>

Поступила в редакцию: 16.04.2024.

Принята к печати: 22.09.2024.

Опубликована online: 17.01.2025.



Study of diagnostic efficacy in detecting liver metastases using T1-weighted contrast-enhanced studies with magnetization transfer contrast effect

© Maxim Yu. Sannikov^{1*}, Oleg Yu. Borodin^{1, 2}

¹ Tomsk Regional Oncology Dispensary; 115, Lenin prospekt, Tomsk 634009, Russian Federation

² Siberian State Medical University; 2, Moskovskii trakt, Tomsk 634050, Russian Federation

Objective: to evaluate the diagnostic capabilities of detecting metastatic lesions on post-contrast images using magnetization transfer contrast with a short fat-suppressed presaturation pulse.

Materials and methods. The study material consisted of dynamic contrast-enhanced MR images of abdominal organs with metastatic liver involvement. Parameters of the pre-saturation pulse: $\Delta f = -210$ Hz, $FA = 600^\circ$. Contrast ratio (CR) was calculated for each focus using a formula: $CR = ((I_{foci} - I_{liver}) / I_{liver}) \cdot 100\%$. Vascularization was assessed on a scale of 3 categories: hypovascular, isovascular, and hypervascular. Threshold values for each category were calculated using cluster analysis. To assess the sensitivity of focus detection, they were divided into groups by size: Group 1 – from 5 mm to 10 mm; Group 2 – from 10 mm to 20 mm. Statistical analysis of the results was performed using the Mann-Whitney, Wilcoxon, Cochran, and McNemar criteria.

Results. In the course of the clinical study, heterogeneous groups of patients were obtained in terms of gender and age depending on the nature of vascularization of liver foci during analysis of the arterial phase of DCE: hypervascular ($n = 14$) and hypovascular ($n = 38$), with a total of 52 studies conducted, as one patient had dynamic control. The threshold value for the group of hypervascular metastases was identified as $CR > 49.6\%$. In Group 1 (5 mm to 10 mm), the sensitivity of detecting foci on post-contrast images T-TSE-MTC was 47.7%. In Group 2, there were no statistically significant differences between the diagnosis of foci sized 10 mm or larger on post-contrast images T1-TSE-MTC and all phases of DCE ($p < 0.0001$), with a sensitivity of 100%.

Conclusions. 1. According to cluster analysis, T1-weighted study based on fast spin echo with magnetization transfer contrast (T1-TSE-MTC) allows differentiation of hypervascular metastases from transitional and hypovascular ($p < 0.05$).

2. The contrast of hypervascular metastases in the post-contrast phase on T1-TSE-MTC images does not significantly differ from the arterial phase of dynamic contrast enhancement (DCE) ($p > 0.05$).

3. A high sensitivity to enhancement by paramagnetics at low concentrations on T1-TSE-MTC images was revealed, which reduces the contrast of hypovascular metastatic foci sized 5 to 10 mm with a significant decrease in their detection compared to DCE ($p < 0.05$), while for sizes 10 to 20 mm, no significant differences with DCE were found ($p > 0.05$).

Keywords: liver; metastases; MRI; magnetization transfer

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest. The study had no sponsorship.

For citation: Sannikov M.Yu., Borodin O.Yu. Study of diagnostic efficacy in detecting liver metastases using T1-weighted contrast-enhanced studies with magnetization transfer contrast effect. *Medical Visualization*. 2025; 29 (1): 62–70. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1472>

Received: 16.04.2024.

Accepted for publication: 22.09.2024.

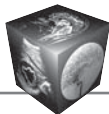
Published online: 17.01.2025.

Введение

Метастазы в печени обнаруживаются у 25–50% пациентов с раком, что делает печень вторым по частоте поражения местом после лимфоузлов. Современные контрастные препараты увеличивают чувствительность магнитно-резонансной томографии (МРТ), особенно для очагов менее 10 мм, по сравнению с компьютерной томографией (КТ) [1–7]. Наивысший уровень достоверности в диагностике очагов более 1 см обеспечивается четырехфазной КТ и динамической МРТ [8]. По Барселонской классификации к очень ранней стадии (BCLC 0) относится опухоль размером ме-

нее 2 см, что подчеркивает важность улучшения контрастности при МРТ для очагов размером от 1 до 2 см.

Характер сосудистой васкуляризации метастатических очагов зависит от гистологического типа первичного рака и оценивается с помощью динамического контрастного усиления (ДКУ) в артериальную фазу. Это позволяет анализировать ответ на лечение [9]. Также существует изоваскулярный тип метастазов, не определяемый в артериальную фазу ДКУ, характерный для опухолей толстой кишки, щитовидной железы и эндометрия, а также у пациентов на химиотерапии [10].



Одним из способов увеличения контрастности очагов является использование жироподавляющих техник на основе эффекта переноса намагниченности в T1- и T2-взвешенных последовательностях [11–14]. Однако данные по этой технике ограничены и не дают ясных клинических рекомендаций. Недостаточно исследований о преднасыщающем импульсе для подавления жирового сигнала, а также по эффекту переноса намагниченности при отрицательных значениях частоты смещения [10, 15]. Не проводилось также клиническое изучение характера васкуляризации метастазов печени с использованием T1-взвешенных изображений с этой техникой.

