

Искусственный интеллект в сочетании с трехмерным предоперационным планированием в хирургии опухолей печени: сравнительное исследование в реальной клинической практике

А.В. Шабунин^{1,2}, М.М. Тавобилов^{1,2}, А.А. Карпов^{1,2}, М.Н. Аладин^{1,✉}, А.В. Ланцынова¹, К.А. Абрамов¹, Е.Б. Кудряш^{1,2}

¹ ГБУЗ «Московский многопрофильный научно-клинический центр имени С.П. Боткина»

Департамента здравоохранения города Москвы

пр-д 2-й Боткинский, д. 5, г. Москва, 125284, Россия

² ФГБОУ ДПО «Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования»

Министерства здравоохранения Российской Федерации

ул. Баррикадная, д. 2/1, стр. 1, г. Москва, 125993, Россия



Аннотация

Цель. Оценка диагностической и клинической эффективности системы HepatoScan AI, объединяющей нейросетевой анализ компьютерных томограмм (КТ) и интерактивное трехмерное (3D, three-dimensional) предоперационное моделирование в реальной клинической практике.

Материалы и методы. Выполнено одноцентровое сравнительное исследование с проспективной когортой пациентов, у которых предоперационное планирование выполнялось с поддержкой искусственного интеллекта (ИИ, n = 104) и целенаправленно подобранной ретроспективной когортой стандартного планирования

($n = 100$). В группе ИИ применялись автоматическая сегментация печени и очагов, 3D-волюметрия и стратификация анатомической сложности по шкале TROPH-L (Tumor – Regional capsule – Outflow veins – Portal vein – Hepatic bile – Localization, опухоль – отношение к капсуле печени – печеночные вены – воротная вена – желчные протоки – локализация). Диагностическую эффективность оценивали на уровне пациента с использованием показателей чувствительности, специфичности и площади под ROC-кривой (AUROC, area under the receiver operating characteristic curve) с использованием морфологической верификации для злокачественных опухолей и экспертного заключения по мультифазной КТ для доброкачественных образований. Клиническую эффективность анализировали у пациентов категорий TROPH-L II–III.

Результаты. Сравнимые группы были сопоставимы по демографическим и клиническим характеристикам, параметрам очагов и распределению категорий TROPH-L. В общей выборке применение HepatoScan AI сопровождалось увеличением чувствительности предоперационной диагностики до 93,3% по сравнению со стандартным подходом (84,2%; $p = 0,008$) при сохранении высокой специфичности. AUROC была выше в группе ИИ (0,954 против 0,892), однако различия не достигли значимости; в нозологических подгруппах отмечалась сходная тенденция. Среди пациентов с TROPH-L II–III ($n = 54$ – группа ИИ, $n = 55$ – стандартное планирование) применение ИИ ассоциировалось с сокращением длительности операции (160 против 180 мин; $p = 0,01$) и объема интраоперационной кровопотери (280 против 400 мл; $p = 0,004$), более высокой частотой R0-резекций (100% против 91,3%) и меньшей частотой послеоперационных осложнений и внутригоспитальной летальности, без достижения статистической значимости.

Заключение. Интеграция системы HepatoScan AI и интерактивного 3D-предоперационного планирования ассоциируется с повышением диагностической эффективности и улучшением отдельных интраоперационных показателей у пациентов с опухолями печени, особенно при анатомически сложных случаях (TROPH-L II–III). Полученные результаты подтверждают высокий потенциал предложенных цифровых технологий для оптимизации предоперационного планирования и требуют дальнейшей проспективной многоцентровой валидации.

Ключевые слова: компьютерная томография; сегментация медицинских изображений; хирургические исходы; диагностическая точность; волюметрический анализ; системы поддержки принятия клинических решений; классификация TROPH-L

Рубрики MeSH:

ПЕЧЕНИ НОВООБРАЗОВАНИЯ – ДИАГНОСТИЧЕСКОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ

ПЕЧЕНИ НОВООБРАЗОВАНИЯ – ХИРУРГИЯ

ПЕЧЕНЬ – ДИАГНОСТИЧЕСКОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ

ПЕЧЕНЬ – ПАТОЛОГИЯ

ПЕЧЕНЬ – ХИРУРГИЯ

ТРЕХМЕРНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ПОСТРОЕНИЕ

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ

ОПЕРАЦИИ ПЛАНИРОВАНИЕ

Для цитирования: Шабунин А.В., Тавобилов М.М., Карпов А.А., Аладин М.Н., Ланцынова А.В., Абрамов К.А., Кудряш Е.Б. Искусственный интеллект в сочетании с трехмерным предоперационным планированием в хирургии опухолей печени: сравнительное исследование в реальной клинической практике. Сеченовский вестник. 2025; 16(4): 4–19. <https://doi.org/10.47093/2218-7332.2025.16.4.4-19>

КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ:

Аладин Марк Николаевич, младший научный сотрудник, врач-хирург отделения хирургии печени и поджелудочной железы ГБУЗ «ММНКИ им. С.П. Боткина ДЗМ».

Адрес: пр-д 2-й Боткинский, д. 5, г. Москва, 125284, Россия

E-mail: aladinmark97@gmail.com

Соответствие принципам этики. Исследование одобрено на заседании Локального этического комитета (протокол № 15 от 11.10.2022) ФГБОУ ДПО РМАНПО Минздрава России.

Доступ к данным исследования. Данные, подтверждающие выводы этого исследования, можно получить у авторов по обоснованному запросу. Данные и статистические методы, представленные в статье, прошли статистическое рецензирование редактором журнала – сертифицированным специалистом по биостатистике.

© Shabunin A.V., Tavobilov M.M., Karpov A.A., Aladin M.N., Lantsynova A.V., Abramov K.A., Kudryash E.B., 2025

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Статья подготовлена в рамках НИОКТР «Программа снижения послеоперационных осложнений, летальности и улучшения показателей выживаемости у больных с доброкачественными и онкологическими заболеваниями печени посредством технологии нейронных сетей и предоперационного трехмерного моделирования» (№ ЕГИСУ: 123042600026-2) в соответствии с Приказом Департамента здравоохранения г. Москвы от 21.12.2022 № 1196 «Об утверждении государственных заданий, финансовое обеспечение которых осуществляется за счет средств бюджета города Москвы, государственным бюджетным (автономным) учреждениям, подведомственным Департаменту здравоохранения города Москвы, на 2023 год и плановый период 2024 и 2025 годов».

Благодарность. Авторы выражают благодарность заведующему отделением лучевой диагностики ГБУЗ «ММНКЦ им. С.П. Боткина ДЗМ» Онищенко Максиму Павловичу за содействие в организации лучевых исследований, а также сотрудникам ГБУЗ «НПКЦ ДиТ ДЗМ»: главному врачу Васильеву Юрию Александровичу, руководителю по управлению подразделениями Дирекции Наука Омелянской Ольге Васильевне, руководителю отдела медицинской информатики, радиомики и радиогеномики Арзамасову Кириллу Михайловичу, заместителю руководителя отдела медицинской информатики, радиомики и радиогеномики Пестренину Льву Дмитриевичу и младшему научному сотруднику отдела радиомики и радиогеномики Савкиной Екатерине Феликсовне за вклад в разработку системы HepatoScan AI, обработку и анализ лучевых исследований.

Поступила: 16.10.2025

Принята: 04.12.2025

Дата печати: 30.12.2025

Artificial intelligence – assisted three-dimensional preoperative planning in liver tumor surgery: a comparative real-world study

Alexey V. Shabunin^{1,2}, Mikhail M. Tavobilov^{1,2}, Alexey A. Karpov^{1,2}, Mark N. Aladin^{1,✉}, Aysa V. Lantsynova¹, Kirill A. Abramov¹, Evgeny B. Kudryash^{1,2}

¹ Botkin Hospital

5, 2nd Botkinsky proezd, Moscow, 125284, Russia

² Russian Medical Academy of Continuous Professional Education

2/1, bld. 1, Barrikadnaya str., Moscow, 125993, Russia

Abstract

Aim. Evaluation of the diagnostic and clinical effectiveness of the HepatoScan AI system, integrating neural network-based computed tomography (CT) analysis and interactive three-dimensional (3D) preoperative modeling in real-world clinical practice.

Materials and methods. A single-center comparative study was conducted, including a prospective cohort with artificial intelligence-assisted (AI) preoperative planning ($n = 104$) and a purposefully matched retrospective cohort undergoing standard preoperative planning ($n = 100$). In the AI-assisted group, automated liver and lesion segmentation, 3D volumetry, and stratification of anatomical complexity using the TROPH-L (Tumor – Regional capsule – Outflow veins – Portal vein – Hepatic bile – Localization) classification were applied. Diagnostic performance was assessed at the patient level using sensitivity, specificity, and AUROC (area under the receiver operating characteristic curve), with histopathological confirmation for malignant tumors and expert interpretation of multiphasic CT for benign lesions. Clinical effectiveness was analyzed in patients classified as TROPH-L II–III.

