

ПЕРСПЕКТИВЫ И ПРЕИМУЩЕСТВА РАДИОМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПРИ ГЕПАТОЦЕЛЛЮЛЯРНОЙ КАРЦИНОМЕ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)

Кодзоева Э.Б.✉, Романова К.А., Медведева Б.М., Дробот Н.Ц.

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

✉ Кодзоева Элина Багаудиновна, elinakodzoeva@gmail.com, +79856472554

РЕФЕРАТ

Введение: Гепатоцеллюлярная карцинома (ГЦК) отличается высокой летальностью из-за трудностей ранней диагностики, субъективности оценки визуализации и отсутствия надежных неинвазивных методов прогнозирования агрессивности и ответа на терапию.

Цель: Оценить возможности и доказательную базу радиомического анализа диагностических изображений для решения ключевых клинических задач при ГЦК.

Материалы и методы: Анализ современных научных данных (российские и зарубежные исследования 2023–2025 гг.). Рассмотрена методология радиомики и ее эффективность для: дифференциальной диагностики ГЦК; прогнозирования микрососудистой инвазии (МСИ); оценки/прогноза эффективности трансартериальной химиоэмболизации (ТАХЭ) и радиочастотной абляции (РЧА).

Результаты: Радиомические модели показали высокую точность (до 96 % чувствительности) в дифференциальной диагностике ГЦК. Интеграция 3D-радиомических признаков с клинико-лабораторными данными позволяет прогнозировать МСИ (чувствительность 76–82 %, специфичность 82–85 %). Комбинированные клинико-радиомические модели эффективнее предсказывают ответ на ТАХЭ (AUC до 0,92) и РЧА (AUC до 0,87), а также риск рецидива, чем традиционные подходы.

Заключение: Радиомический анализ — перспективный инструмент для неинвазивной оценки агрессивности ГЦК и выбора тактики лечения, превосходящий стандартную визуализацию в прогнозировании МСИ и ответа на локальную терапию (ТАХЭ, РЧА). Перспективы: стандартизация, 3D-анализ, мультимодальность, валидация в проспективных исследованиях для внедрения в клинические алгоритмы.

Ключевые слова: гепатоцеллюлярная карцинома, радиомика, микрососудистая инвазия, трансартериальная химиоэмболизация, радиочастотная абляция, эффективность лечения

Для цитирования: Кодзоева Э.Б., Романова К.А., Медведева Б.М., Дробот Н.Ц. Перспективы и преимущества радиомического анализа при гепатоцеллюлярной карциноме (обзор литературы). Онкологический журнал: лучевая диагностика, лучевая терапия. 2025;8(3):78-86.

<https://doi.org/10.37174/2587-7593-2025-8-3-78-86>

Journal of Oncology: Diagnostic Radiology and Radiotherapy

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

ЛУЧЕВАЯ ДИАГНОСТИКА | DIAGNOSTIC RADIOLOGY

<https://doi.org/10.37174/2587-7593-2025-8-3-78-86>

RADIOMIC ANALYSIS IN HEPATOCELLULAR CARCINOMA: PROSPECTS AND CLINICAL BENEFITS (REVIEW)

Elina B. Kodzoeva✉, Ksenia A. Romanova, Bela M. Medvedeva, Natalya Ts. Drobot

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

✉ Elina B. Kodzoeva, elinakodzoeva@gmail.com, +79856472554

ABSTRACT

Introduction: Hepatocellular carcinoma (HCC) is associated with high mortality due to challenges in early diagnosis, the subjectivity of imaging assessments, and the lack of reliable, non-invasive methods for predicting tumor aggressiveness and treatment response.

Purpose: To evaluate the potential and evidence base of radiomic image analysis in addressing key clinical challenges in HCC.

Materials and methods: A review of current scientific literature, including Russian and international studies from 2023 to 2025, was conducted. The methodology of radiomics and its effectiveness were analyzed for the following applications: differential diagnosis of HCC, prediction of microvascular invasion (MVI), and evaluation or prediction of the effectiveness of transarterial chemoembolization (TACE) and radiofrequency ablation (RFA).

Results: Radiomic models demonstrated high accuracy (with sensitivity up to 96 %) in the differential diagnosis of HCC. The integration of 3D radiomic features with clinical and laboratory data enabled the prediction of MVI, achieving sensitivity rates of 76–82 % and specificity of 82–85 %. Combined clinical–radiomic models showed strong performance in predicting response to TACE (AUC up to 0.92) and RFA (AUC up to 0.87), as well as in assessing recurrence risk—outperforming traditional approaches.

Conclusion: Radiomic analysis is a promising non-invasive tool for assessing HCC aggressiveness and guiding treatment selection. It outperforms conventional imaging in predicting MVI and therapeutic response to local treatments such as TACE and RFA.

Key words: hepatocellular carcinoma, radiomics, microvascular invasion, transarterial chemoembolization, radiofrequency ablation, effectiveness of treatment

For citation: Kodzoeva E.B., Romanova K.A., Medvedeva B.M., Drobot N.T. Radiomic Analysis in Hepatocellular Carcinoma: Prospects and Clinical Benefits (Review). Journal of Oncology: Diagnostic Radiology and Radiotherapy. 2025;8(3):78-86. (In Russ.). <https://doi.org/10.37174/2587-7593-2025-8-3-78-86>

Введение

Гепатоцеллюлярная карцинома (ГЦК) занимает третье место среди причин смертности от онкологических заболеваний в мире [1]. При этом ГЦК составляет более 90 % всех случаев первичных злокачественных новообразований печени [2].

Географическое распределение демонстрирует значительную вариабельность: в странах Южной Европы, эндемичных по вирусу гепатита С (ВГС), регистрируются повышенные показатели, около 6,7 случаев на 100 тыс. населения. в то время как Центральная и Восточная Европа характеризуются одним из самых низких уровней — около 4,3 случаев на 100 тыс. В целом, европейский регион составляет около 9,7 % от глобальной заболеваемости ГЦК. По данным GLOBOCAN 2020, США занимают примерно 5,1 % от глобальной заболеваемости ГЦК[3].