Цель исследования: оценить диагностические возможности выявления метастатических очагов на постконтрастных изображениях при использовании эффекта переноса намагниченности с применением короткого липоспецифического преднасыщающего импульса.

Материал и методы

Материалом послужили 52 МР-изображения органов брюшной полости с применением неспецифических гадолинийсодержащих контрастных препаратов с подтвержденными динамическим наблюдением в МРТ, КТ и УЗИ метастазами в печени из первичных опухолей различной локализации.

Клинические исследования проводились на высокопольном МР-томографе Toshiba Titan Octave с напряженностью магнитного поля 1,5 Тл с амплитудой градиентной системы 30 мТл/м и скоростью изменения напряженности магнитного поля 50 мТл/м/мс.

Мультипараметрическое сканирование органов брюшной полости с неспецифическим контрастным усилением включало в себя стандартный протокол исследования: T2-TSE, T2 TSE FatSat, T1 GR (FE_dual) в фазе и противофазе, диффузионно-взвешенные изображения, а также ДКУ с получением артериальной, венозной и смешанной фаз (T1-3DFFE) на фоне болюсного введения парамагнетика в дозе 0,1 ммоль/кг массы пациента. Экспериментальная T1-взвешенная импульсная последовательность на основе 2D-TSE с применением эффекта переноса намагниченности (T1-TSE-MTC) выполнялась со следующими параметрами преднасыщающего импульса: $df = -200$ Hz – смещение частоты, $FA = 600^\circ$ – угол отклонения.

Каждый метастатический очаг в печени оценивался последовательно в каждой фазе ДКУ и на изображениях T1-TSE-MTC с расчетом коэффициента контраста (KK) по формуле:

$$KK = ((I_{\text{очаг}} - I_{\text{печень}}) / I_{\text{печень}}) \cdot 100\%,$$

где $I_{\text{очаг}}$ – интенсивность изображения солидной части очага вторичных изменений, $I_{\text{печень}}$ – интенсивность прилегающей паренхимы печени вокруг очага вторичных изменений после внутривенного контрастирования.

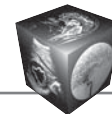
Для оценки васкуляризации метастатических очагов нами использована шкала из трех категорий на основе сравнения интенсивности очага относительно окружающей ткани печени в артериальную фазу ДКУ: гиповаскулярный (гипоинтенсивный или изоинтенсивный), гипervasкулярный (гиперинтенсивный). Для определения пороговых значений васкуляризации метастазов на изображениях T1-TSE-MTC провели кластерный анализ значений KK с разделением на 3 категории: гиповаскулярный, изоваскулярный и гипervasкулярный.

Оценка чувствительности выявления метастатических очагов на изображениях с переносом намагниченности проводилась относительно “золотого стандарта” диагностики очаговой патологии на основе изображений ДКУ. По результатам каждой фазы ДКУ в области печени оценивались очаги по длинному размеру и делились на группы: 1-я группа – от 5 до 10 мм; 2-я группа – от 10 до 20 мм. Все очаги, выявленные при ДКУ, принимались за “истину”. Качественная оценка выявления очаговых образований на изображениях T1-TSE-MTC относительно результатов ДКУ ранжировалась дихотомически: 1 – если очаг четко визуализировался и 0 – если очаг не визуализировался.

Обработка полученных данных осуществлялась в программе RadiAnt DICOM Viewer 4.2.1. В области метастатического очага обводилась зона интереса (ROI) не менее 0,3 см² и она выбиралась таким образом, чтоб исключить попадание некротических масс и кистозного компонента.

Статистическую обработку результатов выполняли при помощи программ SPSS 17.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, США) и MedCalc 12.1.14.0 (MedCalc Software, Mariakerke, Бельгия). При описании количественных показателей использовали медиану (Me) и межквартильные интервалы (25-й и 75-й процентиля) для совокупностей, не подчинявшихся закону нормального распределения. Достоверность межгрупповых различий величин оценивали при помощи непараметрического критерия Манна–Уитни. Для оценки различий зависимых совокупностей использовали парный критерий Вилкоксона. Для оценки выявляемости метастатических очагов применяли критерии Кохрена и Мак-Немара.

В связи с отсутствием истинно отрицательных и ложноположительных результатов диагностическая оценка выявления метастатических очагов на изображениях с переносом намагниченности



проводилась только с расчетом чувствительности по формуле:

$$\text{Чувствительность} = \text{ИП} / (\text{ИП} + \text{ЛО}) \cdot 100\%,$$

где ИП – количество истинно положительных результатов, ЛО – количество ложноотрицательных результатов. За ИП-результат принималась отчетливая визуализация очага на трех из четырех фаз ДКУ, ЛО-результат – отсутствие или нечеткая визуализация очага на одной из фаз ДКУ и на последовательности с эффектом переноса намагниченности.

Во всех процедурах статистического анализа изменения считались достоверными при уровне значимости $p < 0,05$.

Клиническое исследование было одобрено локальным этическим комитетом НИИ кардиологии филиала ТНИМЦ РАН (протокол №150 от 16 ноября 2016 г.).