Results. The compared groups were well balanced in terms of demographic and clinical characteristics, lesion parameters, and distribution of TROPH-L categories. In the overall cohort, the use of HepatoScan AI was associated with a higher sensitivity of preoperative diagnosis compared with the standard approach (93.3% vs. 84.2%; $p = 0.008$), while maintaining high specificity. The AUROC was higher in the AI group (0.954 vs. 0.892), although the difference was not statistically significant; a similar trend was observed across nosological subgroups.

Among patients classified as TROPH-L II–III ($n = 54$ in the AI group and $n = 55$ in the standard planning group), AI-assisted planning was associated with a shorter operative time (160 vs. 180 minutes; $p = 0.01$) and reduced intraoperative blood loss (280 vs. 400 mL; $p = 0.004$). In addition, a higher rate of R0 resections (100% vs. 91.3%) and lower rates of postoperative complications and in-hospital mortality were observed in the AI group, although these differences were not statistically significant.

Conclusion. Integration of the HepatoScan AI system with interactive 3D preoperative planning is associated with improved diagnostic performance and favorable intraoperative metrics in patients with liver tumors, particularly in anatomically complex cases (TROPH-L II–III). These findings highlight the strong potential of the proposed digital technologies to optimize preoperative planning and warrant further prospective multicenter validation.

Keywords: computed tomography; medical image segmentation; surgical outcomes; diagnostic accuracy; volumetric analysis; clinical decision support systems; TROPH-L classification

MeSH terms:

LIVER NEOPLASMS – DIAGNOSTIC IMAGING

LIVER NEOPLASMS – SURGERY

LIVER – DIAGNOSTIC IMAGING

LIVER – PATHOLOGY

LIVER – SURGERY

IMAGING, THREE-DIMENSIONAL

ARTIFICIAL INTELLIGENCE

OPERATIONS SCHEDULING

For citation: Shabunin A.V., Tavobilov M.M., Karpov A.A., Aladin M.N., Lantsynova A.V., Abramov K.A., Kudryash E.B. Artificial intelligence – assisted three-dimensional preoperative planning in liver tumor surgery: a comparative real-world study. *Sechenov Medical Journal*. 2025; 16(4): 4–19. <https://doi.org/10.47093/2218-7332.2025.16.4.4-19>

CONTACT INFORMATION:

Mark N. Aladin, Junior Researcher, Surgeon, Department of Hepatopancreatobiliary Surgery, Botkin Hospital.

Address: 5, 2nd Botkinsky proezd, Moscow, 125284, Russia

E-mail: aladinmark97@gmail.com

Ethics statements. The study was approved by the Local Ethics Committee (Protocol No. 15 dated 11 October 2022) of the Russian Medical Academy of Continuous Professional Education, Ministry of Health of the Russian Federation.

Data availability. The data confirming the findings of this study are available from the authors upon reasonable request. Data and statistical methods used in the article were examined by a professional biostatistician on the Sechenov Medical Journal editorial staff.

Conflict of interest. The authors declare that there is no conflict of interests.

Financing. This study was supported by a government-funded Research and Development project aimed at reducing postoperative complications and mortality and improving survival outcomes in patients with benign and malignant liver diseases through the use of neural network technologies and preoperative three-dimensional modeling (EGISU No. 123042600026-2). The project was approved by the Moscow City Health Department under Order No. 1196 dated December 21, 2022, covering the period 2023–2025.

Acknowledgements. The authors express their deep gratitude to the Head of the Department of Radiology of Botkin Hospital Maxim P. Onishchenko for his assistance in organizing radiological examinations, as well as to the staff of the Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies: Chief Physician Yuri A. Vasiliev, Head of the Directorate for Scientific Division Management Olga V. Omelyanskaya, Head of the Department of Medical Informatics, Radiomics, and Radiogenomics Kirill M. Arzamasov, Deputy Head of the Department of Medical Informatics, Radiomics and Radiogenomics Lev D. Pestrenin, and Junior Researcher of the Department of Radiomics and Radiogenomics Ekaterina F. Savkina, for their contribution to the development of the HepatoScan AI system and to the processing and analysis of radiological examinations.

Received: 16.10.2025

Accepted: 04.12.2025

Date of publication: 30.12.2025

Список сокращений:

TROPH-L – Tumor – Regional capsule – Outflow veins – Portal vein – Hepatic bile – Localization, опухоль – отношение к капсуле печени – печеночные вены (отток) – воротная вена – желчные протоки – локализация

3D – three-dimensional, трехмерный
ИИ – искусственный интеллект
КТ – компьютерная томография
ФНГ – фокальная нодулярная гиперплазия

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

HepatoScan AI объективизирует предоперационный анализ за счет автоматической сегментации и количественной оценки анатомо-волюметрических параметров печени.

Интеграция HepatoScan AI в диагностику опухолей печени повышает чувствительность предоперационного выявления очаговых образований печени при сохранении высокой специфичности.

Классификация TROPH-L стандартизирует оценку анатомической сложности очаговых образований печени и повышает воспроизводимость хирургического планирования.

Использование технологий искусственного интеллекта и трехмерного предоперационного планирования у пациентов TROPH-L II–III ассоциируется с улучшением интраоперационных показателей и более точным определением границ органосохраняющих R0-резекций.

Опухоли печени представляют значимую проблему здравоохранения, занимая одно из ведущих мест по смертности от рака [1]. В клинической практике современные стационары сталкиваются с необходимостью оперативного и точного принятия наиболее эффективных и безопасных диагностических и лечебных решений при ведении пациентов с объемными новообразованиями печени [2]. Эта патология остается крайне сложной: радикальное лечение таких пациентов часто сопряжено с высоким риском интра- и послеоперационных осложнений, а долгосрочные результаты нередко неудовлетворительны [3].

Важно подчеркнуть, что комплексная диагностика и планирование хирургического лечения необходимы не только при злокачественных, но и при доброкачественных очаговых образованиях печени. Крупные гемангиомы, аденомы, фокальная нодулярная гиперплазия (ФНГ) и сложные кисты в ряде случаев могут приводить к выраженному болевому синдрому, риску разрыва, компрессии сосудов и желчных протоков, что делает их клинически значимыми и требует тщательного предоперационного анализа [4].

В этой связи растет интерес к внедрению технологий искусственного интеллекта (ИИ) и трехмерного (3D, three-dimensional) моделирования в клиническую практику хирургии печени [5]. Интеграция ИИ-сервисов и 3D-визуализации принципиально трансформирует процесс клинического принятия решений, позволяя перейти от субъективной интерпретации изображений к объективному анализу количественных данных [6]. Современные нейросетевые алгоритмы уже демонстрируют способность автоматически сегментировать структуры печени на изображениях компьютерной томографии (КТ) с точностью до 92–94%, что повышает воспроизводимость диагностики и сокращает ее временные затраты [7].

Совместное использование ИИ-сервисов и 3D-моделирования позволяет формировать персонализированные виртуальные реконструкции печени с высокой точностью визуализации очаговых образований печени и их анатомических взаимоотношений с сосудистыми структурами и билиарным деревом [8]. Это, в свою очередь, ускоряет диагностический этап, снижая необходимость в ряде инвазивных процедур и уменьшая нагрузку на пациента [9]. Результаты

клинических исследований показывают, что применение 3D-навигации и 3D-реконструкций ассоциируется со значительным сокращением длительности операций и снижением частоты R1-резекций, что напрямую способствует повышению хирургической результативности и безопасности вмешательств [4, 10]. Таким образом, цифровые технологии не только ускоряют этап диагностики и планирования, но и повышают качество хирургической помощи пациентам с опухолями печени [11].

Цель исследования: оценить диагностическую и клиническую эффективность системы поддержки принятия врачебных решений HepatoScan AI, объединяющую нейросетевой анализ медицинских изображений и интерактивную 3D-визуализацию, в условиях реальной клинической практики.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Разработка нейросетевого алгоритма

Разработка и валидация системы поддержки принятия врачебных решений – HepatoScan AI при очаговых образованиях печени выполнена в сотрудничестве ГБУЗ «ММНКЦ им. С.П. Боткина ДЗМ» и ГБУЗ «НПКЦ ДиТ ДЗМ». Система зарегистрирована в Российской Федерации в качестве программы для ЭВМ [12].

Подробно процесс обучения программы и показатели точности классификации доброкачественных и злокачественных новообразований представлены нами ранее [13].

Разработка клинко-инструментальной классификации TROPH-L

Для унификации описания морфологических и анатомических характеристик очаговых образований печени, а также стандартизации предоперационного планирования нами разработана классификация TROPH-L (Tumor – Regional capsule – Outflow veins – Portal vein – Hepatic bile – Localization, опухоль – отношение к капсуле печени – печеночные вены (отток) – воротная вена – желчные протоки – локализация). Она предназначена для системного анализа пространственных взаимосвязей опухоли с основными структурами печени на основе данных 3D-моделирования и нейросетевой сегментации.

