

УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ГИБРИДНЫЕ МЕТОДЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ В ОНКОГЕПАТОЛОГИИ

Данзанова Т.Ю.^{1,2}, Лепэдату П.И.¹, Синюкова Г.Т.¹, Бердников С.Н.¹, Зубарева Е.А.², Ковалева Е.В.³ ✉

¹ Национальный медицинский исследовательский центр онкологии им. Н.Н. Блохина Минздрава России; Россия, 115478 Москва, Каширское шоссе, 24

² Российский национальный исследовательский медицинский университет имени Н.И. Пирогова Минздрава России; Россия, 117997, Москва, ул. Островитянова, 1

³ ООО «ПЭТ-Технолоджи Балашиха»; Россия, 143900, Московская обл., Балашиха, ул. Карбышева, 6

✉ Екатерина Вячеславовна Ковалева, ek.v.kovaleva@gmail.com

РЕФЕРАТ

Представлен обзор литературы по оценке возможностей ультразвуковых гибридных методов визуализации в онкогепатологии. К гибридным, или fusion, технологиям относится совместное применение рентгеновской компьютерной томографии (РКТ) или магнитно-резонансной томографии (МРТ) с серошкальным ультразвуковым исследованием (УЗИ) и УЗИ с контрастным усилением (КУУЗИ). Рассмотрены основные области применения сочетанных лучевых модальностей, таких как первичная дифференциальная диагностика образований печени, навигация для биопсии, а также для проведения термоабляций. Гибридные технологии диагностики в онкогепатологии повышают совместную чувствительность в выявлении новообразований, позволяют оценить гетерогенность опухоли, определить ее строение и, соответственно, спрогнозировать ответ на лечение.

Ключевые слова: гибридное УЗИ, ультразвуковое исследование с контрастным усилением, онкогепатология, биопсия под контролем УЗИ, термоабляция под контролем УЗИ

Для цитирования: Данзанова Т.Ю., Лепэдату П.И., Синюкова Г.Т., Бердников С.Н., Зубарева Е.А., Ковалева Е.В. Ультразвуковые гибридные методы визуализации в онкогепатологии. Онкологический журнал: лучевая диагностика, лучевая терапия. 2025;8(2):96-102.

<https://doi.org/10.37174/2587-7593-2025-8-2-96-102>

Journal of Oncology: Diagnostic Radiology and Radiotherapy

ISSN: 2587-7593 (Print) ISSN: 2713-167X (Online)

COMBINED METHODS OF DIAGNOSTICS AND TREATMENT

<https://doi.org/10.37174/2587-7593-2025-8-2-96-102>

ULTRASOUND FUSION IMAGING IN ONCOHEPATOLOGY

Tatiana Yu. Danzanova^{1,2}, Pavel I. Lepedatu¹, Galina T. Sinyukova¹, Sergei N. Berdnikov¹, Elena A. Zubareva², Ekaterina V. Kovaleva³ ✉

¹ N.N. Blokhin National Medical Research Center of Oncology; 24 Kashirskoye Shosse, Moscow, Russia 115478

² Pirogov Russian National Research Medical University; 1 Ostrovityanov St., Moscow, Russia 117997

³ LLC "PET- Technology"; 6 Karbyshev St., Balashikha, Moscow region, Russia 143900

✉ Ekaterina V. Kovaleva, ek.v.kovaleva@gmail.com

ABSTRACT

The article presents a review of the literature concerning the assessment of the possibilities of ultrasound hybrid imaging methods in oncohepatology. Fusion imaging includes the combined use of computed tomography (CT) or magnetic resonance imaging (MRI) with greyscale ultrasound and contrast-enhanced ultrasound (CEUS). The main areas of application of ultrasound fusion imaging, such as differential diagnosis of liver lesions, navigation for biopsy and for thermal ablation. Fusion imaging in oncohepatology increases the sensitivity of the detection of liver lesions, assesses its structure and predicts the response of treatment.

Key words: hybrid, ultrasonography, contrast-enhanced ultrasound, oncohepatology, US-guided biopsy, US-guided thermal ablation

For citation: Danzanova T.Yu., Lepedatu P.I., Sinyukova G.T., Berdnikov S.N., Zubareva E.A., Kovaleva E.V. Ultrasound Fusion Imaging In Oncohepatology. Journal of Oncology: Diagnostic Radiology and Radiotherapy. 2025;8(2):96-102. (In Russ.).