Результаты исследования

В ходе клинического исследования получены неоднородные по полу и возрасту группы пациентов в зависимости от характера васкуляризации очагов в печени при анализе артериальной фазы ДКУ (по Braga L. и соавт., 2004): гипervasкулярные ($n = 14$) и гиповаскулярные ($n = 38$).

При сравнении коэффициентов контрастности в фазы ДКУ и в постконтрастную фазу T1-TSE-MTC независимых групп пациентов с гипervasкулярными и гиповаскулярными метастазами выявлено наличие статистически значимых различий КК при ДКУ в артериальную, венозную и смешанную

фазы, а также на изображениях с эффектом переноса намагниченности (критерий Манна–Уитни, $p < 0,001$). В нативную фазу ДКУ статистически значимые различия между подгруппами пациентов с гипо- и гипervasкулярными очагами не выявлены ($p = 0,16$), в артериальную фазу ДКУ хорошо видны высокие положительные значения в случае гипervasкулярных метастазов и низкие отрицательные значения у гиповаскулярных (рис. 1а). Вместе с тем на постконтрастных T1-взвешенных изображениях (ВИ) с эффектом переноса намагниченности (рис. 1б) определяется повышение контрастности гиповаскулярных метастазов выше 0, но значительно ниже гипervasкулярных ($p = 0,0008$), что позволяет предположить возможность дифференциальной диагностики характера васкуляризации метастазов.

Проведен кластерный анализ коэффициентов контраста с разделением на 3 группы васкуляризации метастазов: гиповаскулярные, переходные, гипervasкулярные (рис. 2).

При выполнении ROC-анализа получено пороговое значение КК $> 49,6$ диагностики гипervasкулярных метастазов (чувствительность – 60,8%; специфичность – 100%; рис. 3).

При неспецифическом контрастном усилении у пациентов с гиповаскулярными метастазами на изображениях ДКУ (рис. 4б, в, г) наблюдается слабое или изоинтенсивное накопление парамагнетика по периферии и в области внутренних перегородок, не отличающееся от контрастного усиления паренхимы печени. На T1ВИ с эффектом переноса намагниченности (T1-TSE-MTC) наблю-

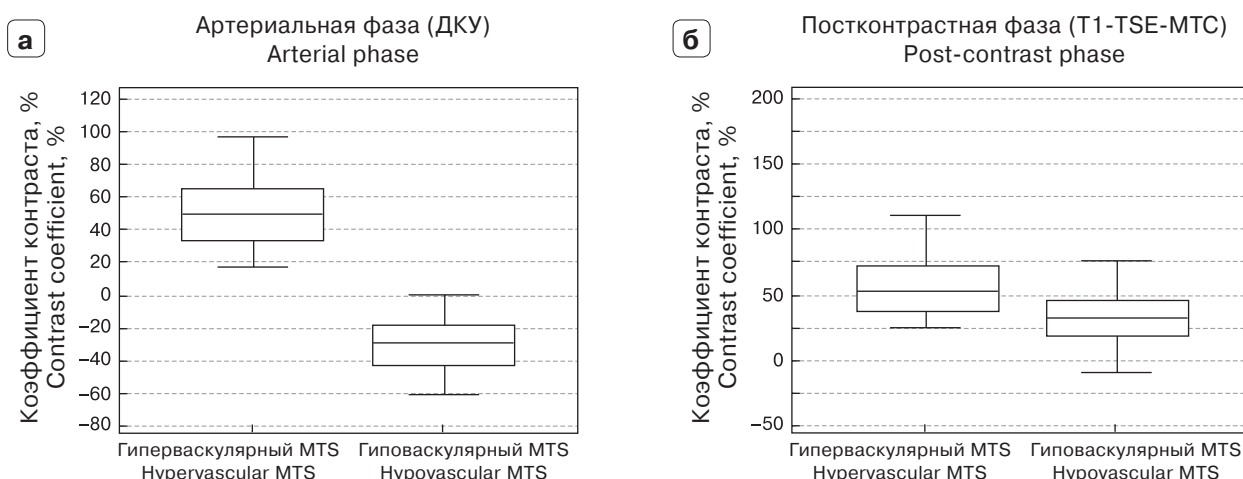


Рис. 1. Графики сравнения коэффициента контраста между гипervasкулярными и гиповаскулярными метастазами (MTS) в артериальную (а) и в постконтрастную фазу (б).

Fig. 1. Graphs comparing the contrast coefficient between hypervasкулярными and гиповаскулярными metastases (MTS) in the arterial phase (а) and in the post-contrast phase (б).

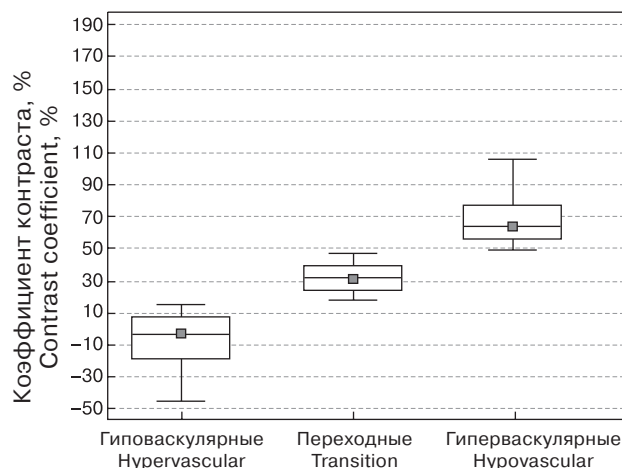


Рис. 2. Диаграмма значений коэффициента контраста на T1ВИ с эффектом переноса намагниченности (T1-TSE-MTC) после кластеризации характера васкуляризации метастазов печени: гиповаскулярных, переходных и гиперваскулярных.