В основе классификации лежит интеграция морфологических и топографо-анатомических признаков, полученных из виртуальной 3D-модели, с клинически значимыми параметрами резектабельности. Критерии TROPH-L включают:

- T (Tumor size and growth type) – размер очага и характер роста.
- R (Relation to capsule) – отношение новообразования к капсуле печени.
- O (Outflow veins involvement) – вовлечение печеночных вен.
- P (Portal vein involvement) – степень вовлечения ветвей воротной вены.
- H (Hepatic bile involvement) – анатомическое отношение к желчным протокам.
- L (Localization) – анатомическая локализация в системе сегментов Couinaud, с указанием доли и сегмента.

Алгоритм трехмерного предоперационного моделирования

Для предоперационного планирования использован специализированный алгоритм 3D-моделирования с расчетом объемных показателей печени и последующей стратификацией пациентов по классификации TROPH-L. Предоперационные КТ-исследования с контрастным усилением импортировались в программную среду 3D Slicer в формате NIfTI. Здесь выполнялась анатомическая реконструкция печени с полуавтоматической сегментацией сосудистых и билиарных структур [14].

На втором этапе применялось расширение Slicer-Liver для автоматического построения границ сегментов печени по Couinaud и вычисления центральных линий сосудистых деревьев. Следующим этапом выполнялось виртуальное моделирование резекции печени. В модуле Resections задавалась линия предполагаемой резекции с автоматическим расчетом объемов печеночной паренхимы: общего объема печени (TLV, total liver volume), объема резецируемой части (RV, resection volume), объема остаточной печени (RLV, remnant liver volume), а также объема очагового образования (TuV, tumor volume).

Автоматически вычислялся скорректированный объем будущего остатка печени (aFLR, adjusted future liver remnant), отражающий долю функционально сохраненной паренхимы и служащий критерием безопасности планируемого вмешательства (оптимальное значение $\geq 30\%$). Готовые модели экспортировались в формат STL, проходили постобработку в программе Blender (Blender Online Community, Version 4.0.2) с присвоением цветовых меток анатомических структур, после чего конвертировались в glTF (.glb)

для использования в системах 3D-визуализации и дополненной реальности¹.

Весь процесс 3D-моделирования выполнялся хирургами специализированного отделения гепатопанкреатобилиарной хирургии, обладающими навыками работы в 3D-редакторе, совместно с врачом лучевой диагностики ГБУЗ «ММНКЦ им. С.П. Боткина ДЗМ». Первичная автоматическая сегментация структур на КТ, выполненная системой HepatoScan AI, проверялась и при необходимости вручную корректировалась заведующим отделением лучевой диагностики М.П. Онищенко.

Финальное построение виртуальной модели печени и планирование объема резекции выполнялись в тесном междисциплинарном взаимодействии оперирующего хирурга (М.М. Тавобилов, А.А. Карпов, А.В. Ланцынова, М.Н. Аладин, К.А. Абрамов, Е.Б. Кудряш) и специалиста по 3D-моделированию (М.Н. Аладин). Среднее время создания индивидуальной 3D-модели составляло около одного часа (рис. 1).

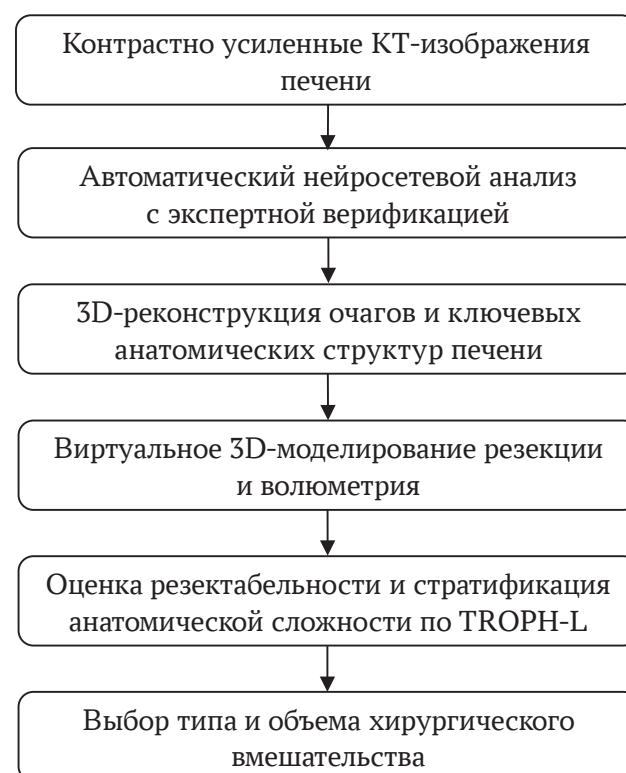


РИС. 1. Алгоритм трехмерного предоперационного моделирования при хирургическом лечении очаговых образований печени.

Примечание: TROPH-L – Tumor – Regional capsule – Outflow veins – Portal vein – Hepatic bile – Localization, опухоль – отношение к капсуле печени – печеночные вены (отток) – воротная вена – желчные протоки – локализация; 3D – three-dimensional, трехмерный; КТ – компьютерная томография.

¹ Blender Foundation. Blender – free and open-source 3D creation suite. Amsterdam: Blender Foundation; 2025. <https://www.blender.org> (дата обращения: 24.10.2025).

Стратификация пациентов по классификации TROPH-L

Разработанная классификация TROPH-L позволяет структурировать морфолого-анатомические характеристики очаговых образований печени и стратифицировать пациентов на три категории сложности оперативного лечения, что имеет ключевое значение при планировании объема вмешательства и выборе тактики лечения (табл. 1).

Такое распределение дает возможность прогнозировать: объем и сложность операции, необходимость применения расширенных или комбинированных резекций, а также потенциальный риск осложнений. Интеграция TROPH-L с системой HepatoScan AI и алгоритмами 3D-моделирования формирует комплексный предоперационный инструментарий, основанный на объективных анатомо-функциональных данных, что обеспечивает более высокую точность хирургического планирования по сравнению с традиционными субъективными подходами.

Дизайн исследования

Проведено одноцентровое сравнительное исследование в условиях реальной клинической

практики с включением проспективной когорты с ИИ-поддержкой предоперационного планирования и целенаправленно подобранной ретроспективной когорты, в которой применялись стандартные методы предоперационного планирования.

Расчет объема выборки

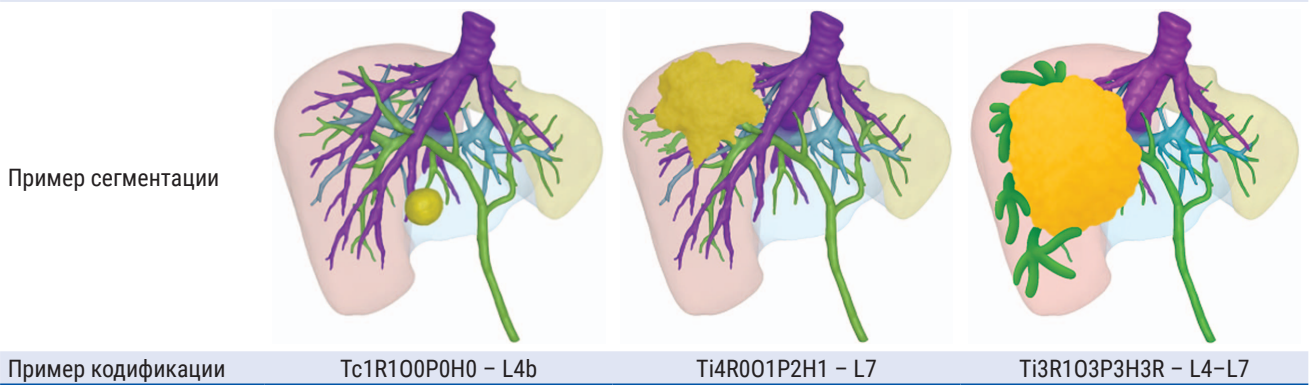
Расчет необходимого числа пациентов проводился исходя из первичной конечной точки – различий в диагностической эффективности (чувствительность выявления и дифференциальной диагностики очаговых образований печени). Согласно опубликованным данным, внедрение алгоритмов ИИ в лучевую диагностику позволяет повысить чувствительность диагностики на 8–12%. При ожидаемом увеличении чувствительности не менее чем на 8%, уровне статистической значимости $\alpha = 0,05$ и мощности исследования 80% минимально необходимый размер выборки составил не менее 90 пациентов в каждой группе.