<https://doi.org/10.37174/2587-7593-2025-8-2-96-102>

Введение

Онкогепатология — раздел медицины, который занимается диагностикой и лечением онкологических заболеваний печени. Выявление образований печени небольших размеров, в частности на фоне жирового гепатоза или цирроза печени, является сложной задачей. Стандартное ультразвуковое исследование (УЗИ) в серошкальном В-режиме и в режиме доплеровского картирования в основном

применяется в качестве скрининга у пациентов с хроническими заболеваниями, которые предрасположены к развитию рака, например, гепатоцеллюлярной карциномы на фоне вирусного гепатита [1, 2]. С целью детальной оценки выявленных образований применяются такие лучевые модальности, как рентгеновская компьютерная (РКТ) и магнитно-резонансная томографии (МРТ). В сравнении с РКТ и МРТ, УЗИ имеет ряд некоторых пре-

имуществ в исследовании печени благодаря своему удобству и возможности проведения в режиме реального времени. Применение микропузырьковых контрастных препаратов в дополнение к стандартному УЗИ позволило расширить возможности метода. Например, применение данной методики улучшает визуализацию очаговых образований печени на фоне жировой дистрофии паренхимы [1]. Положительными сторонами ультразвукового исследования с контрастным усилением (КУУЗИ) являются быстрое и многократное применение и отсутствие ионизирующего излучения [1, 3]. Также КУУЗИ может успешно применяться у пациентов с почечной недостаточностью в качестве альтернативы рентгеновской компьютерной томографии (РКТ) с контрастным усилением [4].

Однако, несмотря на положительные стороны, УЗИ имеет ограничений в виде затруднительной визуализации паренхимы печени вблизи купола диафрагмы из-за акустической тени от ткани легкого и ребер. Более того, у пациентов с тяжелой формой жировой дистрофии печени или прогрессирующим циррозом небольшие образования с изоэхогенной структурой могут быть незаметны и их трудно дифференцировать [5]. В то же время РКТ и МРТ позволяют четко и безошибочно отображать взаимосвязь между образованиями и анатомическими структурами, благодаря высокому пространственному разрешению [6]. Таким образом, сочетание нескольких методов визуализации необходимо для повышения специфичности и чувствительности в выявлении очаговых образований печени, которые невозможно обнаружить с помощью одного метода визуализации [5].

Гибридные технологии в диагностике заболеваний подразумевают использование комбинации нескольких методов лучевой визуализации, например, ультразвуковой диагностики и МРТ, позитронной эмиссионной томографии (ПЭТ) и РКТ. Применение комбинации современных лучевых модальностей занимает очень важную роль в неинвазивной диагностике и определении стратегии лечения онкологических заболеваний [7]. Гибридные диагностические технологии в онкогепатологии повышают совместную чувствительность выявления новообразований, позволяет оценить гетерогенность опухоли, определить ее строение и, соответственно, спрогнозировать ответ на лечение. Для развития и широкого внедрения этих методов было создано Европейское общество гибридной, молекулярной и трансляционной визуализации (European Society for Hybrid, Molecular and Translational Imaging, ESHIMT) [8]. ESHIMT — некоммерческая организация, занимающаяся продвиже-

нием и координацией научной, интеллектуальной и профессиональной деятельности в следующих областях: гибридная визуализация, включающая два или более методов визуализации, визуализация функции тканей и визуализация на клеточном и молекулярном уровнях. Целью общества является совершенствование методов гибридной визуализации и содействие их внедрению в рутинную клиническую практику.

Исследования в формате fusion УЗИ/МРТ/РКТ

В течение последних нескольких лет появилась возможность объединять данные РКТ или МРТ с УЗИ в режиме реального времени. Изображения, полученные при МРТ или РКТ, в формате DICOM переносятся в базу данных ультразвукового аппарата. Затем при помощи специализированного программного обеспечения осуществляется сопоставление статических данных с положением ультразвукового датчика, оснащенного магнитным позиционным контроллером [4]. Данные отображаются на разделенном экране с возможностью наложения их друг на друга в виде единого изображения [9]. Таким образом, благодаря технологии визуализации fusion, загруженные КТ или МРТ-данные показывают одну и ту же плоскость и движутся синхронно при выполнении УЗИ в режиме реального времени.

Наиболее часто гибридные диагностические технологии, или fusion-технологии, в онкогепатологии применяются для навигации при проведении пункционной биопсии, радиочастотной абляции (РЧА) или химиоэмболизации образований печени. Также сочетание УЗИ с МРТ или РКТ используется в онкологии для обнаружения и диагностики поражений печени, особенно в случае небольших размеров очагов (менее 10 мм), которые трудно обнаружить с помощью стандартного УЗИ [4, 10–12].

Технология Fusion позволяет проводить дифференциальную диагностику очаговых образований в печени, уменьшая количество инвазивных процедур (биопсии). Благодаря данной технологии визуализация образований улучшается, уменьшается количество ложноположительных и ложноотрицательных результатов. Okamoto et al смогли продемонстрировать, что небольшие образования паренхимы печени, пропущенные при обычном УЗИ в В-режиме, могут быть обнаружены с помощью технологии fusion [13]. Когда визуализации fusion недостаточно для выявления мелкоочаговых поражений печени, можно добавить КУУЗИ [1]. Визуализация микроперфузии паренхимы и опухолевых образований с помощью КУУЗИ может быть динамически объединена и оценена с помощью

изображений, полученных в ходе РКТ или МРТ, что позволяет детально изучить основные признаки впервые выявленных образований печени или подтвердить сомнительные результаты морфологического исследования [1, 3]. Сочетание КУУЗИ с МРТ или РКТ имеет преимущество в выявлении очагов гепатоцеллюлярного рака (ГЦР) малых размеров с нечеткой визуализацией в серошкальном В-режиме [11].