Fig. 2. Diagram of contrast coefficient values on T1-weighted images with magnetization transfer effect (T1-TSE-MTC) after clustering the vascularization pattern of liver metastases: hypovascular, transitional, and hypervascular.

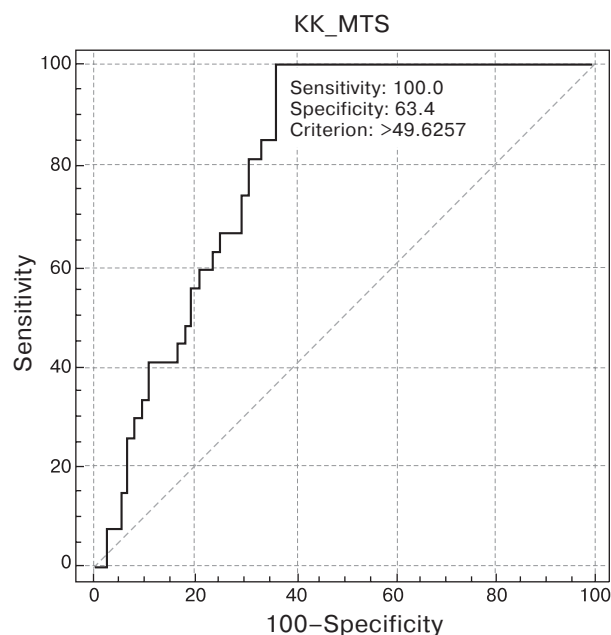


Рис. 3. ROC-анализ дифференциальной диагностики характера васкуляризации очаговых изменений в печени после проведения кластеризации: AUC = 0,805, $p < 0,0001$.

Fig. 3. ROC analysis of differential diagnosis of the vascularization pattern of focal liver lesions after clustering: AUC = 0.805, $p < 0.0001$.

дается более интенсивное контрастное усиление гиповаскулярных очагов по их периферии (рис. 4д).

При статистическом анализе коэффициентов контрастности гиповаскулярных метастазов (табл. 1) наблюдается низкое отрицательное значение во все фазы ДКУ без признаков значимых различий ($p > 0,05$), а при парном сравнении с постконтрастной фазой на основе T1-TSE-MTC выявля-

ны высокое положительное значение контрастности очага и его достоверные различия при парном сравнении с каждой фазой ДКУ ($p < 0,0001$).

У пациентов с гиперваскулярными метастазами при ДКУ наблюдается высокоинтенсивное накопление парамагнетика в артериальную фазу по периферии очага (рис. 5). На постконтрастном T1ВИ (T1-TSE-MTC) на фоне подавленного

Таблица 1. Коэффициенты контрастности гиповаскулярных метастазов при ДКУ и на постконтрастных T1ВИ с эффектом переноса намагниченности (T1-TSE-MTC)

Table 1. Contrast enhancement coefficients of hypovascular metastases during dynamic contrast-enhanced imaging and on post-contrast T1 weighted images with magnetization transfer effect (T1-TSE-MTC)

Фазы контрастирования ДКУ Phases of dynamic contrast enhancement	Me, %	(Q25%;Q75%)	Различия с постконтрастной фазой Differences with the post-contrast phase
Нативная / Native	-37.4	(-43.2; -28.0)	$p < 0.0001$
Артериальная / Arterial	-29.1	(-42.8; -19.1)	$p < 0.0001$
Венозная / Venous	-40.4	(-49.0; -22.9)	$p < 0.0001$
Смешанная / Mixed	-30.3	(-43.5; -21.1)	$p < 0.0001$
Постконтрастная (T1-TSE-MTC) Post-contrast (T1-TSE-MTC)	31.9	(16.6; 44.4)	