Патогенез ГЦК ассоциирован с рядом доказанных факторов риска: цирроз печени, хронический вирусный гепатит В или С (ВГВ или ВГС) [4, 5], длительное злоупотребление алкоголем, метаболический синдром, сахарный диабет и ожирение [6].

Хотя радикальные методы (трансплантация, резекция, абляция) демонстрируют высокую эффективность на ранних стадиях, общая 5-летняя выживаемость при ГЦК остается неудовлетворительной и составляет приблизительно 18 % [7]. Рост показателей смертности при ГЦК отчасти обусловлен ограниченными возможностями скрининга и ранней диагностики этого заболевания. В большинстве случаев ГЦК выявляется на поздних стадиях, когда применение радикальных методов технически невозможно или клинически нецелесообразно[8], что подчеркивает необходимость разработки более точных методов прогнозирования и стратификации риска.

В настоящее время для стандартизации диагностики ГЦК широко применяется система LI-RADS (Liver Imaging Reporting and Data System), которая обеспечивает структурированную интерпретацию данных визуализации [9]. Однако клиническое применение данной системы сталкивается с рядом существенных ограничений, включая субъективность интерпретации пограничных случаев (категории LR-3 и LR-4) [10], недостаточную чувствительность при ранних формах ГЦК [11], а также невозможность точного прогнозирования биологического поведения опухоли. Эти ограничения актуализируют необходимость разработки новых диагностических подходов, способных преодолеть существующие методологические барьеры.

Учитывая эти диагностические сложности, особую перспективу представляют методы искусственного интеллекта, и в частности — радиомика, которая позволяет извлекать количественные

радиологические признаки из медицинских изображений [12]. Данная методика может быть охарактеризована как «цифровая биопсия», позволяющая проводить неинвазивный и воспроизводимый анализ как опухолевой ткани, так и зоны вокруг нее, что обеспечивает комплексную оценку биологических особенностей выявленного новообразования [13].

Материалы и методы

Именно эти уникальные возможности радиомического анализа нашли свое отражение в современных исследованиях. В частности в мета-анализе Miranda et al (2023) [14] подробно рассматривается методологическая основа радиомического анализа, применяемого в диагностике гепатоцеллюлярной карциномы. Авторы подчеркивают, что радиомика представляет собой принципиально новый диагностический подход, основанный на всестороннем количественном анализе медицинских изображений, который трансформирует визуальные данные в сложные математические модели высокой размерности, способные выявлять скрытые диагностические признаки, недоступные при традиционной визуальной оценке.

Согласно исследованию, методический процесс радиомического анализа начинается с тщательной предварительной обработки изображений, включающей нормализацию интенсивности сигнала, коррекцию возможных артефактов и пространственную регистрацию данных для обеспечения сопоставимости результатов. Затем следует критически важный этап сегментации, где с использованием различных методик осуществляется точное выделение не только самой опухолевой массы, но и окружающей ее зоны, что имеет принципиальное значение для оценки опухолевой гетерогенности.

На следующем этапе выполняется извлечение многочисленных количественных характеристик, включающих гистограммные параметры первого порядка, текстурные характеристики второго порядка, анализируемые через матрицы GLCM и GLSZM, а также морфометрические показатели формы и объема. Особую значимость приобретает интеллектуальный анализ полученных данных с применением современных алгоритмов машинного обучения, таких как LASSO-регрессия для оптимального отбора наиболее информативных признаков и методы ансамблевого обучения для построения надежных прогностических моделей.

По мнению авторов, главное преимущество радиомики — уникальная возможность объединять данные разных методов визуализации (КТ, МРТ, ПЭТ), клинические и гистопатологические показатели, что открывает путь к принципиально новым комплексным диагностическим алгоритмам. Завершающим и крайне важным этапом является строгая валидация разработанных моделей на не-

зависимых группах пациентов, имеющая решающее значение для подтверждения их клинической применимости и надежности.

Радиомика в дифференциальной диагностике гепатоцеллюлярной карциномы: современные достижения и перспективы

Радиомика представляет собой активно развивающееся направление медицинской визуализации, занимающее важное место в неинвазивной диагностике очаговых поражений печени. Многочисленные исследования демонстрируют высокую диагностическую эффективность радиомического анализа при дифференциальной диагностике гепатоцеллюлярной карциномы (ГЦК) с другими опухолевыми образованиями, включая гемангиомы, фокальную нодулярную гиперплазию (ФНГ), холангиокарциному и метастазы. В то время как зарубежные исследователи достигли значительных успехов в этой области, российская наука только начинает осваивать потенциал радиомики.

Многочисленные исследования демонстрируют высокую эффективность радиомических моделей, основанных на данных медицинской визуализации. В работе Nie P. et al (2021) [15] была разработана КТ-радиомическая модель для дифференциальной диагностики гепатоцеллюлярной аденомы и гепатоцеллюлярной карциномы у пациентов без цирроза печени. Модель показала впечатляющие результаты: чувствительность 85,0 % в обучающей выборке из 93 пациентов и еще более высокая чувствительность 96,0 % в тестовой группе из 38 пациентов. Эти данные подтверждают потенциал радиомики в решении сложных диагностических задач. В более раннем исследовании (Nie P. et al, 2020) [16] разработанная модель для дифференциации фокальной нодулярной гиперплазии и гепатоцеллюлярной карциномы продемонстрировала стабильно высокую чувствительность на уровне 92,86 % в основной выборке (119 случаев) и 92,31 % в тестовой когорте (37 случаев). Оба исследования проводились с использованием стандартизированного протокола мультифазной компьютерной томографии, что подчеркивает важность унифицированных методик сбора данных.

Значительный вклад в развитие радиомической диагностики внесло исследование Wu J. et al (2019) [17], в котором впервые была предложена модель для дифференциации гепатоцеллюлярной карциномы и гемангиомы печени на основе бесконтрастной магнитно-резонансной томографии. В этом масштабном исследовании участвовали 369 пациентов с 446 очаговыми поражениями (222 ГЦК и 224 гемангиомы). При разделении данных на обучающую (80 % или примерно 295 пациентов с 356–357 очагами) и тестовую (20 % или около 74 пациентов с 89–90 очагами) выборки модель показала

чувствительность 0,76 и 0,822 соответственно. Эти результаты демонстрируют возможность применения радиомики даже при отсутствии контрастного усиления.