Так, в работе Во X-W et al было проведено сравнение между стандартным УЗИ, fusion УЗИ/РКТ/МРТ с внутривенным контрастированием и fusion КУУЗИ/РКТ/МРТ с внутривенным контрастированием в выявлении очагов ГЦР. В ходе данного исследования были выявлены достоверные различия в количестве выявленных очагов: при fusion КУУЗИ/РКТ/МРТ выявлено 95,7 % очагов, при fusion УЗИ/РКТ/МРТ — 70,0 %, при стандартном УЗИ/35,7 % ($p < 0,001$). Полученные результаты свидетельствуют, что fusion КУУЗИ/РКТ/МРТ повышает визуализацию незаметных при стандартном УЗИ очагов ГЦР [14].

Позднее Danqing Huang et al было проведено похожее исследование, в котором оценивалась эффективность fusion УЗИ/РКТ/МРТ в диагностике очаговых образований печени. В исследование был включен 71 пациент с невыявленными при стандартном УЗИ и недиагностированными образованиями в печени. Среди 46 пациентов, у которых не были обнаружены очаги при обычном УЗИ, частота выявления поражений с использованием fusion УЗИ/КТ/МРТ составила 30,8 %, а в сочетании с КУУЗИ/76,9 % [5]. Liu J et al [15] сравнили диагностические возможности РКТ с контрастированием и fusion КУУЗИ/РКТ путем обследования 120 пациентов с небольшими очаговыми образованиями печени. Данные лучевой визуализации сопоставлялись с результатами морфологической верификации, при которой было обнаружено 70 злокачественных и 50 доброкачественных очагов. При РКТ с контрастированием было выявлено 55 злокачественных образований в печени с коэффициентом совпадения с данными морфологии 78,6 %; при fusion КУУЗИ/РКТ верный диагноз был установлен в 64 случаях, с более высоким коэффициентом совпадения в 91,4 %. Таким образом, между данными модальностями были выявлены достоверные различия ($p < 0,03$) [15].

Также стоит отметить, что применение технологии fusion УЗИ/РКТ/МРТ, несомненно, способствует установлению границ и положения очагов поражения, которые были незаметны при стандартном УЗИ. Четкие границы анатомических структур, полученных с помощью fusion УЗИ/РКТ/

МРТ, обеспечивают надежную и объективную оценку взаимосвязи между очаговыми образованиями печени и жизненно важными структурами, такими как кровеносные сосуды, кишечник, легкие и т.д. В сочетании с КУУЗИ можно значительно повысить частоту выявления очаговых образований. Lee et al [16] в 2019–2021 гг. провели проспективное исследование, нацеленное на сравнение возможностей fusion УЗИ/РКТ/МРТ и fusion КУУЗИ/РКТ/МРТ в выявлении опухолей печени. Наблюдение включало 248 пациентов со злокачественными образованиями печени, которые плохо визуализировались при стандартном серошкальном УЗИ. Результаты данной работы продемонстрировали диагностически значимое преимущество fusion КУУЗИ/РКТ/МРТ в выявлении новообразований в сравнении с fusion УЗИ/РКТ/МРТ ($p < 0,001$) [16]. Технология fusion может повысить достоверность диагностики, быть полезной при проведении интервенционных вмешательств и, следовательно, способствовать более грамотному выбору тактики лечения пациента [5].

Интервенционные методы и биопсия представляют собой еще одну область исследований возможностей технологии fusion [4]. При выполнении интервенционных процедур под контролем УЗИ операторам необходимо мысленно сопоставлять набор исходных данных (изображения РКТ или МРТ) и набор рабочих данных (УЗИ-изображения в режиме реального времени) [11, 17]. Однако эта мысленная регистрация может быть сложной задачей, когда печень не может быть отсканирована в поперечных, сагиттальных или коронарных плоскостях, которые применяются для интерпретации РКТ- или МРТ-изображений. Кроме того, деформация и смещение печени происходит в результате дыхания и сердцебиения пациентов. Так, акустическое окно печени иногда ограничено грудной клеткой, толстой кишкой или жировой клетчаткой сальника, окружающей печень. Следовательно, если происходит ошибочное мысленное совмещение, это может привести к неправильному прицеливанию во время вмешательств на печени под контролем УЗИ [11, 18].