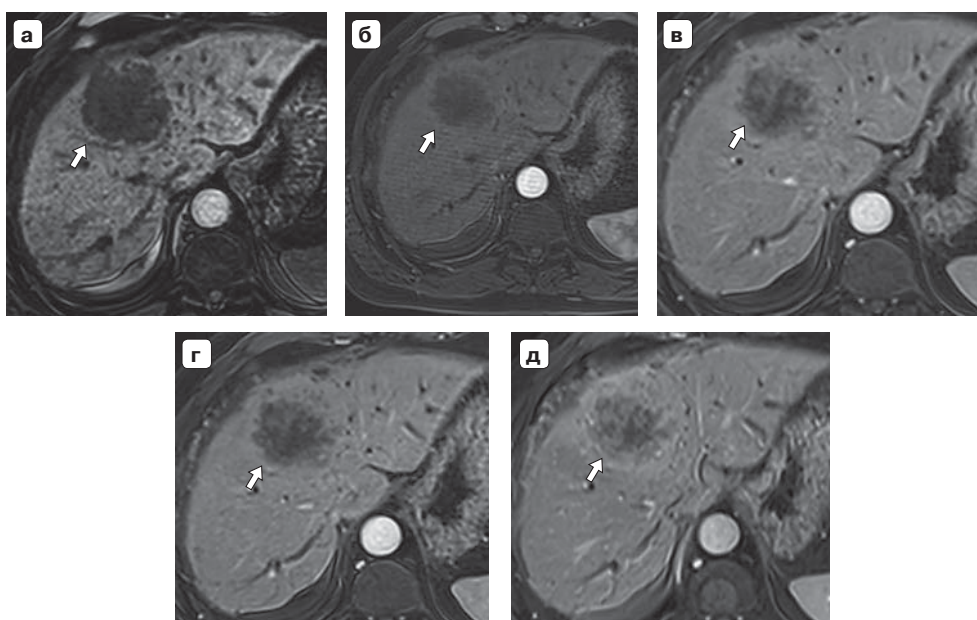
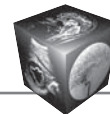


Рис. 4. Клиническое наблюдение пациента К., 55 лет. Динамическое контрастное усиление и последовательность с переносом намагниченности. Метастазы рака желудка (стрелки). **а** – нативная фаза; **б** – артериальная фаза; **в** – венозная фаза; **г** – смешанная фаза; **д** – T1-TSE-MTC.

Fig. 4. Clinical case of patient K., 55 years old. Dynamic contrast enhancement and magnetic resonance transfer sequence. Gastric cancer metastases (arrows). **a** – native phase; **б** – arterial phase; **в** – venous phase; **г** – mixed phase; **д** – T1-TSE-MTS.

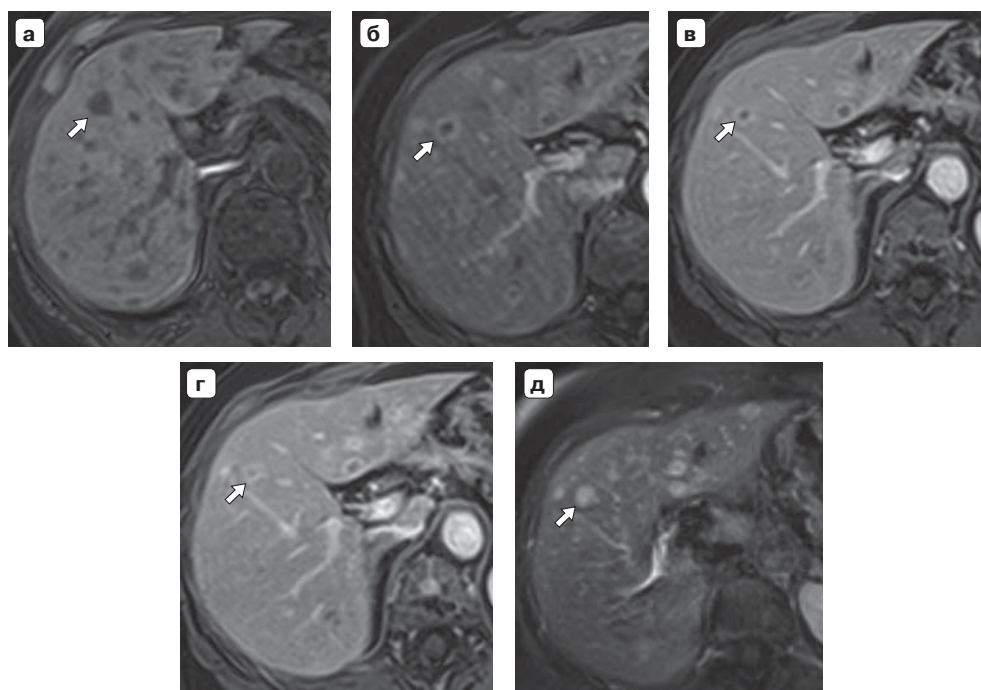


Рис. 5. Клиническое наблюдение пациентки Ж., 61 год. Метастазы рака молочной железы в печень (стрелки). Неспецифическое динамическое контрастное усиление гипervasкулярных очагов печени и постконтрастное T1ВИ с эффектом переноса намагниченности. **а** – нативная фаза; **б** – артериальная фаза; **в** – венозная фаза; **г** – смешанная фаза; **д** – T1-TSE-MTC.

Fig. 5. Clinical case of patient Zh., 61 years old. Metastases of breast cancer in the liver (arrow). Nonspecific dynamic contrast enhancement of hypervasкулярных очагов печени и постконтрастное T1 weighted imaging with magnetization transfer effect. **a** – native phase; **б** – arterial phase; **в** – venous phase; **г** – mixed phase; **д** – T1-TSE-MTC.