В российской науке также достигнуты значительные успехи в этой области. Исследование Васильева Ю.А. и соавт. (2024) [18] представило комплексную КТ-радиомическую модель для дифференциальной диагностики гепатоцеллюлярной карциномы и гемангиомы печени. На репрезентативной выборке, включавшей 219 случаев ГЦК, 67 случаев холангиоцеллюлярного рака и 233 гемангиомы, исследователи разработали высокоточную модель машинного обучения на основе 428 количественных радиомических признаков, извлеченных из нативной и трех постконтрастных фаз КТ-исследования. Модель показала отличную диагностическую эффективность с чувствительностью 86 %, что соответствует лучшим мировым аналогам. Особого внимания заслуживает разработка алгоритма для дифференциации двух типов злокачественных новообразований печени — гепатоцеллюлярного рака и холангиокарциномы, где достигнута исключительно высокая чувствительность 94 % в выявлении ГЦК.

В ретроспективном исследовании Молостовой Ю.В. и соавт. (2024) [19] на базе выборки из 72 пациентов были разработаны радиомические модели, основанные на данных МРТ с контрастным усилением гадооксетовой кислотой. Полученные модели продемонстрировали высокую диагностическую точность при дифференциальной диагностике: показатель площади под кривой (AUC) составил 0,91 для диспластических узлов и раннего гепатоцеллюлярного рака (ГЦК), а также 0,89 — для дифференциальной диагностики раннего и атипичного ГЦК. Хотя в данной работе не приводились показатели чувствительности, AUC > 0,8 соответствует высокой способности к дифференциальной диагностике, сопоставимой с результатами других исследований, где чувствительность достигала 85–95 %.

Эти результаты подтверждают, что российские разработки в области радиомики не уступают зарубежным аналогам и могут успешно применяться в клинической практике.

Радиомические предикторы агрессивного течения ГЦК: микрососудистая инвазия, эффективность локальных методов лечения и прогнозирование рецидивов

Прогнозирование наличия микрососудистой инвазии

Особый исследовательский интерес представляют работы, посвященные прогнозированию микрососудистой инвазии (МСИ) — ключевого фактора агрессивного течения гепатоцеллюляр-

ной карциномы (ГЦК). В крупном ретроспективном исследовании Xu et al. (2019) [20], включившем 495 пациентов с ГЦК (2009–2017 гг.), была разработана радиомическая модель, основанная на данных контрастированной компьютерной томографии (КТ). Модель включила 8 значимых предикторов: уровень АСТ (> 40 Ед/л), уровень альфа-фетопroteина (АФП > 400 нг/мл), нечеткие края опухоли, экстрапеченочный рост, нечеткая капсула, перипухолевое усиление и признаки инвазии в воротную вену. Высокая диагностическая эффективность модели (чувствительность 88,0 % в обучающей выборке ($n = 350$) и 89,8 % в тестовой ($n = 145$) подтверждает ее клиническую значимость для идентификации пациентов с высоким риском агрессивного течения.

В отличие от этого, исследование Zhao Zhang et al (2024) [21] на выборке из 198 пациентов показало, что комбинированная радиомическая модель (контрастная МРТ + клинические данные) достигла чувствительности лишь 65 % при прогнозировании МСИ в тестовой когорте. Авторы связывают этот результат с методологическими особенностями: 1) ограниченная сегментация (ручная 2D-разметка только на одном срезе максимального диаметра опухоли вместо 3D-анализа, что не позволило учесть полную пространственную гетерогенность), 2) приоритет специфичности (сознательная оптимизация для достижения высокой специфичности (81 %) в ущерб чувствительности с целью минимизации ложноположительных результатов), 3) отсутствие ключевых морфологических признаков (исключение визуальных радиологических критериев, таких как перипухолевое усиление и нечеткие края, важных для выявления МСИ).

Последующее исследование Zhong et al (2025) [22], проведенное на выборке из 202 пациентах с опухолями диаметром ≥ 3 см, применило автоматизированные методы 3D-сегментации, что позволило учесть внутриопухолевую гетерогенность и пространственную структуру новообразования. Модель интегрировала клинико-лабораторные параметры (включая уровень АФП и показатели функции печени) и радиологические признаки (нечеткие края, перипухолевое усиление, признаки венозной инвазии), достигнув чувствительности 82 % (обучающая выборка) и 76 % (тестовая выборка) при специфичности 85 % и 82 % соответственно.

Таким образом, представленные данные указывают на то, что радиомические модели, основанные на автоматизированной 3D-сегментации и интеграции клинико-лабораторных данных с ключевыми радиологическими признаками, демонстрируют более высокие и сбалансированные показатели чувствительности и специфичности. Такой подход имеет принципиальное значение для индивидуализации тактики лечения (включая выбор и планирование локальных методов) и оценки прогноза (риска рецидивов) у пациентов с ГЦК.

Прогнозирование ответа на ТАХЭ

Трансартериальная химиоэмболизация (ТАХЭ) остается стандартом лечения для пациентов с гепатоцеллюлярным раком (ГЦК) промежуточной стадии (BCLC B) и отдельных пациентов с распространенной стадией. Низкая частота объективного ответа (что привело к появлению термина «рефрактерность к ТАХЭ») и гепатотоксичность повторных процедур обуславливают необходимость исследований, направленных на повышение эффективности данного метода [23].