Отталкиваясь от данного факта, визуализация fusion привлекла значительное внимание, поскольку она может помочь операторам проводить интервенционные процедуры с высокой точностью при труднодоступных очаговых образованиях. С момента появления КУУЗИ возможности технологии fusion расширились. Так, данная ультразвуковая методика позволяет выявить очаговое образование печени, которое не визуализируется при стандартном серошкальном УЗИ [19, 20]. Среди всех известных ультразвуковых контрастных пре-

паратов наиболее эффективным в определении локализации малоразмерных узлов ГЦР является Sonazoid (микропузырьки перфторбутана; GE Healthcare, Oslo, Norway), обладающий внутри- и внесосудистым контрастным усилением [11]. Обоснованность применения данного контрастного препарата в навигации для чрескожной биопсии очаговых образований печени оценил Park H.S. et al [21]. В исследование было включено 66 пациентов, 41 из которых планировалось проведение биопсии, а 25 пациентам — чрескожная радиочастотная абляция (РЧА). Навигация для интервенционных процедур осуществлялась при помощи КУУЗИ с препаратом Sonazoid (GE Healthcare, Oslo, Norway). В ходе данного исследования частота выявления очаговых образований печени составила 77,3 % (58 из 75), 84,0 % (63 из 75) и 92,0 % (69 из 75) при серошкальном УЗИ, при КУУЗИ в момент внутрисосудистой и внесосудистой фаз контрастного усиления соответственно, с достоверными различиями среди этих модальностей ($p = 0,034$). По нашим данным, визуализация образований в печени при КУУЗИ с Sonazoid (GE Healthcare, Oslo, Norway) была достоверно лучше ($p < 0,001$) по сравнению с УЗИ в В-режиме. Показатели технической успешности процедур составили 95,2 % (40 из 42) при биопсии и 69,7 % (23 из 33) при радиочастотной абляции [19].

Kang et al оценили, может ли КУУЗИ с Sonazoid (GE Healthcare, Oslo, Norway) улучшить визуализацию очаговых образований печени, невыявленных при fusion УЗИ /РКТ/МРТ, для последующей морфологической верификации [22]. Из 711 пациентов 16 были включены в исследование; средний размер исследованных очагов составлял 1,1 см (0,5–1,9 см) по данным предварительной визуализации. После добавления ультразвукового контрастного усиления к fusion УЗИ/РКТ/МРТ были дополнительно выявлены 15 из 16 (93,8 %) очаговых образований ($p < 0,001$, в сравнении с fusion УЗИ/РКТ/МРТ). Fusion КУУЗИ/РКТ/МРТ улучшило качество навигации для чрескожной биопсии печени до 87,6 % (14/16) [22]. Таким образом, добавление ультразвукового контрастного препарата к fusion УЗИ/РКТ/МРТ может улучшить визуализацию и навигацию для биопсии очаговых поражений печени, не видимых при fusion с серошкальным УЗИ.

Использование КУУЗИ может потенциально повысить диагностический результат чрескожной биопсии по четырем различным причинам:

- биопсию можно проводить из перфузируемых участков, чтобы избежать некроза или аваскулярной ткани;

- биопсия может быть взята из образований, которые плохо визуализируются, или «невидимы» при УЗИ в В-режиме;
- биопсии можно полностью избежать, если КУУЗИ однозначно выявляет типичные признаки доброкачественного образования или ГЦР;
- сочетание fusion с КУУЗИ дает синергетический эффект. Доказано, совместное применение с КУУЗИ позволяет визуализировать очаги, невидимые при обычном серошкальном УЗИ [4].

За последние два десятилетия термическая и химическая абляция опухолевых образований печени с навигацией различными лучевыми модальностями стала одним из наиболее эффективных методов локального лечения небольших злокачественных новообразований печени [23]. Первым абляционным методом удаления опухоли, который был внедрен в клиническую практику, стало чрескожное введение этанола (percutaneous ethanol injection, PEI), представляющее собой химическую абляцию ГЦР. Однако в начале 1990-х гг. была разработана термическая абляция с использованием радиочастот (РЧА), которая доказала свое превосходство над PEI с точки зрения лучшей выживаемости и локального контроля заболевания у пациентов с ГЦР на ранних стадиях. Впоследствии для лечения злокачественных опухолей печени были разработаны и внедрены другие методы термической абляции, такие как микроволновая абляция (МВА), криоабляция, лазерная абляция и высокоинтенсивная фокусированная ультразвуковая терапия (HIFU-терапия, ультразвуковая абляция) [21]. Среди них радиочастотная абляция (РЧА) получила широкое признание в качестве эффективного и минимально инвазивного метода лечения опухолей печени. Однако частота локального прогрессирования в зоне проведения РЧА определяется размерами опухолевого образования и составляет 6,6–66,7 % за 12–49 месяцев наблюдения [24]. При удобном для оператора расположении опухоли и ее полной четкой визуализации возможно эффективное лечение образований размером до 5 см, при этом частота развития местных рецидивов после РЧА опухолевых образований размерами до 3 см и от 3 до 5 см составляет 3 — 5,6 % и 4 — 19,5 % соответственно [24]. При локальном лечении опухолей диаметром свыше 5 см частота развития местного рецидива возрастает до 27–45 % [24].