Набор пациентов в группы

Для участия в исследовании анализировались все пациенты, оперированные в специализированном отделении хирургии печени и поджелудочной железы

Таблица 1. Категории сложности оперативного лечения по TROPH-L

Характеристика	I (низкий риск)	II (умеренный риск)	III (высокий риск)
Размер очага и характер роста	<5 см, периферическое расположение	5–10 см	центрально расположенная или множественная опухоль
Отношение новообразования к капсуле печени	субкапсулярно	субкапсулярно или интрапаренхиматозно	субкапсулярно или интрапаренхиматозно
Вовлечение печеночных вен	нет	инвазия в сегментарные сосуды	инвазия в магистральные ветви
Вовлечение ветвей воротной вены	нет	инвазия в сегментарные сосуды	инвазия в магистральные ветви
Билиарная гипертензия	нет	сегментарная или секторальная	долевая
Планирование операции	технически безопасный объем резекции	использование 3D-моделирования для определения линии резекции	детальная 3D-реконструкция и оценка aFLR
Волюметрия	не требуется	рекомендуется расчет: TLV, RV, RLV, TuV, aFLR	обязателен расчет: TLV, RV, RLV, TuV, aFLR



Примечания: зеленый цвет – желчные протоки, фиолетовый – система печеночных вен, синий – система воротной вены, желтый – очаговое образование.
aFLR – adjusted future liver remnant, скорректированный объем будущего остатка печени; RLV – remnant liver volume, объем остаточной печени; RV – resection volume, объем резецируемой части; TLV – total liver volume, общий объем печени; TuV – tumor volume, объем очагового образования; 3D – three-dimensional, трехмерный.

ГБУЗ «ММНКЦ им. С.П. Боткина ДЗМ» в период с 21.01.2021 по 27.06.2025.

Критерии включения:

- возраст ≥ 18 лет;
- подписанное информированное согласие на участие в исследовании;
- наличие очагового образования печени, требующего хирургического лечения;
- наличие предоперационного мультифазного КТ-исследования органов брюшной полости с контрастным усилением;
- наличие данных интраоперационной оценки и/или гистологической верификации.

Критерии не включения:

- паразитарные кисты печени;
- метастатические опухоли печени, саркомы печени;
- диагностически неинформативные КТ-изображения;
- неполный объем клинических или лучевых данных.

В проспективную когорту с ИИ-поддержкой предоперационного планирования включались пациенты, проходившие лечение в период с 01.02.2023 по 27.06.2025, у которых в процессе предоперационного планирования использовалась система поддержки принятия врачебных решений HepatoScan AI с интеграцией 3D-моделирования. Исходно для включения в данную когорту оценены 148 пациентов; критерии не включения были выявлены у 44 пациентов. В итоговый анализ включены 104 пациента (рис. 2). Распределение по нозологическим формам было следующим: карциномы печени ($n = 30$), в том числе холангиоцеллюлярная карцинома (ХЦК, $n = 11$) и гепатоцеллюлярная карцинома (ГЦК, $n = 19$), гемангиомы печени ($n = 22$), простые кисты печени ($n = 30$) и ФНГ ($n = 22$).

Для минимизации влияния различий в нозологическом составе на анализ диагностической и хирургической эффективности в соответствии с общепринятой методологией сравнительных хирургических исследований был выполнен целенаправленный подбор ретроспективной когорты на уровне подгрупп по нозологическим формам с учетом сопоставимости размеров очаговых образований и основных демографических характеристик.

Для включения в группу стандартного предоперационного планирования (ретроспективная когорта) оценены 174 пациента с очаговыми образованиями печени, перенесшие хирургическое лечение в период с 21.01.2021 по 25.01.2023, у которых применялись стандартные методы предоперационного планирования. В соответствии с критериями исключения были исключены 74 пациента. В итоговый анализ включены 100 пациентов со следующими нозологическими формами: карциномы печени ($n = 27$), в том числе ХЦК ($n = 7$) и ГЦК ($n = 20$); гемангиомы печени ($n = 23$), простые кисты печени ($n = 30$) и ФНГ ($n = 20$). Включение пациентов в исследование представлено на рисунке 2.

Анализ диагностической эффективности

Все пациенты в обеих когортах были объектом для оценки диагностической эффективности. Для каждого пациента формировалось единое предоперационное диагностическое заключение о характере очагового образования печени, которое использовалось для расчета диагностических метрик. При наличии у пациента нескольких очаговых образований анализ выполнялся на уровне клинически значимого очага, определявшего тактику хирургического лечения.

Сопоставление результатов, полученных с использованием системы HepatoScan AI, с референсным стандартом проводилось экспертным способом на уровне клинического диагностического заключения.

В качестве референсного стандарта диагностики использовались различные подходы в зависимости от характера очагового образования печени. При подозрении на злокачественные новообразования диагностическая эффективность оценивалась путем сопоставления предоперационного заключения системы HepatoScan AI с результатами предоперационной морфологической верификации (биопсии) с последующим подтверждением окончательного диагноза по данным гистологического исследования удаленного препарата. При доброкачественных очаговых образованиях печени референсным стандартом служило заключение врача лучевой диагностики, основанное на данных мультифазной КТ с контрастным усилением и подтвержденное интраоперационной визуализацией и клиническим течением заболевания.

Анализ клинической эффективности

В анализ клинической эффективности системы поддержки принятия врачебных решений HepatoScan AI были включены пациенты из сформированных когорт с анатомически сложными очаговыми образованиями печени, соответствующими категориям TROPH-L II–III.

Пациенты с образованиями категории TROPH-L I были исключены из анализа: 50 пациентов из проспективной и 45 пациентов из ретроспективной когорты. Среди исключенных находились все пациенты с простыми кистами печени из обеих когорт; всем им была выполнена фенестрация.

В итоговый анализ клинической эффективности вошли 54 пациента из проспективной когорты и 55 пациентов из ретроспективной когорты с карциномами печени, гемангиомами и ФНГ. В сравниваемых группах оценивались длительность оперативного вмешательства, объем интраоперационной кровопотери и частота выполнения гемотрансфузий. Кроме того, анализировались радикальность хирургического лечения у пациентов с карциномами печени (частота R0-резекций), частота послеоперационных осложнений, включая тяжелые осложнения III–V классов по классификации Clavien–Dindo, длительность госпитализации и внутригоспитальная летальность.

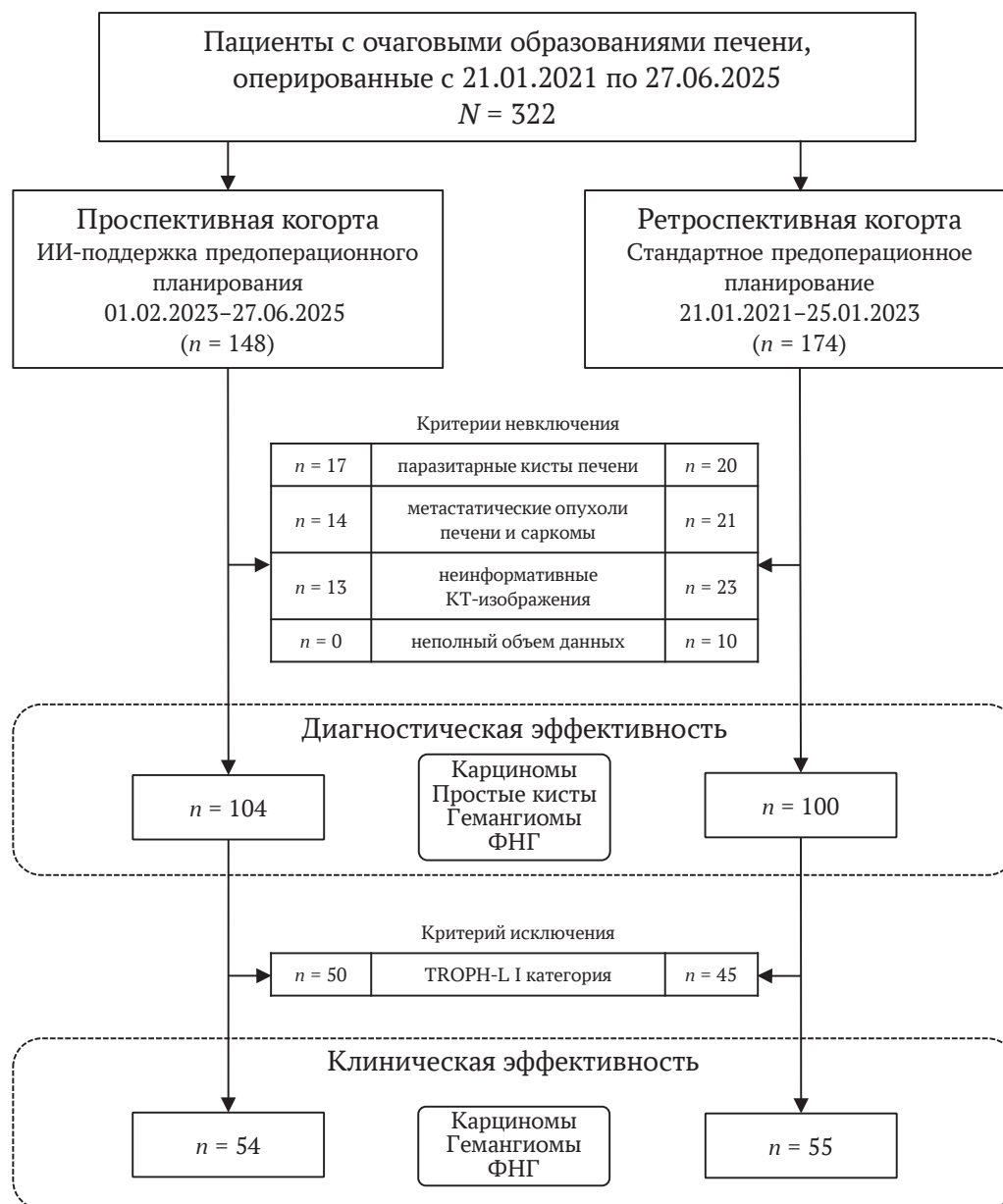


РИС. 2. Поточковая диаграмма включения пациентов в исследование.