В исследовании Masthoff et al (2025) [24] предложен подход к персонализированному выбору техники ТАХЭ на этапе первичного вмешательства, основанный на интеграции клинических факторов (стадия BCLC, этиология заболевания печени) и радиомического признака «Контраст», отражающего неоднородность текстуры опухоли на предоперационных КТ-изображениях, для прогнозирования краткосрочного ответа по критериям mRECIST через 4–6 недель и определения оптимальной методики ТАХЭ (стандартная ТАХЭ, ТАХЭ с липиодол-эмульсией митомицина (ТАХЭ-ЛЭМ) или ТАХЭ с лекарственно-элюирующими микросферами (ТАХЭ-РКМ)) для индивидуального пациента. Ретроспективный анализ 151 пациента с ГЦК (ТАХЭ: $n = 33$, ТАХЭ-ЛЭМ: $n = 69$, ТАХЭ-РКМ: $n = 49$) продемонстрировал статистически значимо более высокую частоту объективного ответа при использовании ТАХЭ-ЛЭМ по сравнению с ТАХЭ. Мультивариантный анализ определил три независимых предиктора ответа: радиомический признак «Контраст» (высокие значения ассоциированы с увеличением вероятности ответа), стадия BCLC B (ассоциирована со снижением вероятности ответа) и вирусная этиология заболевания печени (ассоциирована со снижением вероятности ответа). Эффективность различных техник ТАХЭ существенно варьировала в зависимости от индивидуального профиля пациента, определяемого указанными предикторами. Сопоставление фактически использованных техник ТАХЭ с оптимальными по модели (с максимальной прогнозируемой вероятностью ответа) выявило расхождения в 66,2 % случаев. Это говорит о частом несовпадении клинических решений и рекомендаций модели, ориентированной на краткосрочный ответ, и подтверждает ценность интегрированных клинико-радиомических моделей для индивидуального подбора техники ТАХЭ.

В контексте адъювантной терапии Guo et al (2025) [25] провели комплексный анализ 149 пациентов, разделенных на обучающую ($n = 81$), внутреннюю ($n = 36$) и внешнюю валидационную ($n = 32$) когорты. Все пациенты после радикальной R0-резекции получали стандартную процедуру ТАХЭ в течение 2 месяцев после операции, при этом

собирались клиничко-демографические данные, включая показатели по шкале Чайлд—Пью, стадию BCLC, лабораторные маркеры и гистопатологические характеристики. Результаты исследования продемонстрировали, что радиомическая модель на основе мультипараметрической МРТ показала AUC 0,84, 0,87 и 0,88 для прогнозирования 1-, 3- и 5-летней безрецидивной выживаемости соответственно в обучающей когорте, что значительно превосходило показатели клинической модели (AUC 0,53, 0,61 и 0,63). Особого внимания заслуживает комбинированная модель, интегрирующая радиомические и клинические параметры, которая достигла AUC 0,82, 0,89 и 0,91 на указанные сроки наблюдения, демонстрируя статистически значимое превосходство над изолированными моделями. Аналогичные тенденции были подтверждены во внутренней и внешней валидационных когортах.

Для прогноза первичного ответа на ТАХЭ в работе Zhao et al (2025) [26] предложена комбинированная клиничко-радиомическая модель для пациентов с промежуточно-продвинутой стадией ГЦК (BCLC B-C). На ретроспективной выборке из 122 пациентов (85 в обучающей когорте, 37 в валидационной) авторы определили ключевые предикторы: уровень АФП > 400 нг/мл и 10 радиомических признаков венозной фазы КТ. Комбинированная модель продемонстрировала превосходную прогностическую способность с AUC 0,92 в обучающей и 0,815 в валидационной когортах, значительно превосходя изолированные клиническую (AUC 0,65/0,60) и радиомическую (AUC 0,86/0,75) модели. Разработанная номограмма на основе АФП и радиомического сора (Rad-score — интегрального показателя на основе радиомических признаков) позволяет стратифицировать пациентов по риску неэффективности ТАХЭ, что обосновывает целесообразность раннего перехода на системную терапию для группы высокого риска.

Прогнозирование ответа на РЧА при гепатоцеллюлярной карциноме

Как указано в действующих клинических рекомендациях Европейской ассоциации по изучению печени (EASL), радиочастотная абляция (РЧА) признана стандартом лечения пациентов с гепатоцеллюлярной карциномой (ГЦК) стадий BCLC 0–А, не пригодных для хирургического вмешательства. При этом ключевыми факторами, определяющими эффективность РЧА, являются достижение абляционного края $\geq 0,5$ см, минимизация эффекта теплового сифона (особенно при периваскулярной локализации) и агрессивные биологические характеристики опухоли. В контексте оптимизации прогноза терапевтического ответа значительный интерес представляют современные радиомические подходы.

Исследование Tabari et al (2023) [27] подтверждает этот интерес. В ретроспективную когорту были включены 97 пациентов с ранней стадией ГЦК, которым была выполнена МРТ с внутривенным контрастированием в течение трех месяцев до абляции (76 опухолей подверглись РЧА, 41 — микроволновой абляции) и последующая трансплантация печени (2005–2015 гг.). На основе анализа 117 опухолевых очагов (средний размер 2,4 см) была разработана прогностическая модель, интегрирующая клинические параметры (сывороточный креатинин как наиболее значимый предиктор, возраст, альбумин, пол) и радиомические признаки, извлеченные из артериальной фазы (25–35 с постконтрастного усиления) T_1 -взвешенных МРТ-изображений (максимальная интенсивность сигнала вокселей и максимальное значение вокселя в исходном изображении). Валидация модели продемонстрировала высокую диагностическую точность: AUC = 0,83, чувствительность 82 %, специфичность 67 %, при этом низкий уровень креатинина и молодой возраст были определены как ключевые детерминанты полного патологического ответа.