Как точно оценить местный ответ после РЧА и снизить частоту локальных рецидивов? Недостаточный запас абляционной безопасности является основным фактором риска рецидивирования. Граница безопасности определяется как

расстояние от границы очага до границы зоны аблации после лечения. Для успешной аблации необходимая граница безопасности составляет 5–10 мм. В настоящее время граница безопасности оценивается с помощью РКТ / МРТ с контрастным усилением через неделю и месяц после лечения. В случаях неполной аблации пациентов приходится повторно госпитализировать, что увеличивает стоимость лечения и беспокойство больных. Кроме того, повторное применение РКТ/ МРТ всегда ограничено из-за связанных с этим возрастающих затрат, облучения, аллергии на контрастное вещество, недостаточной функции почек [25].

КУУЗИ является эффективным методом визуализации для оценки реакции на лечение, который позволяет избежать вышеупомянутых недостатков РКТ/МРТ. КУУЗИ можно проводить сразу или через 24 часа после РЧА, и многие исследования подтвердили, что его эффективность при оценке эффективности лечения после РЧА эквивалентна РКТ/МРТ [25–29]. При КУУЗИ наличие или отсутствие перфузии контрастного препарата позволяет дифференцировать жизнеспособную опухолевую ткань от некротизированной после аблации [30]. Однако КУУЗИ в качестве единственного метода визуализации редко используется для оценки границ аблационной безопасности, поскольку изображения КУУЗИ до и после РЧА трудно сопоставить в связи с отличиями в плоскостях сканирования [25]. Также при КУУЗИ плохо кровоснабжаемых злокачественных образований печени трудно визуализировать остаточную опухоль вследствие наличия пузырьков газа, скрывающих опухоль и окружающие ткани, что может привести к неполной аблации и увеличить частоту локального прогрессирования опухоли [31, 32]. В нескольких исследованиях сообщалось о трудностях КУУЗИ при оценке глубоко расположенных опухолей печени, на расстоянии более 10 см от датчика, и опухолей, расположенных в области 8-го сегмента печени. Кроме того, было обнаружено, что примерно у двух третей пациентов с ГЦР на ранних стадиях с диаметром узлов менее 2 см при КУУЗИ с Sonazoid (GE Healthcare, Oslo, Norway) выявлялось незначительное гиперконтрастирование в артериальную фазу [16, 33–36].

Совместное применение данных КУУЗИ и РКТ/МРТ улучшает визуализацию взаимосвязей между сосудистой сетью печени и узлами ГЦР в трех плоскостях [30]. В работе Lee et al [16] РЧА была успешно проведена под контролем fusion КУУЗИ/РКТ/МРТ в 99,6 % случаев (у 247 из 248 пациентов). В исследовании также сравнивалась терапевтическая эффективность РЧА под контролем fusion КУУЗИ/РКТ/МРТ с SonoVue (Sulfer Hexafluoride, Bracco,

Milan, Italy) и Sonazoid через 1 год и через 2 года: достоверно значимых различий зарегистрировано не было — 9,3 % (23/248) и 10,9 % (27/248) соответственно. Основная причина, по которой преимущества купферовской фазы при fusion КУУЗИ/РКТ/МРТ с Sonazoid не привели к лучшему терапевтическому результату РЧА по сравнению с fusion КУУЗИ/РКТ/МРТ с SonoVue, может быть связана с техническими особенностями метода, такими как использование виртуальной мишени для локализации опухоли и размещения направляющего электрода в режиме реального времени [16]. На основании представленных данных возникает необходимость изучения возможностей использования в онкопатологии не только сочетанных лучевых модальностей, но и различных методик внутри одного метода, например КУУЗИ с разными контрастными препаратами.

С помощью технологии fusion возможно получить изображение невидимых или неотчетливых очаговых поражений печени, что приводит к улучшению дифференциальной диагностики, уменьшению количества биопсий, успешному проведению необходимых биопсий, особенно при сложном доступе, а также к проведению РЧА с контролируемой достижимостью границ безопасности.