Примечание: TROPH-L – Tumor – Regional capsule – Outflow veins – Portal vein – Hepatic bile – Localization, опухоль – отношение к капсуле печени – печеночные вены (отток) – воротная вена – желчные протоки – локализация; ИИ – искусственный интеллект; КТ – компьютерная томография; ФНГ – фокальная нодулярная гиперплазия.

Хирургическая техника

Все хирургические вмешательства выполнялись по стандартным методикам. Выбор хирургического доступа (открытый или лапароскопический) определялся индивидуально с учетом локализации очагового образования, его размеров, взаимоотношений с сосудисто-билиарными структурами и предполагаемого объема резекции. Диссекция паренхимы печени выполнялась с использованием ультразвукового диссектора и биполярной коагуляции, а также, в некоторых случаях, ультразвуковым деструктором-аспиратором с поэтапным контролем сосудистых и билиарных структур. Маневр Прингла применялся

селективно, по показаниям, при ожидаемом риске значимой интраоперационной кровопотери.

Статистический анализ

Статистическая обработка данных выполнена с использованием программного обеспечения IBM SPSS Statistics v.30.0 (SPSS: An IBM Company, США) и языка программирования R (версия 4.4.1) с применением специализированных пакетов rROC (версия 1.18.0) и stats (базовый пакет R).

Количественные показатели предварительно оценивались на соответствие нормальному распределению с использованием критерия Шапиро–Уилка.

В зависимости от характера распределения данные представлены в виде среднего значения и стандартного отклонения ($M \pm SD$) либо в виде медианы и межквартильного размаха ($Me (Q1; Q3)$). Сравнение количественных показателей между группами осуществлялось с применением t -критерия Стьюдента при нормальном распределении данных или непараметрического критерия Манна-Уитни при ненормальном распределении.

Категориальные переменные представлены в виде абсолютных и относительных значений и сравнивались с использованием χ^2 -критерия Пирсона либо точного критерия Фишера при ожидаемых частотах менее 5. Сравнение частоты гемотрансфузий между группами выполнялось на основании агрегированных данных с использованием пуассоновской модели для расчета отношения частот (Incidence Rate Ratio, IRR).

Оценка диагностической эффективности системы HepatoScan AI выполнялась на уровне пациента и включала расчет чувствительности, специфичности и площади под ROC-кривой (AUROC, area under the receiver operating characteristic curve) с определением 95% доверительных интервалов (ДИ).

В качестве референсного стандарта для злокачественных очаговых образований печени использовались результаты предоперационной морфологической верификации (биопсии) с последующим подтверждением окончательного диагноза по данным гистологического исследования удаленного препарата. Для доброкачественных очаговых образований печени референсным стандартом служило заключение врача лучевой диагностики, основанное на данных мультифазной КТ с контрастным усилением и подтвержденное интраоперационной визуализацией и клиническим течением заболевания. Сравнение значений AUROC между группами проводилось с использованием непараметрического критерия Делонга.

Различия считались статистически значимыми при уровне $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Диагностическая эффективность системы HepatoScan AI

По основным демографическим показателям группы не различались (возраст, пол, сопутствующие и фоновые заболевания). Группы не имели статистически значимых различий по размеру, числу, множественности и локализации очаговых образований. Ретроспективная оценка сложности случаев из группы стандартного предоперационного планирования по шкале TROPH-L продемонстрировала сопоставимое распределение категорий риска с проспективной группой с ИИ-поддержкой предоперационного планирования (табл. 2).

При анализе отдельных нозологических подгрупп статистически значимых различий по чувствитель-

ности и специфичности и AUROC между группами выявлено не было. Во всех подгруппах отмечалась однонаправленная тенденция к повышению диагностических метрик в группе с ИИ-поддержкой предоперационного планирования, однако вследствие ограниченного размера подвыборок данные различия не достигли уровня статистической значимости. При сравнении диагностических метрик для всех видов очаговых образований установлено, что интеграция системы HepatoScan AI сопровождалась повышением чувствительности диагностики очаговых образований печени по сравнению со стандартным диагностическим подходом (табл. 3).

Клиническая эффективность системы HepatoScan AI и трехмерного предоперационного моделирования

Применение 3D-моделирования было наиболее клинически обосновано у пациентов категорий TROPH-L II и III, к которым относились 54 пациента из проспективной когорты и 55 пациентов из ретроспективной. Основные клиничко-демографические характеристики сравниваемых групп, частота коморбидности, размер очагов, локализация, частота, стадии и степени дифференцировки карцином не различались (табл. 4).

На хирургическом этапе интеграция нейросетевой системы поддержки принятия врачебных решений HepatoScan AI в сочетании с технологиями предоперационного 3D-моделирования оказала значимое влияние на выбор тактики оперативного вмешательства у пациентов категорий TROPH-L II-III. В группе с ИИ-поддержкой предоперационного планирования отмечалась тенденция к более органосохраняющему подходу: расширенные анатомические резекции печени выполнялись реже (27,8% против 38,2% в группе стандартного предоперационного планирования), тогда как доля атипичных резекций была выше (55,6% против 45,5%). Частота выполнения сегментэктомий между группами статистически значимо не различалась (табл. 5)

В подгруппе пациентов с карциномами R0-резекция была достигнута у всех пациентов группы с ИИ-поддержкой предоперационного планирования (100%) по сравнению с 91,3% в группе стандартного предоперационного планирования; выявленные различия не достигли статистической значимости ($p = 0,18$).

Использование технологий ИИ и 3D-моделирования сопровождалось улучшением интраоперационных показателей. В группе с ИИ-поддержкой предоперационного планирования отмечалось сокращение продолжительности операции в среднем на 20 минут. Выраженный эффект был выявлен в отношении интраоперационной кровопотери: ее объем в группе с ИИ-поддержкой был ниже на 120 мл по сравнению с группой стандартного предоперационного планирования. В группе с ИИ-поддержкой

Таблица 2. Основные характеристики всех пациентов в исследованных группах

Показатель	Группа с ИИ-поддержкой (n = 104)	Группа стандартного планирования (n = 100)	Значение p
Возраст, годы	59,7 ± 11,1	60,3 ± 10,5	0,62
Мужчины / женщины	56 / 44 (54% / 46%)	53 / 47 (53% / 47%)	0,67
ИМТ, кг/м²	27,1 (24,4; 29,8)	26,8 (24,0; 29,6)	0,51
Артериальная гипертензия	52 (50%)	49 (49%)	0,89
Сахарный диабет 2-го типа	21 (20,2%)	19 (19%)	0,83
Хронические заболевания печени	10 (9,6%)	13 (13%)	0,45
Сердечно-сосудистые заболевания	30 (28,8%)	28 (28%)	0,89
Физический статус (ASA), класс			
I–II	64 (61,5%)	58 (58%)	0,61
III	40 (38,5%)	42 (42%)	
Диаметр очага, мм	65 (45; 85)	60 (43; 77)	0,61
Множественные очаги (≥2)	26 (25%)	20 (20%)	0,39
Локализация			
правая доля	62 (60%)	65 (65%)	0,71
левая доля	31 (30%)	25 (25%)	
обе доли	11 (10%)	10 (10%)	
TROPH-L категории			
I	50 (48%)	45 (45%)	0,90
II	40 (38,5%)	40 (40%)	
III	14 (13,5%)	15 (15%)	
Карциномы, стадия			
I	12 (40%)	10 (37%)	0,97
II	13 (43%)	12 (44%)	
III	5 (17%)	5 (19%)	
Карциномы, степень дифференцировки			
высокая	9 (30%)	8 (30%)	0,98
умеренная	15 (50%)	13 (48%)	
низкая	6 (20%)	6 (22%)	

Примечания: количественные данные представлены в виде среднего значения и стандартного отклонения ($M \pm SD$) либо в виде медианы и межквартильного размаха (Me (Q1; Q3)), категориальные переменные представлены как абсолютное число пациентов с признаком и доля в группе, выраженная в процентах (в круглых скобках).

ASA – American Society of Anesthesiologists, Американское общество анестезиологов; TROPH-L – Tumor – Regional capsule – Outflow veins – Portal vein – Hepatic bile – Localization, опухоль – отношение к капсуле печени – печеночные вены (отток) – воротная вена – желчные протоки – локализация; ИИ – искусственный интеллект; ИМТ – индекс массы тела.