Дополнительную перспективу прогнозирования оценки эффекта РЧА предлагает исследование Zhang et al (2022) [28], направленное на разработку предоперационной радиомической номограммы для прогнозирования раннего (в течение 2 лет) рецидива у пациентов с малым гепатоцеллюлярным раком (одиночные узлы или до 3 узлов ≤ 3 см). В ретроспективном исследовании участвовали 90 пациентов, получавших РЧА (38 с ранним рецидивом, 52 без рецидива). Исследователи собрали клинические данные (возраст, уровень альбумина, количество и размер опухолей, АФП) и предоперационные мультипараметрические МРТ-изображения (T_1WI , T_2WI , DWI, динамическое контрастное усиление в артериальную, портальную и отсроченную фазы). Из области опухоли на срезе ее максимального сечения на каждой последовательности МРТ было извлечено 1316 радиомных признаков, описывающих гистограммы, форму, текстуру и высокоуровневые характеристики. После отбора наиболее значимых признаков были построены радиомные модели для отдельных МРТ-последовательностей и их комбинаций. Многовариантный анализ выявил, что низкий уровень предоперационного альбумина и наличие множественных опухолей (≥ 2) являются независимыми факторами риска раннего рецидива. Модель, интегрирующая радиомные признаки T_1WI , T_2WI и всех фаз контрастирования, превзошла другие по прогностической способности (AUC 0,822 обучение / 0,812 валидация). Объединение ее rad-score с клиническими факторами риска (уровень альбумина, количество опухолей) в номограмму позволило достичь еще более высокой эффек-

тивности прогноза: AUC 0,869 (обучение) и 0,812 (валидация). Таким образом, радиомика мультипараметрической МРТ выявляет скрытую опухолевую гетерогенность, связанную с риском рецидива после РЧА, а комбинированная номограмма (радиомные признаки + уровень альбумина + количество опухолей) позволяет стратифицировать пациентов по риску для персонализации тактики ведения (усиленное наблюдение, расширенные аблации, адъювантная терапия или альтернативные методы для группы высокого риска). Основными ограничениями работы являются ее ретроспективный одноцентровой дизайн, относительно малая выборка, использование МРТ-сканеров разного поля (1,5 Тл и 3,0 Тл) и проведение анализа только на одном (максимальном) срезе опухоли вместо полного 3D-анализа.

Современное развитие этого направления демонстрирует исследование Ludong Zhao et al (2025) [29], где разработана клинко-радиомическая номограмма, интегрирующая сывороточные биомаркеры (АФП, АФП-ЛЗ) и мультимодальные МРТ-радиомические признаки для прогнозирования плохого прогноза после РЧА у пациентов с ГЦК. Для этапа радиомического анализа и построения прогностических моделей из основной когорты была случайным образом выделена подгруппа из 160 пациентов (1:1 в обучающую и валидационную группы). Помимо стандартных данных, исследование реализовало инновационный подход: два опытных радиолога выполнили 3D-сегментацию всего опухолевого объема, перитуморальных зон и нормальной паренхимы на семи МРТ-последовательностях (T_1 WI-FS, T_2 WI-FS, ADC, артериальная, портальная, переходная и гепатобилиарная фазы) с последующей экстракцией 5185 признаков на пациента. Многоэтапный отбор признаков выявил ключевые предикторы плохого исхода: АФП > 200 нг/мл, АФП-ЛЗ > 10 %, внутриопухолевое кровоизлияние, перитуморальное артериальное усиление и низкий сигнал вокруг опухоли в гепатобилиарной фазе. Особый интерес представляет концепция радиомического сосудистого изображения, объединяющая три визуальных признака: внутриопухолевые артерии, перипухолевый ободок низкой интенсивности и разница сигнала опухоль-печень. Анализ прогностической эффективности отдельных МРТ-последовательностей показал превосходство T_1 WI-FS (AUC 0,874 в обучающей/0,823 в валидационной когорте) и гепатобилиарной фазы (AUC 0,863/0,756). Финальная комбинированная номограмма, включившая клинические факторы, биомаркеры и отобранные радиомические признаки, продемонстрировала высокую точность (89 %), чувствительность (76 %) и специфичность (94 %) в прогнозировании неблагоприятного исхода. Важным методологическим преимуществом данной работы является при-

менение 3D-радиомики вместо анализа единичного среза, что обеспечило более полное отражение опухолевой гетерогенности. Полученные результаты подчеркивают клиническую ценность интеграции динамики сывороточных маркеров (особенно АФП-ЛЗ) с мультипараметрической радиомикой, включая инновационные сосудистые характеристики, для стратификации риска и персонализации ведения пациентов после РЧА, несмотря на имеющиеся ограничения.

Представленные данные подтверждают, что радиомика дополняет и превосходит традиционные методы в прогнозировании ответа на РЧА и риска рецидива ГЦК. Ее ключевое преимущество — способность неинвазивно выявлять биологическую агрессивность опухоли и гетерогенность, критичные для успеха аблации. Перспективы лежат в развитии 3D-подходов и создании клинических инструментов для стратификации пациентов.

Обсуждение

Гепатоцеллюлярная карцинома сохраняет статус одного из наиболее агрессивных злокачественных новообразований. Для данного заболевания характерен крайне неблагоприятный прогноз, сопровождающийся высокой летальностью. Эта проблема обусловлена двумя основными факторами. Во-первых, существуют значительные трудности с выявлением ГЦК на ранних клинически значимых стадиях. Во-вторых, возможности точного прогнозирования индивидуального течения патогенеза и вероятного ответа на терапию остаются ограниченными. Традиционно используемые методы лучевой диагностики, включая стандартизированные подходы в рамках системы LI-RADS, сталкиваются с целым рядом существенных ограничений, среди которых можно выделить неизбежную субъективность визуальной интерпретации изображений, недостаточную чувствительность при обнаружении очаговых изменений на ранних, доклинических стадиях развития, а также неспособность полноценно и количественно оценить ключевые аспекты биологической агрессивности опухолевой ткани. Именно в этом контексте радиомический анализ, представляющий собой современный метод так называемой «цифровой биопсии», открывает принципиально новые диагностические и прогностические перспективы, предлагая пути преодоления указанных ограничений.