Список литературы / References

1. Schwarze V, Rübenthaler J, Marschner C, et al. Advanced Fusion Imaging and Contrast-Enhanced Imaging (CT/MRI-CEUS) in Oncology. *Cancers (Basel)*. 2020;12(10):2821. PMID: 33007933. <https://doi.org/10.3390/cancers12102821>.
2. Marrero JA, Kulik LM, Sirlin CB, et al. Diagnosis, Staging, and Management of Hepatocellular Carcinoma: 2018 Practice Guidance by the American Association for the Study of Liver Diseases. *Hepatology*. 2018;68(2):723-50. <https://doi.org/10.1002/hep.29913>.
3. Piscaglia F, Bolondi L. The safety of Sonovue in abdominal applications: Retrospective analysis of 23188 investigations. *Ultrasound Med Biol*. 2006; 32(9):1369-75. <https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2006.05.031>.
4. Kloth C, Kratzer W, Schmidberger J, et al. Ultrasound 2020 — Diagnostics & Therapy: On the Way to Multimodal Ultrasound: Contrast-Enhanced Ultrasound (CEUS), Microvascular Doppler Techniques, Fusion Imaging, Sonoelastography, Interventional Sonography. *Rofo*. 2021;193(1):23-32. PMID: 32731265. <https://doi.org/10.1055/a-1217-7400>.
5. Huang D, Wen B, Zhang H, et al. Ultrasound fusion imaging for improving diagnostic and therapeutic strategies of focal liver lesions: A preliminary study. *J Clin Ultrasound*. 2023;51(6):1059-1066. PMID: 37098104. <https://doi.org/10.1002/jcu.23467>.
6. Barbone GE, Bravin A, Mittone A, et al. High-spatial-resolution three-dimensional imaging of human spinal cord and column anatomy with postmortem X-ray phase-contrast micro-CT. *Radiology*. 2021;298(1):135-46. <https://doi.org/10.1148/radiol.2020201622>.