**Таблица 2.** Коэффициенты контрастности гиперваскулярных метастазов при ДКУ и на постконтрастных T1ВИ с эффектом переноса намагниченности (T1-TSE-MTC)**Table 2.** Contrast coefficients of hypervascular metastases in DCE and in post-contrast T1-MRI with magnetization transfer effect (T1-TSE-MTC)

Фазы контрастирования Phases of dynamic contrast enhancement	Me, %	(Q25%;Q75%)	Различия с постконтрастной фазой Differences with the post-contrast phase
Нативная / Native	–28.0	(–40.2; –14.0)	$p < 0.0001$
Артериальная / Arterial	48.8	(33.4; 65.5)	$p = 0.95$
Венозная / Venous	13.3	(0.2; 21.1)	$p < 0.0001$
Смешанная / Mixed	14.4	(–2.8; 25.2)	$p < 0.0001$
Постконтрастная (T1-TSE-MTC) Post-contrast(T1-TSE-MTC)	50.6	(37.3; 71.0)	

MP-сигнала от интактной ткани печени контрастные очаги визуализируются еще более интенсивными не только по периферии, но также отмечается контрастное усиление в области центральных отделов метастазов (рис. 5д).

При парном сравнении КК изображений метастатических очагов в каждую фазу ДКУ с постконтрастным T1-TSE-MTC (табл. 2) выявлены статистически значимые различия нативной, венозной и смешанной фаз ($p < 0,0001$), а в артериальную фазу различий не выявлено ($p = 0,95$).

Для оценки чувствительности выявляемости очагов между ДКУ и постконтрастными изображениями T1-TSE-MTC сравнивались 2 группы по размерам очагов: 1-я группа – от 5 до 10 мм ($n = 107$) и 2-я группа – от 10 до 20 мм ($n = 125$). При использовании критерия Кохрена выявлены различия в 1-й группе между постконтрастными изображениями с эффектом переноса намагниченности и всеми фазами ДКУ ($p < 0,001$), а при попарном сравнении с помощью критерия Мак-Немара определены статистически значимые различия с каждой фазой ($p < 0,0001$). В 1-й группе чувствительность выявления очагов на постконтрастных изображениях T-TSE-MTC составила 47,7%. Во 2-й группе диагностика очагов размером от 10 мм и более между постконтрастными изображениями T1-TSE-MTC и всеми фазами ДКУ статистически значимых различий не выявила ($p < 0,0001$), а чувствительность составила 100%.

Обсуждение

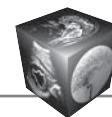
Изучение эффекта переноса намагниченности в МР-диагностике заболеваний печени сосредоточено на количественной детекции очаговых изменений, в то время как исследований качественных характеристик очагов мало. Большинство

работ посвящено диагностике диффузных изменений печени [8, 16, 17]. Наше исследование показало возможность визуализации гипо- и гиперваскулярных образований на фоне неспецифического контрастного усиления и установило критерии для дифференциальной диагностики между гиперваскулярными и гиповаскулярными образованиями с КК $> 49,6$ по данным постконтрастных T1ВИ ($p < 0,05$).

При неспецифическом динамическом контрастном усилении гиперваскулярные очаги лучше всего визуализируются в артериальную фазу, а на последующих фазах контрастность снижается ($p < 0,05$). В постконтрастную фазу метастатические очаги сохраняют высокую контрастность на T1ВИ, не отличающуюся от артериальной ($p > 0,05$). Гиповаскулярные метастазы демонстрируют низкие значения коэффициента контрастности во всех фазах [18–21]. Наше исследование подтверждает, что гиповаскулярные очаги слабо накапливают парамагнетик, и значительное повышение контрастности достигается только с помощью последовательности с эффектом переноса намагниченности ($p < 0,05$). Этот эффект подтверждает высокую чувствительность T1ВИ к накоплению парамагнитного контрастного препарата в малых концентрациях, что не удалось достичь на обычных T1ВИ.

В нашей работе выявлена возможность оценки васкуляризации очагов с помощью последовательности с эффектом переноса намагниченности, что полезно для определения локализации первичного опухолевого процесса и оценки ответа на лечение.

Обнаружение метастазов в печени на ранней стадии критично для выживаемости, так как позволяет отбирать пациентов для операции. МРТ



превосходит другие методы визуализации благодаря высокому мягкотканному контрасту и специфичным контрастным веществам [22–25]. В нашем исследовании показана высокая чувствительность выявления метастазов от 10 до 20 мм с использованием T1ВИ в постконтрастную фазу на основе TSE с эффектом переноса намагниченности. При этом чувствительность для метастазов от 5 до 10 мм ниже, что указывает на большую способность T1-TSE-MTC к усилению с парамагнетиками в низких концентрациях по сравнению с 3D-FFE.

Выводы

1. По данным кластерного анализа T1-взвешенное исследование на основе быстрого спинного эха с эффектом переноса намагниченности (T1-TSE-MTC) позволяет дифференцировать гипervasкулярные метастазы от переходных и гиповаскулярных ($p < 0,05$).

2. Контрастность гипervasкулярных метастазов в постконтрастную фазу на изображениях T1-TSE-MTC значительно не отличается от артериальной фазы ДКУ ($p > 0,05$).

3. Выявлена высокая чувствительность к усилению парамагнетиками в низких концентрациях на изображениях T1-TSE-MTC, которая снижает контрастность гиповаскулярных метастатических очагов размерами от 5 до 10 мм со значимым снижением их выявления в сравнении с ДКУ ($p < 0,05$), а при размерах от 10 до 20 мм без значимых различий с ДКУ ($p > 0,05$).