Ключевое преимущество радиомического подхода заключается, прежде всего, в его абсолютной неинвазивности и высокой воспроизводимости анализа уже стандартно получаемых диагностических изображений, таких как рентгеновская компьютерная (КТ) и магнитно-резонансная томография (МРТ). Не менее важным аспектом является

уникальная способность радиомики количественно оценивать сложную пространственную структуру, включая внутриопухолевую и перипухолевую гетерогенность тканей, выявляя скрытые, не различимые глазом признаки, которые коррелируют с биологическими характеристиками выявляемого новообразования. Многочисленные научные исследования, включая исследования, проведенные в российских медицинских центрах, последовательно демонстрируют высокую диагностическую точность разрабатываемых радиомических моделей в сложной задаче дифференциальной диагностики ГЦК с другими распространенными доброкачественными (такими как гемангиомы и фокальная нодулярная гиперплазия) и злокачественными (в частности, холангиокарцинома и метастазы) образованиями печени, достигающую впечатляющих значений в диапазоне 85–96 % по показателю чувствительности.

Одним из наиболее значимых и клинически востребованных направлений практического применения радиомики является дооперационное прогнозирование наличия микрососудистой инвазии (МСИ), признаваемой ключевым гистопатологическим фактором, напрямую определяющим степень агрессивности ГЦК и связанный с этим высокий риск раннего рецидива заболевания после проведенного радикального лечения [30]. Наибольшую прогностическую эффективность в решении этой задачи продемонстрировали комплексные модели, основанные на применении методов автоматизированной трехмерной (3D) сегментации всего объема опухоли и последующей интеграции извлеченных радиомических признаков с доступными клинико-лабораторными данными (такими как уровень альфа-фетопротейна — АФП, аспартатаминотрансферазы — АСТ) и общепринятыми визуальными критериями, оцениваемыми при стандартном описании снимков (например, нечеткость контуров опухоли, наличие перипухолевого усиления). Подобные интегрированные, комбинированные подходы демонстрируют сбалансированные и клинически приемлемые показатели как чувствительности (76–82 %), так и специфичности (82–85 %), что объективно превосходит диагностические возможности, предоставляемые исключительно традиционной визуальной оценкой изображений опытным специалистом.

Особую роль радиомика начинает играть в сфере персонализации лечебной стратегии при ГЦК, особенно в ситуациях, требующих выбора между различными методами локально-регионарной терапии. Комбинированные клинико-радиомические модели показывают высокую точность (значения площади под ROC-кривой, AUC, в пределах 0,8–0,92) в прогнозировании ответа на такую распространенную процедуру, как трансартериальная химио-

эмболизация. Это касается оценки как краткосрочного эффекта (согласно общепринятым критериям mRECIST), так и долгосрочных результатов лечения, в частности, показателей безрецидивной выживаемости. Подобные предиктивные модели предоставляют клиницистам реальную возможность стратифицировать пациентов на группы для обоснованного выбора оптимальной техники эмболизации или, что не менее важно, для своевременного рассмотрения вопроса о переходе на методы системной лекарственной терапии в случаях с прогнозируемо низкой вероятностью эффективного ответа на ТАХЭ.

Аналогичные успехи в плане прогностической ценности были достигнуты и в области оценки ожидаемой эффективности другого широко применяемого метода локального воздействия — радиочастотной абляции, а также в предсказании риска развития локального рецидива после ее выполнения. Радиомический анализ данных мультипараметрической МРТ, особенно при использовании методик трехмерной оценки всего объема опухолевого узла и прилежащей перипухолевой зоны, демонстрирует стабильное превосходство над традиционными визуальными и измерительными подходами (AUC 0,81–0,87). Дальнейшая интеграция получаемых радиомических данных с клиническими факторами риска (уровень АФП и его изоформы АФП-Л3, концентрация альбумина в сыворотке крови, количество опухолевых очагов) и инновационными характеристиками, описывающими «сосудистые паттерны» опухоли, при построении комплексных прогностических номограмм открывает новые перспективы для углубленной персонализации не только самого лечения, но и последующего динамического наблюдения за пациентами в послеоперационном периоде.

Несмотря на впечатляющие и обнадеживающие результаты, широкое внедрение радиомических технологий в рутинную клиническую практику сталкивается на текущем этапе с рядом серьезных методологических и технических вызовов, требующих скоординированных усилий научного сообщества. К числу ключевых сохраняющихся ограничений относятся отсутствие унифицированных, общепринятых стандартов протоколов сегментации опухолевых образований, значительная вариабельность параметров получения и обработки изображений между различными диагностическими центрами, а также острая необходимость независимой валидации разработанных прогностических моделей на репрезентативных независимых когортах пациентов. Следует также отметить, что подавляющее большинство опубликованных на сегодняшний день исследований носят ретроспективный характер, что объективно подчеркивает исключительную важность организации и прове-

дения масштабных проспективных мультицентровых клинических испытаний для подтверждения полученных результатов.

Перспективы дальнейшего развития и повышения клинической значимости радиомики тесно связаны с активной интеграцией методов искусственного интеллекта и глубокого машинного обучения для автоматизации трудоемких этапов анализа изображений, а также с комбинированием извлекаемых радиомических данных с информацией, получаемой из других «омиксных» источников, таких как геномные и протеомные маркеры. Такой мультимодальный подход позволит в перспективе создавать значительно более точные и комплексные мультидисциплинарные предиктивные модели, способные отражать истинную биологическую агрессивность конкретной опухоли и индивидуальную чувствительность пациента к различным методам противоопухолевого воздействия. Уже в настоящее время радиомика выступает ценным дополнением к традиционным методам лучевой диагностики, предоставляя врачу уникальные количественные параметры и характеристики, принципиально недоступные при стандартной визуальной оценке снимков.

Заключение

Таким образом, радиомический анализ зарекомендовал себя как мощный и перспективный инструмент для реализации принципов персонализированного подхода в диагностике и лечении пациентов с гепатоцеллюлярной карциномой. Он предлагает неинвазивные, количественные методы для прогнозирования ключевых аспектов заболевания: агрессивности опухолевого роста, вероятного ответа на специфические виды терапии и индивидуального риска развития рецидива. Дальнейшая работа по стандартизации методологии, алгоритмов анализа и строгой валидации существующих моделей в условиях реальной клинической практики позволит в полной мере реализовать значительный потенциал этого динамично развивающегося направления. Это приобретает особую актуальность для российской онкологии, где углубленное изучение радиомики ГЦК становится важной исследовательской задачей.