7. Sandulescu DL, Dumitrescu D, Rogoveanu I, et al. Hybrid ultrasound imaging techniques (fusion imaging). *World J Gastroenterol*. 2011;17(1):49-52. PMID: 21218083. <https://doi.org/10.3748/wjg.v17.i1.49>.
8. Жуков ОБ, Щеплев ПА. Искусственный интеллект в медицине: от гибридных исследований и клинической валидации до разработки моделей применения. *Андрология и генитальная хирургия*. 2019;20(3):14-7. Zhukov O.B., Scheplev P.A. Artificial intelligence in medicine: from hybrid studies and clinical validation to development of application models. *Andrology and Genital Surgery*. 2019;20(3):14-7. (In Russ.). <https://doi.org/10.17650/2070-9781-2019-20-2-00-00>.
9. Ewertzen C. Image fusion between ultrasonography and CT, MRI or PET/CT for image guidance and intervention — a theoretical and clinical study. *Dan Med Bull*. 2010;57(9): B4172. PMID: 20816020.
10. Jung EM, Clevert DA. Contrast-enhanced ultrasound (CEUS) and image fusion for procedures of liver interventions. *Radiologe*. 2018;58(6):538-44. PMID: 29797043. <https://doi.org/10.1007/s00117-018-0411-7>.
11. Lee MW. Fusion imaging of real-time ultrasonography with CT or MRI for hepatic intervention. *Ultrasonography*. 2014;33(4):227-39. PMID: 25036756. <https://doi.org/10.14366/usg.14021>.
12. Jung EM, Uller W, Stroszczyński C, et al. Contrast-enhanced sonography. therapy control of radiofrequency ablation and transarterial chemoembolization of hepatocellular carcinoma. *Radiologe*. 2011;51:462-8. PMID: 21557022. <https://doi.org/10.1007/s00117-010-2101-y>.
13. Okamoto E, Sato S, Sanchez-Siles AA, et al. Evaluation of virtual CT sonography for enhanced detection of small hepatic nodules: A prospective pilot study. *Am J Roentgenol*. 2010;194(5):1272-8. PMID: 20410414. <https://doi.org/10.2214/AJR.08.2294>.
14. Bo XW, Xu HX, Wang D, et al. Fusion imaging of contrast-enhanced ultrasound and contrast-enhanced CT or MRI before radiofrequency ablation for liver cancers. *Br J Radiol*. 2016;89(1067):20160379. PMID: 27626506. <https://doi.org/10.1259/bjr.20160379>.
15. Liu J, Bao D, Xu Z, et al. Clinical value of contrast-enhanced computed tomography (CECT) combined with contrast-enhanced ultrasound (CEUS) for characterization and diagnosis of small nodular lesions in liver. *Pak J Med Sci*. 2021;37(7):1843-8. PMID: 34912405. <https://doi.org/10.12669/pjms.37.7.4306>.
16. Lee Y, Yoon JH, Han S, et al. Contrast-enhanced ultrasonography–CT/MRI fusion guidance for percutaneous ablation of inconspicuous, small liver tumors: improving feasibility and therapeutic outcome. *Cancer Imaging*. 2024;24(1):4. PMID: 38172949. <https://doi.org/10.1186/s40644-023-00650-y>.
17. Maybody M, Stevenson C, Solomon SB. Overview of navigation systems in image-guided interventions. *Tech Vasc Interv Radiol*. 2013;16(3):136-43. PMID: 23993075. <https://doi.org/10.1053/j.tvir.2013.02.008>.
18. Lee MW, Lim HK, Kim YJ, et al. Percutaneous sonographically guided radio frequency ablation of hepatocellular carcinoma: causes of mistargeting and factors affecting the feasibility of a second ablation session. *J Ultrasound Med*. 2011;30(5):607-615. PMID: 21527608. <https://doi.org/10.7863/jum.2011.30.5.607>.
19. Данзанова ТЮ, Синюкова ГТ, Гудилина ЕА и др. Значение ультразвуковой диагностики метастатического поражения печени в определении тактики хирургического лечения. *Российский онкологический журнал*. 2015;2(3):23-27. Danzanova TYu, Sinyukova GT, Gudilina EA, et al. The role of ultrasonic diagnostics of liver metastases in designing surgical treatment strategy. *Russian Oncology Journal*. 2015;20(3):23-27. (In Russ.).
20. Ковалева ЕВ, Синюкова ГТ, Данзанова ТЮ и др. Возможности УЗИ с применением контрастного усиления в диагностике метастазов в печени у больных колоректальным раком. *Колопроктология*. 2018;1(63):36-41. Kovaleva EV, Sinyukova GT, Danzanova TYU, et al. The possibilities of contrast enhanced ultrasound (CEUS) in the diagnosis of colorectal liver metastases (CRLM). *Coloproctology*. 2018;1(63):36-41. (In Russ.).
21. Park HS, Young JK, Mi HY, et al. Real-time contrast-enhanced sonographically guided biopsy or radiofrequency ablation of focal liver lesions using perflurobutane microbubbles (sonazoid): value of Kupffer-phase imaging. *J Ultrasound Med*. 2015;34(3):411-21. PMID: 25715362. <https://doi.org/10.7863/ultra.34.3.411>.
22. Kang TW, Min WL, Kyoung DS, et al. Added value of contrast-enhanced ultrasound on biopsies of focal hepatic lesions invisible on fusion imaging guidance. *Korean J Radiol*. 2017;18(1):152-61. PMID: 28096725. <https://doi.org/10.3348/kjr.2017.18.1.152>.
23. Lee DH, Lee J. Recent advances in the image-guided tumor ablation of liver malignancies: radiofrequency ablation with multiple electrodes, real-time multimodality fusion imaging, and new energy sources. *Korean J Radiol*. 2018;19(4):545-59. PMID: 29962861. <https://doi.org/10.3348/kjr.2018.19.4.545>.
24. Москвичева ЛИ, Сидоров ДВ, Ложкин МВ и др. Современные методы абляции злокачественных новообразований печени. *Исследования и практика в медицине*. 2018;5(4): 58-71. Moskvicheva LI, Sidorov DV, Lozhkin MV, et al. Modern methods of ablation of malignant tumors of the liver. *Research'n Practical Medicine Journal*. 2018;5(4):58-71. (In Russ.). <https://doi.org/10.17709/2409-2231-2018-5-4-6>.
25. Bo XW, Xu HX, Guo LH, et al. Ablative safety margin depicted by fusion imaging with post-treatment contrast-enhanced ultrasound and pre-treatment CECT/CEMRI after radiofrequency ablation for liver cancers. *Br J Radiol*. 2017;90(1078):20170063. PMID: 28749166. <https://doi.org/10.1259/bjr.20170063>.
26. Choi D, Lim HK, Kim SH, et al. Hepatocellular carcinoma treated with percutaneous radio-frequency ablation: usefulness of power Doppler US with a microbubble contrast agent in evaluating therapeutic response—preliminary results. *Radiology*. 2000;217:558-63. PMID: 11058660. <https://doi.org/10.1148/radiology.217.2.r00oc07558>.
27. Salvaggio G, Campisi A, Lo Greco V, et al. Evaluation of posttreatment response of hepatocellular carcinoma: comparison of ultrasonography with second-generation ultrasound contrast agent and multidetector CT. *Abdom Imaging*. 2010;35(4):447-53. PMID: 19562414. <https://doi.org/10.1007/s00261-009-9551-6>.
28. Meloni MF, Andreano A, Franza E, et al. Contrast enhanced ultrasound: should it play a role in immediate evaluation of liver tumors following thermal ablation? *Eur J Radiol*. 2012;81(8):e897-902. PMID: 22658846. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2012.05.002>.
29. Sparchez Z, Radu P, Anton O, et al. Contrast enhanced ultrasound in assessing therapeutic response in ablative treatments of hepatocellular carcinoma. *J Gastrointest Liver Dis*. 2009;18(2):243-8. PMID: 19565061.