Участие авторов

Санников М.Ю. – концепция и дизайн исследования, проведение исследования, сбор и обработка данных, обзор публикаций по теме статьи, статистическая обработка данных, анализ и интерпретация полученных данных, написание текста, участие в научном дизайне.

Бородин О.Ю. – концепция и дизайн исследования, анализ и интерпретация полученных данных, подготовка и редактирование текста, участие в научном дизайне, утверждение окончательного варианта статьи.

Authors' participation

Sannikov M.Yu. – concept and design of the study, conducting research, collection and analysis of data, review of publications, statistical analysis, analysis and interpretation of the obtained data, writing text, participation in scientific design,

Borodin O.Yu. – concept and design of the study, analysis and interpretation of the obtained data, text preparation and editing, participation in scientific design, approval of the final version of the article.

Список литературы [References]

1. Ломовцева К.Х., Кармазановский Г.Г. Диффузионно-взвешенные изображения при очаговой патологии печени: обзор литературы. *Медицинская визуализация*. 2015; 6: 50–60. Lomovtseva K.Kh., Karmazanovsky G.G. Diffusion-weighted images in focal liver pathology: a literature review. *Medical Visualization*. 2015; 6: 50–60. (In Russian)
2. Акчурина Э.Д. Диффузионно-взвешенные изображения в комплексной лучевой диагностике очаговых поражений печени: Автореф. ... дис. канд. мед. наук. М., 2011. 24 с. Akchurina E.D. Diffusion-weighted images in complex radiological diagnostics of focal liver lesions. Autoref. ... Dis. Cand. of Sci. (Med.). Moscow, 2011. 24 p. (In Russian)
3. Asato N., Tsurusaki M., Sofue K. et al. Comparison of gadoxetic acid-enhanced dynamic MR imaging and contrast-enhanced computed tomography for preoperative evaluation of colorectal liver metastases. *Jpn. J. Radiol.* 2017; 35 (4): 197–205. <http://doi.org/10.1007/s11604-017-0622-2>
4. Chen S.Z., Yuan J., Deng M. et al. Chemical exchange saturation transfer (CEST) MR technique for in-vivo liver imaging at 3.0 tesla. *Eur. Radiol.* 2016; 26 (6): 1792–800. <http://doi.org/10.1007/s00330-015-3972-0>
5. Lupescu I.G., Nicolae C.A., Pomohaci M. et al. Multiparametric MRI with gadoxetic acid (Primovist®) in oncological patients: current indications and utility of the hepatobiliary phase. *Oncolog-Hematolog.ro. Oncolog-Hematolog*. 2023. 64 (3): 11–14.
6. Choi S.H., Kim S.Y., Park S.H. et al. Diagnostic performance of CT, gadoxetate disodium-enhanced MRI, and PET/CT for the diagnosis of colorectal liver metastasis: Systematic review and meta-analysis. *J. Magn. Reson. Imaging*. 2018; 47 (5): 1237–1250. <http://doi.org/10.1002/jmri.25852>
7. van der Reijdt D.J., Chupetlovska K., van Dijk E. et al. Multi-sequence MRI radiomics of colorectal liver metastases: Which features are reproducible across readers? *Eur. J. Radiol.* 2024; 172: 111346. <http://doi.org/10.1016/j.ejrad.2024.111346>
8. Рак печени (гепатоцеллюлярный). Клинические рекомендации. Одобрено Научным советом Министерства здравоохранения Российской Федерации. М., 2020. 57 с. https://oncology-association.ru/wp-content/uploads/2020/09/rak_pecheni.pdf?ysclid=m27xr4av1i458055995 Liver cancer (hepatocellular). Clinical guidelines. Approved by the Scientific Council of the Ministry of Health of the Russian Federation. Moscow, 2020. 57 p. https://oncology-association.ru/wp-content/uploads/2020/09/rak_pecheni.pdf?ysclid=m27xr4av1i458055995 (In Russian)
9. Braga L., Semelka R.C., Pietrobon R. et al. Does hypervascularity of liver metastases as detected on MRI predict disease progression in breast cancer patients? *Am. J. Roentgenol.* 2004; 182 (5): 1207–1213. <http://doi.org/10.2214/ajr.182.5.1821207>
10. Semelka R.C., Helmlinger T.K. Contrast agents for MR imaging of the liver. *Radiology*. 2001; 218 (1): 27–38. <http://doi.org/10.1148/radiology.218.1.r01ja2427>
11. Berry I., Barker G.J., Barkhof F. et al. A multicenter measurement of magnetization transfer ratio in normal white matter. *J. Magn. Reson. Imaging*. 1999; 9 (3): 441–446.