Список литературы / References

- Bray F, Ferlay J, Soerjomataram I, et al. Global cancer statistics 2018: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. *CA Cancer J Clin.* 2018;68:394-424. <https://doi.org/10.3322/caac.21492>. PMID: 30207593.
- Llovet JM, Kelley RK, Villanueva A, et al. Hepatocellular carcinoma. *Nat Rev Dis Primers.* 2021;7:6. <https://doi.org/10.1038/s41572-020-00240-3>. PMID: 33479224.
- Singal AG, Kanwal F, Llovet JM. Global trends in hepatocellular carcinoma epidemiology: implications for screening, prevention and therapy. *Nat Rev Clin Oncol.* 2023. <https://doi.org/10.1038/s41571-023-00825-3>. PMID: 37884736.
- Jiang Y, Han Q, Zhao H, et al. The Mechanisms of HBV-Induced Hepatocellular Carcinoma. *J Hepatocell Carcinoma.* 2021;8:435-50. <https://doi.org/10.2147/JHC.S307962>. PMID: 34046368.
- D'Ambrosio R, Lampertico P. Is it time to refine HCC surveillance strategies in HCV cured patients? *Hepatology.* 2022;76(1):9-11. <https://doi.org/10.1002/hep.32430>. PMID: 35218241.
- Banini BA, Sanyal AJ. Chapter Four — NAFLD-related HCC. *Adv Cancer Res.* 2021;149:143-69. <https://doi.org/10.1016/bs.acr.2020.11.001>. PMID: 33579423.
- Kim DY. Changing etiology and epidemiology of hepatocellular carcinoma: Asia and worldwide. *Journal of Liver Cancer.* 2022;24(1):62-70. <https://doi.org/10.17998/jlc.2024.03.13>. PMID: 38523466.
- Matsumoto MM, Mouli S, Saxena P, et al. Comparing real world, personalized, multidisciplinary tumor board recommendations with BCLC algorithm: 321-patient analysis. *Cardiovasc Intervent Radiol.* 2021;44:1070-80. <https://doi.org/10.1007/s00270-021-02810-8>. PMID: 33825060.
- American College of Radiology (US). LI-RADS: Liver Imaging Reporting and Data System [Internet]. Reston (VA): American College of Radiology; c2024 [updated 2024 May]. Available from: <https://www.acr.org/Clinical-Resources/Clinical-Tools-and-Reference/Reporting-and-Data-Systems/LI-RADS>.
- Dumbadze, A Tavartkiladze, A Kutateladze, et al. Multi-modal assessment of LI-RADS 3 and 4 lesions: Integrating serum biomarkers, liquid biopsy, and imaging for early hepatocellular carcinoma detection and management. *JJ Oncol Clin Res.* 2024;5:1-25. <https://doi.org/10.17303/jocr.2024.5.201>.
- Liang Y, Xu F, Guo Y, et al. Diagnostic performance of LI-RADS for MRI and CT detection of HCC: A systematic review and diagnostic meta-analysis. *Eur J Radiol.* 2021;134:1094-04. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2020.109404>. PMID: 33276248.
- Huang EP, O'Connor JPB, McShane LM, et al. Criteria for the translation of radiomics into clinically useful tests. *Nat Rev Clin Oncol.* 2023;20(2):69-82. <https://doi.org/10.1038/s41571-022-00707-0>. PMID: 36443594.
- Bera K, Braman N, Gupta A, et al. Predicting cancer outcomes with radiomics and artificial intelligence in radiology. *Nat Rev Clin Oncol.* 2022;19(2):132-46. <https://doi.org/10.1038/s41571-021-00560-7>. PMID: 34663898.
- Miranda J, Horvat N, Fonseca GM, et al. Current status and future perspectives of radiomics in hepatocellular carcinoma. *World J Gastroenterol.* 2023;29(1):43-60. <https://doi.org/10.3748/wjg.v29.i1.43>. PMID: 36683711.
- Nie P, Wang N, Pang J, et al. CT-based radiomics nomogram: a potential tool for differentiating hepatocellular adenoma from hepatocellular carcinoma in the noncirrhotic liver. *Acad Radiol.* 2021;28(6):799-807. <https://doi.org/10.1016/j.acra.2020.04.027>. PMID: 32386828.
- Nie P, Yang G, Guo J, et al. A CT-based radiomics nomogram for differentiation of focal nodular hyperplasia from hepatocellular carcinoma in the non-cirrhotic liver. *Cancer Imaging.* 2020 Feb 24;20(1):20. <https://doi.org/10.1186/s40644-020-00297-z>. PMID: 32093786.
- Wu J, Liu A, Cui J, et al. Radiomics-based classification of hepatocellular carcinoma and hepatic haemangioma on pre-contrast magnetic resonance images. *BMC Med Imaging.* 2019;19:23. <https://doi.org/10.1186/s12880-019-0321-9>. PMID: 30866850.
- Васильев ЮА, Савкина ЕФ, Борисов АА, и др. Использование радиомических признаков для классификации ново-