предоперационного планирования потребовалось 4 дозы эритроцитарной массы у 54 пациентов, что соответствует 0,07 дозы на пациента, тогда как в группе стандартного предоперационного планирования – 13 доз у 55 пациентов (0,24 дозы на пациента). Таким образом, частота применения гемотрансфузий в группе стандартного предоперационного планирования была приблизительно в 3,2 раза выше (IRR 3,19; 95% ДИ 1,04–9,76).

Снижение интраоперационной травматичности положительно отразилось на послеоперационном периоде. В группе с ИИ-поддержкой предоперационного планирования наблюдалась тенденция к уменьшению общей частоты послеоперационных осложнений (28% против 40%), а также тяжелых осложнений (III–V классы по классификации Clavien–Dindo: 9% против 18%) по сравнению с группой стандартного предоперационного планирования; однако

при данном объеме выборки различия не достигли статистической значимости ($p = 0,17$).

В группе с ИИ-поддержкой предоперационного планирования тяжелые осложнения были зарегистрированы у 5 пациентов и включали послеоперационное кровотечение ($n = 3$), тромбоэмболию легочной артерии ($n = 1$) и билиарную фистулу Grade B по классификации International Study Group of Liver Surgery (ISGLS) ($n = 1$), потребовавшую пункционного дренирования под ультразвуковым контролем. Случаев развития острой послеоперационной печеночной недостаточности в данной группе не отмечено. Тяжелые послеоперационные осложнения в группе стандартного предоперационного планирования ($n = 10$) были представлены острой послеоперационной печеночной недостаточностью ($n = 3$), клинически значимым послеоперационным кровотечением ($n = 4$), тромбоэмболией легочной артерии ($n = 1$),

Таблица 3. Диагностическая эффективность системы HepatoScan AI при определении характера очаговых образований печени

	Группа с ИИ-поддержкой (n = 104)	Группа стандартного планирования (n = 100)	Значение p
Карцинома	n = 30	n = 27	
чувствительность	92,9 (78,7–98,2)	81,5 (63,3–91,8)	n.s.
специфичность	93 (85,1–97,1)	90 (81,5–95,3)	n.s.
AUROC	0,95 (0,89–1,00)	0,88 (0,79–0,97)	n.s.
Фокальная нодулярная гиперплазия	n = 22	n = 20	
чувствительность	88,2 (66,7–95,3)	78,6 (58,4–91,9)	n.s.
специфичность	90,5 (81,9–95,0)	88 (78,5–93,1)	n.s.
AUROC	0,93 (0,85–1,00)	0,87 (0,77–0,97)	n.s.
Гемангиома	n = 22	n = 23	
чувствительность	96,3 (78,2–99,2)	85 (67,9–95,5)	n.s.
специфичность	94,2	89,5 (80,8–94,6)	n.s.
AUROC	0,97 (0,92–1,00)	0,90 (0,81–0,99)	n.s.
Простая киста	n = 30	n = 30	
чувствительность	98,1 (83,3–99,4)	92 (78,7–98,2)	n.s.
специфичность	95,3 (86,9–97,9)	90,8 (82,5–96,0)	n.s.
AUROC	0,98 (0,94–1,00)	0,93 (0,86–1,00)	n.s.
Все типы очаговых образований			
чувствительность	93,3 (88,2–97,1)	84,2 (77,1–90,3)	0,008
специфичность	91,8 (86,7–96,4)	88,5 (82,4–93,7)	n.s.
AUROC	0,95 (0,90–1,00)	0,89 (0,81–0,98)	n.s.

Примечания: данные чувствительности и специфичности представлены как процент и 95% ДИ (в круглых скобках), AUROC как значение и 95% ДИ (в круглых скобках).

AUROC – area under the receiver operating characteristic curve, площадь под ROC кривой; n.s. – not significant, не значимо; ДИ – доверительный интервал; ИИ – искусственный интеллект.

а также билиарными осложнениями в виде билиарной фистулы Grade B по классификации ISGLS ($n = 2$), потребовавшими пункционного дренирования под ультразвуковым контролем.

Внутрибольничная летальность была зарегистрирована только в группе стандартного предоперационного планирования ($n = 2$) и в обоих случаях была обусловлена прогрессированием острой послеоперационной печеночной недостаточности после обширных резекций печени.

ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследования свидетельствуют о том, что интеграция технологий ИИ в процесс диагностики опухолей печени ассоциирована с повышением эффективности выявления очаговых образований. Применение сервиса HepatoScan AI по сравнению со стандартным диагностическим подходом сопровождалось статистически значимым увеличением чувствительности предоперационной диагностики всех очаговых образований на 9,1% (с 84,2 до 93,3%) при сохранении высокого уровня специфичности (91,8%).

Увеличение диагностической точности при применении ИИ в нашем исследовании согласуется с данными современной литературы. В ряде исследований продемонстрировано, что модели глубинного обучения способны выявлять опухолевые очаги печени

с точностью, сопоставимой с экспертной оценкой врачей-рентгенологов, а в отдельных случаях – обнаруживать дополнительные очаги, не распознанные при визуальном анализе экспертом [6, 9]. Кроме того, показано, что комбинированное использование экспертной оценки и алгоритмов ИИ приводит к увеличению чувствительности выявления очаговых образований печени с 80 до 88% [15].

Визуализация печени в виде интерактивной 3D-модели обеспечивает возможность «виртуальной навигации» по органу, точного расчета объема резекции и прогноза риска послеоперационной печеночной недостаточности, что имеет особое значение при сложных локализациях опухолевых очагов. Разработанная и впервые представленная в настоящем исследовании классификация TROPH-L, интегрирующая данные ИИ-сегментации и 3D-реконструкции, иллюстрирует возможность использования объективных морфологических и топографо-анатомических показателей для стандартизированной стратификации пациентов по риску хирургического вмешательства. В целом представленный подход согласуется с общемировой тенденцией к персонализации хирургического лечения на основе анализа больших данных и применения алгоритмов ИИ [16].

Применение в настоящем исследовании автоматизированной 3D-реконструкции анатомии печени

Таблица 4. Основные характеристики пациентов исследованных групп с категориями сложности TROPH-L II–III

Показатель	Группа с ИИ-поддержкой (n = 54)	Группа стандартного планирования (n = 55)	Значение p
Возраст, годы	60,5 ± 10,2	61,2 ± 9,8	n.s.
Мужчины / женщины	29 / 25 (54% / 46%)	29 / 26 (53% / 47%)	n.s.
ИМТ, кг/м ²	27,4 (24,5; 31,2)	27,0 (24,0; 30,8)	n.s.
Артериальная гипертензия	27 (50%)	27 (49%)	n.s.
Сахарный диабет 2-го типа	11 (20%)	10 (18%)	n.s.
Хронические заболевания печени	5 (9%)	7 (13%)	n.s.
Сердечно-сосудистые заболевания	16 (30%)	15 (27%)	n.s.
Физический статус (ASA), класс			
I–II	33 (61%)	32 (58%)	n.s.
III	21 (39%)	23 (42%)	
Диаметр очага, мм	75 (55; 95)	70 (50; 90)	n.s.
Множественные очаги (≥2)	17 (32%)	14 (25,5%)	n.s.
Локализация			
правая доля	32 (59%)	36 (65,5%)	n.s.
левая доля	16 (30%)	14 (25,5%)	
обе доли	6 (11%)	5 (9%)	
TROPH-L категории			
II	40 (74%)	40 (73%)	n.s.
III	14 (26%)	15 (27%)	
Карциномы, стадия	n = 26	n = 23	
I	8 (31%)	6 (26%)	n.s.
II	13 (50%)	12 (52%)	
III	5 (19%)	5 (22%)	
Карциномы, степень дифференцировки	n = 26	n = 23	
высокая	8 (31%)	7 (30%)	n.s.
умеренная	13 (50%)	11 (48%)	
низкая	5 (19%)	5 (22%)	

Примечания: количественные данные представлены в виде среднего значения и стандартного отклонения ($M \pm SD$) либо в виде медианы и межквартильного размаха ($Me (Q1; Q3)$), категориальные переменные представлены как абсолютное число пациентов с признаком и доля в группе, выраженная в процентах (в круглых скобках).

ASA – American Society of Anesthesiologists, Американское общество анестезиологов; n.s. – not significant, не значимо; TROPH-L – Tumor – Regional capsule – Outflow veins – Portal vein – Hepatic bile – Localization, опухоль – отношение к капсуле печени – печеночные вены (отток) – воротная вена – желчные протоки – локализация; ИИ – искусственный интеллект; ИМТ – индекс массы тела.

продемонстрировало клинические преимущества у пациентов умеренного и высокого оперативного риска, соответствующих категориям TROPH-L II–III. В группе с ИИ-поддержкой предоперационного планирования по сравнению со стандартным подходом отмечались более благоприятные интра- и послеоперационные показатели: продолжительность оперативных вмешательств была в среднем на 11% меньше, объем интраоперационной кровопотери – на 30% ниже, а частота применения трансфузий – ниже примерно в 3,2 раза. Это отражает оптимизацию выбора хирургического доступа и объема резекции на основе предварительного 3D-анализа анатомии печени.