30. Minami Y, Kudo M. Image guidance in ablation for hepatocellular carcinoma: contrast-enhanced ultrasound and fusion imaging. *Front. Oncol.* 2021;11:593636. PMID: 33747913. <https://doi.org/10.3389/fonc.2021.593636>.
31. Huang Q, Zeng Q, Long Y, et al. Fusion imaging techniques and contrast-enhanced ultrasound for thermal ablation of hepatocellular carcinoma — A prospective randomized controlled trial. *Int J Hyperthermia.* 2019;36(1):1207-15. PMID: 31813295. <https://doi.org/10.1080/02656736.2019.1687945>.
32. Singh BS, Cazacu IM, Deza CA, et al. Image fusion involving real-time transabdominal or endoscopic ultrasound for gastrointestinal malignancies: review of current and future applications. *Diagnostics (Basel).* 2022;12(12):3218. PMID: 36553225. <https://doi.org/10.3390/diagnostics12123218>.
33. Манукян МШ, Базин ИС, Трякин АА. Особенности мутаций в гене KRAS в реальной клинической практике при раке поджелудочной железы. *Хирургия и онкология.* 2025;15(1):28-35. Manukyan MSh, Bazin IS, Tryakin AA. Characteristics of KRAS gene mutations in real clinical practice for pancreatic cancer. *Surgery and Oncology.* 2025;15(1):28-35. (In Russ.). <https://doi.org/10.17650/2949-5857-2025-15-1-28-35>
34. Фисенко ЕП, Аллаhverдиева ГФ, Данзанова ТЮ и др. Обоснование создания новой классификации оценки поверхностных лимфатических узлов US NODE-RADS (российская версия) по данным ультразвукового исследования: согласованное мнение экспертов Российской ассоциации специалистов ультразвуковой диагностики в медицине. *Хирургия и онкология.* 2024;14(3):11-7. Fisenko EP, Allakhverdieva GF, Danzanova TYu, et al. Rationale for creating a new classification for evaluation superficial lymph nodes US NODE-RADS (Russian version) based on ultrasound data: the consensus of experts of the Russian Association of Ultrasound Diagnostics in Medicine. *Surgery and Oncology.* 2024;14(3):11-7. (In Russ.). <https://doi.org/10.17650/2949-5857-2024-14-3-11-17>
35. Bansal S, Gui J, Merrill C, et al. Contrast-enhanced US in local ablative therapy and secondary surveillance for hepatocellular carcinoma. *Radiographics.* 2019;39(5):1302-22. PMID: 31348734. <https://doi.org/10.1148/rg.2019180205>.
36. Numata K, Fukuda H, Nihonmatsu H, et al. Use of vessel patterns on contrast-enhanced ultrasonography using a perflubutane-based contrast agent for the differential diagnosis of regenerative nodules from early hepatocellular carcinoma or high-grade dysplastic nodules in patients with chronic Liver Disease. *Abdom Imaging.* 2015;40(7):2372-83. PMID: 26099473. <https://doi.org/10.1007/s00261-015-0489-6>.

Вклад авторов

Т.Ю. Данзанова, С.Н. Бердников, Г.Т. Синюкова, П.И. Лепэдату: разработка дизайна.

Т.Ю. Данзанова, Е.А. Зубарева, Е.В. Ковалева: написание текста рукописи, анализ данных, обзор публикаций по теме статьи.

Т.Ю. Данзанова, Е.В. Ковалева: редактирование рукописи.

Authors' contributions

TYu. Danzanova, S.N. Berdnikov, G.T. Sinyukova, P.I. Lepedatu: design development.

TYu. Danzanova, E.A. Zubareva, E.V. Kovaleva: writing the text of the manuscript, data analysis, review of publications on the topic of the article.

TYu. Danzanova, E.V. Kovaleva: manuscript editing.

Information about the authors

Tatiana Yu. Danzanova, <https://orcid.org/0000-0002-6171-6796>;

Pavel I. Lepedatu, <https://orcid.org/0000-0001-7846-1788>;

Galina T. Sinyukova, <https://orcid.org/0000-0002-5697-9268>;

Sergei N. Berdnikov, <https://orcid.org/0000-0003-2586-8562>;

Elena A. Zubareva, <https://orcid.org/0000-0002-0193-0563>;

Ekaterina V. Kovaleva, <https://orcid.org/0000-0003-4567-9160>.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Соответствие принципам этики. Одобрение этического комитета не требовалось. Информированное согласие. Пациент подписал информированное согласие на публикацию данных.

Тип статьи: Обзор литературы.

Поступила: 06.04.2025.

Принята к публикации: 10.05.2025.

Опубликована online: 26.06.2025.

Funding. The study had no sponsorship.

Conflict of interests. Not declared.

Ethical compliance. Ethical committee approval was not necessary.

Informed consent. The patient signed informed consent for the publication of the data.

Article type: Literature review.

Received: 06.04.2025.

Accepted for publication: 10.05.2025.

Published online: 26.06.2025.