- образований печени различной этиологии по данным компьютерной томографии. Диагностическая и интервенционная радиология. 2024;18(2.1):79-86.
- Vasil'ev YA, Savkina EF, Borisov AA, et al. Use of radiomic signs for classification of liver neoplasms of various etiology based on computer tomography data. Journal Diagnostic & Interventional Radiology. 2024;18(2.1):79-86. (In Russ.)
19. Молостова ЮВ, Медведева БМ, Кондратьев ЕВ, и др. Возможности текстурного анализа и машинного обучения в МРТ-диагностике раннего ГЦР. Онкологический журнал: лучевая диагностика, лучевая терапия. 2024;7(4):68-73. <https://doi.org/10.37174/2587-7593-2024-7-4-68-73>. Molostova YuV, Medvedeva BM, Kondratyev EV, et al. Capabilities of texture analysis and machine learning in MRI diagnosis of early GCR. Journal of Oncology: Diagnostic Radiology and Radiotherapy. 2024;7(4):68-73. <https://doi.org/10.37174/2587-7593-2024-7-4-68-73>. (In Russ.)
 20. Xu X, Zhang HL, Liu QP, et al. Radiomic analysis of contrast-enhanced CT predicts microvascular invasion and outcome in hepatocellular carcinoma. J Hepatol. 2019;70(6):1133-44. <https://doi.org/10.1016/j.jhep.2019.02.023>. PMID: 30876945.
 21. Zhang Z, Jia X-F, Chen X-Y, et al. Radiomics-based prediction of microvascular invasion grade in nodular hepatocellular carcinoma using contrast-enhanced magnetic resonance imaging. J Hepatocell Carcinoma. 2024;11:1185-92. <https://doi.org/10.2147/JHC.S461420>. PMID: 38933179.
 22. Zhong H, Zhang Y, Zhu G, et al. Preoperative prediction of microvascular invasion and relapse-free survival in hepatocellular Carcinoma ≥ 3 cm using CT radiomics: Development and external validation. BMC Med Imaging. 2025;25:141. <https://doi.org/10.1186/s12880-025-01677-2>. PMID: 40312321.
 23. Li J, Liu Y, Zheng R, et al. Molecular mechanisms of TACE refractoriness: Directions for improvement of the TACE procedure. Life Sci. 2024;42. Art. 122540. <https://doi.org/10.1016/j.lfs.2024.122540>. PMID: 38428568.
 24. Masthoff M, Irle M, Kaldewey D, et al. Integrating CT Radiomics and Clinical Features to Optimize TACE Technique Decision-Making in Hepatocellular Carcinoma. Cancers. 2025;17(5):893. <https://doi.org/10.3390/cancers17050893>. PMID: 40075740.
 25. Guo X, Song J, Zhu L, et al. Multiparametric MRI-based radiomics and clinical nomogram predicts the recurrence of hepatocellular carcinoma after postoperative adjuvant transarterial chemoembolization. BMC Cancer. 2025;25(1):683. <https://doi.org/10.1186/s12885-025-14079-y>. PMID: 40229712.
 26. Zhao KF, Xie CB, Wu Y. Prediction of the efficacy of first transarterial chemoembolization for advanced hepatocellular carcinoma via a clinical-radiomics model. World J Clin Cases. 2025;13(23):101742. <https://doi.org/10.12998/wjcc.v13.i23.101742>.
 27. Tabari A, D'Amore B, Cox, M, et al. Machine Learning-Based Radiomic Features on Pre-Ablation MRI as Predictors of Pathologic Response in Patients with Hepatocellular Carcinoma Who Underwent Hepatic Transplant. Cancers. 2023;15(7), 2058. <https://doi.org/10.3390/cancers15072058>. PMID: 37046718.
 28. Zhang X, Wang C, Zheng D, et al. Radiomics nomogram based on multi-parametric magnetic resonance imaging for predicting early recurrence in small hepatocellular carcinoma after radiofrequency ablation. Front Oncol. 2022;12:1013770. <https://doi.org/10.3389/fonc.2022.1013770>. PMID: 36439458.
 29. Zhao L, Wang J, Song J, et al. Combining serum biomarkers and MRI radiomics to predict treatment outcome after thermal ablation in hepatocellular carcinoma. Am J Transl Res. 2025;17(3):2031-43. <https://doi.org/10.62347/TFRF1430>. PMID: 4022601.
 30. Сакибов БИ, Подлужный ДВ, Патютко ЮИ и др. Отдаленные результаты хирургического лечения больных гепатоцеллюлярным раком промежуточной стадии (CLC): одноцентровое ретроспективное исследование. Хирургия и онкология. 2025;15(2):62-73. Sakibov BI, Podluzhnyi DV, Patyutko Yul, et al. Long-term results of surgical treatment in patients with intermediate stage (CLC) hepatocellular carcinoma: a single-center retrospective study. Surgery and Oncology. 2025;15(2):62-73. (In Russ.). <https://doi.org/10.17650/2949-5857-2025-15-2-62-73>

Вклад авторов

Э.Б. Кодзоева: обзор литературы, написание текста статьи
К.А. Романова: автор идеи, написание текста статьи
Б.М. Медведева: рецензирование текста статьи, общее руководство
Н.Ц. Дробот: рецензирование текста статьи, общее руководство

Authors' contributions

E.B. Kodzoeva: literature review, writing the text of the article
K.A. Romanova: author of the idea, writing the text of the article
B.M. Medvedeva: reviewing the text of the article, general management
N.T. Drobot: reviewing the text of the article, general management

Information about the authors

Elina B. Kodzoeva, <https://orcid.org/0009-0005-3596-3661>
Ksenia A. Romanova, <https://orcid.org/0000-0002-8938-3313>
Bela M. Medvedeva, <https://orcid.org/0000-0003-1779-003X>
Natalya Ts. Drobot, <https://orcid.org/0000-0001-6566-8085>

Финансирование. Договор о предоставлении гранта из федерального бюджета в ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр онкологии им. Н.Н. Блохина» Министерства Здравоохранения Российской Федерации от 16 апреля 2025 г., № 139-15-2025-008, ICG 000000C313925P3R0002.
Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Соответствие принципам этики. Одобрение этического комитета не требовалось.
Информированное согласие. Пациенты подписали информированное согласие на публикацию данных.

Тип статьи: Обзор литературы.
Поступила: 30.06.2025.
Принята к публикации: 12.08.2025.
Опубликована online: 26.09.2025.

Funding. Funding. Grant Agreement from the Federal Budget in the Federal State Budgetary Institution «N.N. Blokhin National Medical Research Center of Oncology» of the Ministry of Health of the Russian Federation, dated April 16, 2025, № 139-15-2025-008, State Contract ID 000000C313925P3R0002.
Conflict of interests. Not declared.
Ethical compliance. Ethical committee approval was not necessary.
Informed consent. The patients signed informed consent for the publication of the data.

Article type: Literature Review
Received: 30.06.2025.
Accepted for publication: 12.08.2025.
Published online: 26.09.2025.