Полученные результаты согласуются с данными многоцентровых исследований, в которых показано, что применение 3D-визуализации при планировании резекций печени приводит к статистически значимому сокращению времени операции и объема

кровопотери, снижению частоты послеоперационной печеночной недостаточности и других осложнений, а также уменьшению длительности госпитализации [10, 11]. В частности, в недавнем проспективном исследовании продемонстрировано, что предоперационная оценка с использованием 3D-реконструкции обеспечивает меньшую операционную травматичность и более быстрое восстановление пациентов по сравнению со стандартной двухмерной навигацией [11].

Следует отметить влияние 3D-планирования на онкологические исходы. Согласно данным литературы, использование 3D-навигации способствует более точному определению границ резекции и увеличению доли R0-резекций [17]. В настоящем исследовании при применении 3D-реконструкции не было зарегистрировано ни одного случая положительного хирургического края (R1-резекции), тогда как в группе стандартного предоперационного планирования

Таблица 5. Клиническая эффективность системы HepatoScan AI и трехмерного предоперационного моделирования

Характеристика	Группа с ИИ-поддержкой (n = 54)	Группа стандартного планирования (n = 55)	Значение p
Вид вмешательства			
расширенная анатомическая резекция	15 (28%)	21 (38%)	
атипичная резекция	30 (56%)	25 (46%)	n.s.
сегментэктомия	9 (17%)	9 (16%)	
Длительность операции, мин	160 (135; 190)	180 (150; 210)	0,01
Интраоперационная кровопотеря, мл	280 (200; 400)	400 (300; 600)	0,004
Гемотрансфузий, кол-во доз эр. массы, п	4	13	0,04
R0-резекция карцином, число пациентов	26 из 26 (100%)	21 из 23 (91%)	n.s.
Все послеоперационные осложнения, число пациентов	15 (28%)	22 (40%)	n.s.
Осложнения III–V класса по Clavien–Dindo, число пациентов	5 (9%)	10 (18%)	n.s.
Длительность госпитализации, сут.	11 (9; 13)	12 (10; 15)	n.s.
Внутригоспитальная летальность, число пациентов	0	2 (3,6%)	n.s.

Примечания: количественные данные представлены в виде медианы и межквартильного размаха (Me (Q1; Q3)), категориальные переменные представлены как абсолютное число пациентов с признаком и доля в группе, выраженная в процентах (в круглых скобках). n.s. – not significant, не значимо; ИИ – искусственный интеллект.

такие случаи отмечались, хотя и нечасто (2 из 23 пациентов, 8,7%). Полученные результаты согласуются с данными метаанализа, продемонстрировавшего, что 3D-ассистированные резекции печени ассоциированы с более широкими краями резекции и меньшей частотой рецидивов заболевания [11, 16, 17].

Вместе с этим более точный расчет aFLR и 3D-визуализации взаимоотношений опухоли с сосудами и желчными протоками могли способствовать более частому выполнению органосберегающих радикальных резекций вместо необоснованно широко расширенных резекций. Данный подход ассоциировался с тенденцией к снижению частоты тяжелых послеоперационных осложнений (Clavien–Dindo $\geq$ III) и отсутствием летальных исходов, что отражает повышение безопасности хирургического лечения [17, 18].

Полученные данные позволяют предположить, что интеграция нейросетевых алгоритмов и 3D-моделирования может служить инструментом поддержки принятия решений и персонализированного хирургического планирования. Такой подход способен повышать качество предоперационной диагностики и улучшать непосредственные результаты хирургического лечения очаговых образований печени, делая процесс планирования оперативных вмешательств более объективным и воспроизводимым, а сами вмешательства – более безопасными и эффективными.

В то же время широкое внедрение подобных систем требует дополнительных исследований и решения ряда организационно-технических задач, поскольку большинство работ по применению ИИ в визуализации печени основаны на ретроспективных данных ограниченных выборок [19], что снижает возможность формирования убедительных выводов. Тем не менее динамичное развитие технологий машинного обучения и накопление проспективных клинических данных позволяют рассчитывать

на дальнейшее укрепление роли таких инструментов в рутинной клинической практике.

Ограничения

При интерпретации полученных результатов следует учитывать, что в настоящем исследовании сопоставлялись ретроспективная (2021–2023 гг.) и проспективная (2023–2025 гг.) когорты, что могло отражать не только влияние внедрения цифровых технологий, но и временные изменения в хирургической практике и периоперационном ведении пациентов. Относительно небольшой объем выборок, особенно при разделении по нозологическим формам и категориям сложности TROPH-L, ограничивает статистическую мощность анализа и возможность выявления различий по отдельным клиническим исходам. Кроме того, для различных типов очаговых образований применялись разные референсные стандарты, а сопоставление результатов системы HepatoScan AI выполнялось на уровне клинического диагностического заключения, что не исключает влияния экспертной интерпретации. Наконец, одноцентровый характер исследования и использование собственной классификации TROPH-L могут ограничивать обобщаемость полученных результатов и их прямое сопоставление с данными других исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В одноцентровом сравнительном исследовании интеграция нейросетевого анализа КТ и интерактивного предоперационного 3D-моделирования (HepatoScan AI) ассоциировалась с повышением чувствительности выявления и классификации очаговых образований печени по сравнению со стандартным подходом. Автоматическая сегментация, количественная 3D-волюметрия и классификация TROPH-L обеспечивали стандартизированную

оценку анатомической сложности и резектабельности, наиболее значимую для пациентов TROPH-L категорий II–III. В этой подгруппе ИИ-поддержка и 3D-планирование сопровождались улучшением отдельных интраоперационных показателей

ВКЛАД АВТОРОВ

А.В. Шабунин и М.М. Тавобилов разработали концепцию и дизайн исследования, принимали участие в выполнении хирургических вмешательств. М.Н. Аладин осуществлял сбор клинического материала, принимал участие в хирургических вмешательствах, выполнял сегментацию и постобработку 3D-изображений, анализ данных, а также участвовал в разработке и валидации алгоритмов ИИ и 3D-моделирования. А.А. Карпов принимал участие в выполнении хирургических вмешательств и обеспечивал организационно-методическое сопровождение хирургического этапа исследования. А.В. Ланцынова и К.А. Абрамов принимали участие в хирургических вмешательствах, выполняли научный поиск литературы и участвовали в клиническом анализе данных. Е.Б. Кудряш принимал участие в хирургических вмешательствах, статистическом анализе и интерпретации результатов. А.В. Шабунин, М.М. Тавобилов и М.Н. Аладин участвовали в написании и научной редакции текста статьи. Все авторы утвердили окончательную версию публикации.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Rumgay H., Arnold M., Ferlay J., et al. Global burden of primary liver cancer in 2020 and predictions to 2040. *J Hepatol.* 2022 Dec; 77(6): 1598–1606. <https://doi.org/10.1016/j.jhep.2022.08.021>. Epub 2022 Oct 5. PMID: 36208844
2. Ding Z.B., Shi Y.H., Chen J.F., et al. Recent advances in surgical management strategies for hepatocellular carcinoma. *hLife.* 2024; 2(9): 439–453. <https://doi.org/10.1016/j.hlife.2024.06.007>
3. Yang S., Ni H., Zhang A., et al. Impact of postoperative morbidity on the prognosis of patients with hepatocellular carcinoma after laparoscopic liver resection: a multicenter observational study. *Sci Rep.* 2025 Jan; 15(1): 1724. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-85020-9>. PMID: 39799160
4. Rahman H., Bukht T.F.N., Imran A., et al. A Deep Learning Approach for Liver and Tumor Segmentation in CT Images Using ResUNet. *Bioengineering (Basel).* 2022 Aug; 9(8): 368. <https://doi.org/10.3390/bioengineering9080368>. PMID: 36004893
5. Chatzikomnitsa P., Gkaitatzi A.D., Papakonstantinou M., et al. The role of artificial intelligence and 3D printing in minimally invasive liver surgery. *Mini-invasive Surg.* 2025; 9: 8. <https://doi.org/10.20517/2574-1225.2024.78>
6. Efsthathiou A., Charitaki E., Triantopoulou C., Delis S. Artificial Intelligence and Digital Tools Across the Hepato-Pancreato-Biliary Surgical Pathway: A Systematic Review. *J Clin Med.* 2025 Sep; 14(18): 6501. <https://doi.org/10.3390/jcm14186501>. PMID: 41010705
7. Manjunath R.V., Kwadiki K. Modified U-NET on CT images for automatic segmentation of liver and its tumor. *Biomedical Engineering Advances.* 2022; 4: 100043. <https://doi.org/10.1016/j.bea.2022.100043>
8. Banchini F., Capelli P., Hasnaoui A., et al. 3-D reconstruction in liver surgery: a systematic review. *HPB (Oxford).* 2024 Oct; 26(10): 1205–1215. <https://doi.org/10.1016/j.hpb.2024.06.006>. Epub 2024 Jun 18. PMID: 38960762
9. Yin C., Zhang H., Du J., et al. Artificial intelligence in imaging for liver disease diagnosis. *Front Med (Lausanne).* 2025 Apr; 12: 1591523. <https://doi.org/10.3389/fmed.2025.1591523>. PMID: 40351457
10. Zeng X., Tao H., Dong Y., et al. Impact of three-dimensional reconstruction visualization technology on short-term and long-term outcomes after hepatectomy in patients with hepatocellular carcinoma: a propensity-score-matched and inverse probability of treatment-weighted multicenter study. *Int J Surg.* 2024 Mar; 110(3): 1663–1676. <https://doi.org/10.1097/JS9.0000000000001047>. PMID: 38241321
11. Agrawal H., Tanwar H., Gupta N. Revolutionizing hepatobiliary surgery: Impact of three-dimensional imaging and virtual surgical planning on precision, complications, and patient outcomes. *Artif Intell Gastroenterol.* 2025; 6(1): 106746. <https://doi.org/10.35712/aig.v6.i1.106746>
12. Васильев Ю.А., Владимирский А.В., Омелянская О.В. и др. MOSMEDSOFT: CT HepatoScan AI. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2025683642. Российская Федерация; заявка № 2025682549; дата регистрации 28.08.2025; дата публикации 05.09.2025. / Vasilyev Yu.A., Vladimirovskiy A.V., Omelyanskaya O.V., et al. MOSMEDSOFT: ST HepatoScan AI. Certificate of state registration of computer software No. RU 2025683642. Russian Federation; 2025 (In Russian).
13. Шабунин А.В., Васильев Ю.А., Тавобилов М.М. и др. Разработка системы помощи принятия врачебных решений в диагностике объемных новообразований печени на основе методов искусственного интеллекта. *Анналы хирургической гепатологии.* 2025; 30(2): 23–32. <https://doi.org/10.16931/1995-5464.2025-2-23-32>. EDN: NKWRDR / Shabunin A.V., Vasilyev Y.A., Tavobilov M.M., et al. Development of a clinical decision support system for the diagnosis of space-occupying liver lesions using artificial intelligence methods. *Annaly khirurgicheskoy gepatologii = Annals of HPB surgery.* 2025; 30(2): 23–32 (In Russian). <https://doi.org/10.16931/1995-5464.2025-2-23-32>. EDN: NKWRDR
14. Fedorov A., Beichel R., Kalpathy-Cramer J., et al. 3D Slicer as an image computing platform for the Quantitative Imaging Network. *Magn Reson Imaging.* 2012 Nov; 30(9):