- [http://doi.org/10.1002/\(sici\)1522-2586\(199903\)9:3<441::aid-jmri12>3.0.co;2-r](http://doi.org/10.1002/(sici)1522-2586(199903)9:3<441::aid-jmri12>3.0.co;2-r)
12. Чижигов В.И. Практикум по магнитному резонансу. СПб.: Изд-во С.-Петербургского университета, 2009. 254 с.
Chizhikov V.I. Practical guide to magnetic resonance imaging. St. Petersburg: Publishing house of St. Petersburg University, 2009. 254 p. (In Russian)
 13. Ebrahimi B., Jiang K., Lerman L. Magnetization Transfer Imaging. In: Serai S.D., Darge K. (eds). Advanced Clinical MRI of the Kidney. Springer, Cham., 2023: 181–195. http://doi.org/10.1007/978-3-031-40169-5_13
 14. Wáng Y.X.J., Dou W., Shen Z., Zhang Y. An update on liver chemical exchange saturation transfer imaging with a focus on clinical translation. *Quant. Imaging Med. Surg.* 2023; 13 (7): 4057–4076. <http://doi.org/10.21037/qims-23-379>
 15. Mahfouz M., Zaky I., Maher M. Magnetization Transfer Magnetic Resonance Imaging of Hepatic Tumors. *J. Egypt. Nat. Cancer Inst.* 2000; 12 (3) 191–198.
 16. Rosenkrantz A.B., Storey P., Gilet A.G. et al. Magnetization transfer contrast-prepared MR imaging of the liver: inability to distinguish healthy from cirrhotic liver. *Radiology.* 2012; 262 (1): 136–143. <http://doi.org/10.1148/radiol.11111043>
 17. Seo N., Jeong H.K., Choi J.Y. et al. Liver MRI with amide proton transfer imaging: feasibility and accuracy for the characterization of focal liver lesions. *Eur. Radiol.* 2021; 31 (1): 222–231. <http://doi.org/10.1007/s00330-020-07122-y>
 18. Choi J.Y., Choi J.S., Kim M.J. et al. Detection of hepatic hypovascular metastases: 3D gradient echo MRI using a hepatobiliary contrast agent. *J. Magn. Reson. Imaging.* 2010 Mar; 31 (3): 571–578. <http://doi.org/10.1002/jmri.22076>
 19. Maino C., Vernuccio F., Cannella R. et al. Liver metastases: The role of magnetic resonance imaging. *Wld J. Gastroenterol.* 2023; 29 (36): 5180–5197. <http://doi.org/10.3748/wjg.v29.i36.5180>
 20. Vernuccio F., Cannella R., Bartolotta T.V. et al. Advances in liver US, CT, and MRI: moving toward the future. *Eur. Radiol. Exp.* 2021; 5 (1): 52. <http://doi.org/10.1186/s41747-021-00250-0>
 21. Zhang L., Yu X., Huo L. et al. Detection of liver metastases on gadobenate dimeglumine-enhanced MRI: systematic review, meta-analysis, and similarities with gadoxetate-enhanced MRI. *Eur. Radiol.* 2019; 29 (10): 5205–5216. <http://doi.org/10.1007/s00330-019-06110-1>
 22. Mao Y., Chen B., Wang H. et al. Diagnostic performance of magnetic resonance imaging for colorectal liver metastasis: A systematic review and meta-analysis. *Sci. Rep.* 2020; 10 (1): 1969. <http://doi.org/10.1038/s41598-020-58855-1>
 23. Morin C., Drolet S., Daigle C. et al. Additional value of gadoxetic acid-enhanced MRI to conventional extracellular gadolinium-enhanced MRI for the surgical management of colorectal and neuroendocrine liver metastases. *HPB (Oxford).* 2020; 22 (5): 710–715. <http://doi.org/10.1016/j.hpb.2019.09.009>
 24. Hayoz R., Vietti-Viola N., Duran R. et al. The combination of hepatobiliary phase with Gd-EOB-DTPA and DWI is highly accurate for the detection and characterization of liver metastases from neuroendocrine tumor. *Eur. Radiol.* 2020; 30 (12): 6593–6602. <http://doi.org/10.1007/s00330-020-06930-6>
 25. Schnitzer M.L., Buchner J., Biechele G. et al. Economic evaluation of ¹⁸F-FDG PET/CT, MRI and CE-CT in selection of colorectal liver metastases eligible for ablation – A cost-effectiveness analysis. *Eur. J. Radiol.* 2023; 163: 110803. <http://doi.org/10.1016/j.ejrad.2023.110803>

Для корреспонденции*: Санников Максим Юрьевич – e-mail: sannikoff.maks@yandex.ru

Санников Максим Юрьевич – врач-рентгенолог отделения рентгенодиагностики ОГАУЗ “Томский областной онкологический диспансер”, Томск.

Бородин Олег Юрьевич – доктор мед. наук, заведующий отделением рентгенодиагностики ОГАУЗ “Томский областной онкологический диспансер”; профессор кафедры биофизики и функциональной диагностики ФГБОУ ВО “Сибирский государственный медицинский университет” Минздрава России. Томск. <https://orcid.org/0000-0002-5031-1355>

Contact*: Maxim Yu. Sannikov – e-mail: sannikoff.maks@yandex.ru

Maxim Yu. Sannikov – radiologist of the X-ray diagnostics department, Tomsk Regional Oncology Dispensary, Tomsk.

Oleg Yu. Borodin – Doct. of Sci. (Med.), Head of the X-ray diagnostics department, Tomsk Regional Oncology Dispensary; Professor of the Department of Biophysics and Functional Diagnostics, Siberian State Medical University, Tomsk. <https://orcid.org/0000-0002-5031-1355>