AUTHORS CONTRIBUTIONS

Alexey V. Shabunin and Mikhail M. Tavobilov conceptualized and designed the study and contributed to the surgical procedures. Mark N. Aladin curated the clinical data, contributed to the surgical procedures, performed 3D image segmentation and post-processing, conducted data analysis, and contributed to the development and validation of artificial intelligence algorithms and 3D modeling. Alexey A. Karpov contributed to the surgical procedures and provided organizational and methodological oversight of the surgical component of the study. Aysa V. Lantsynova and Kirill A. Abramov contributed to the surgical procedures, conducted the literature review, and supported clinical data analysis. Evgeny B. Kudryash contributed to the surgical procedures and performed statistical analysis and interpretation of the results. Alexey V. Shabunin, Mikhail M. Tavobilov, and Mark N. Aladin contributed to manuscript drafting and critical revision. All authors reviewed and approved the final manuscript.

1323–1341. <https://doi.org/10.1016/j.mri.2012.05.001>. PMID: 22770690

15. Dai H., Xiao Y., Fu C., et al. Deep Learning-Based Approach for Identifying and Measuring Focal Liver Lesions on Contrast-Enhanced MRI. *J Magn Reson Imaging*. 2025 Jan; 61(1): 111–120. <https://doi.org/10.1002/jmri.29404>. Epub 2024 Jun 3. PMID: 38826142
16. Mei G., Yu J. Research on CT image segmentation and classification of liver tumors based on attention mechanism and improved U-Net model. *Technol Health Care*. 2025 Sep; 33(5): 2468–2483. <https://doi.org/10.1177/09287329251329294>. Epub 2025 Apr 30. PMID: 40302502

17. Montalti R., Rompianesi G., Cassese G., et al. Role of pre-operative 3D rendering for minimally invasive parenchyma sparing liver resections. *HPB*. 2023; 25(8): 915–923. <https://doi.org/10.1016/j.hpb.2023.04.008>
18. Hori M., Suzuki Y., Sofue K., et al. Artificial intelligence in imaging diagnosis of liver tumors: current status and future prospects. *Abdom Radiol (NY)*. 2025 Jun. <https://doi.org/10.1007/s00261-025-05059-8>. Epub ahead of print. PMID: 40536541
19. Li L., Cheng S., Li J., et al. Randomized comparison of AI enhanced 3D printing and traditional simulations in hepatobiliary surgery. *NPJ Digit Med*. 2025 Jun; 8(1): 293. <https://doi.org/10.1038/s41746-025-01571-9>. PMID: 40457016

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Шабунин Алексей Васильевич, д-р мед. наук, профессор, академик РАН, заведующий кафедрой хирургии, трансплантологии и прикладной онкологии ФГБОУ ДПО РМАНПО Минздрава России; директор ГБУЗ «ММНKC им. С.П. Боткина ДЗМ».

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4230-8033>

Тавобиллов Михаил Михайлович, д-р мед. наук, профессор кафедры хирургии, трансплантологии и прикладной онкологии ФГБОУ ДПО РМАНПО Минздрава России; старший научный сотрудник, заведующий отделением хирургии печени и поджелудочной железы ГБУЗ «ММНKC им. С.П. Боткина ДЗМ».

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0335-1204>

Карпов Алексей Андреевич, д-р мед. наук, доцент кафедры хирургии, трансплантологии и прикладной онкологии ФГБОУ ДПО РМАНПО Минздрава России; старший научный сотрудник, заместитель главного врача по хирургии ГБУЗ «ММНKC им. С.П. Боткина ДЗМ».

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5142-1302>

Аладин Марк Николаевич[✉], младший научный сотрудник, врач-хирург отделения хирургии печени и поджелудочной железы ГБУЗ «ММНKC им. С.П. Боткина ДЗМ».

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9671-390X>

Ланцынова Айса Владимировна, канд. мед. наук, младший научный сотрудник, врач-хирург отделения хирургии печени и поджелудочной железы ГБУЗ «ММНKC им. С.П. Боткина ДЗМ».

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9461-6791>

Абрамов Кирилл Андреевич, канд. мед. наук, младший научный сотрудник, врач-хирург отделения хирургии печени и поджелудочной железы ГБУЗ «ММНKC им. С.П. Боткина ДЗМ».

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9871-114X>

Кудряш Евгений Борисович, аспирант кафедры хирургии ФГБОУ ДПО РМАНПО Минздрава России; младший научный сотрудник, врач-хирург отделения хирургии печени и поджелудочной железы ГБУЗ «ММНKC им. С.П. Боткина ДЗМ».

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7870-808X>

Alexey V. Shabunin, Dr. of Sci. (Medicine), Professor, Academician of the RAS, Head of Department of Surgery, Transplantology and Applied Oncology, Russian Medical Academy of Continuing Professional Education; Director, Botkin Hospital.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4230-8033>

Mikhail M. Tavobilov, Dr. of Sci. (Medicine), Professor, Department of Surgery, Transplantology and Applied Oncology, Russian Medical Academy of Continuing Professional Education; Senior Researcher, Head of the Department of Hepatopancreatobiliary Surgery, Botkin Hospital.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0335-1204>

Alexey A. Karpov, Dr. of Sci. (Medicine), Associate Professor, Department of Surgery, Transplantology and Applied Oncology, Russian Medical Academy of Continuing Professional Education; Senior Researcher, Deputy Chief Physician for Surgery, Botkin Hospital.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5142-1302>

Mark N. Aladin[✉], Junior Researcher, Surgeon, Department of Hepatopancreatobiliary Surgery, Botkin Hospital.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9671-390X>

Aysa V. Lantsynova, Cand. of Sci. (Medicine), Junior Researcher, Surgeon, Department of Hepatopancreatobiliary Surgery, Botkin Hospital.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9461-6791>

Kirill A. Abramov, Cand. of Sci. (Medicine), Junior Researcher, Surgeon, Department of Hepatopancreatobiliary Surgery, Botkin Hospital.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9871-114X>

Evgeny B. Kudryash, postgraduate student, Department of Surgery, Transplantology and Applied Oncology, Russian Medical Academy of Continuing Professional Education; Junior Researcher, Surgeon, Department of Hepatopancreatobiliary Surgery, Botkin Hospital.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7870-808X>

[✉] Автор, ответственный за переписку / Corresponding author