



Возможности 3D-моделирования в оценке резектабельности опухолей головки поджелудочной железы

Кудашкина А.С.^{1,2}, Камышанская И.Г.^{1,2}, Павелец К.В.^{2,3,4}, Русанов Д.С.^{2,3}, Калюжный С.А.²

¹ ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет»,
Университетская наб., 7-9, Санкт-Петербург, 199034, Российская Федерация

² СПб ГБУЗ «Городская Мариинская больница»,
Литейный пр-т, 56, Санкт-Петербург, 191014, Российская Федерация

³ ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет»
Минздрава России,

ул. Литовская, 2, Санкт-Петербург, 194100, Российская Федерация

⁴ ФГБОУ ВО «Северо-Западный государственный медицинский университет им. И.И. Мечникова» Минздрава России,
Пискаревский пр-т, 47, Санкт-Петербург, 195067, Российская Федерация

Кудашкина Александра Сергеевна, ассистент кафедры онкологии медицинского факультета ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», заведующая отделением магнитно-резонансной томографии СПб ГБУЗ «Городская Мариинская больница»;

<https://orcid.org/0009-0004-3085-9964>

Камышанская Ирина Григорьевна, д. м. н., профессор кафедры онкологии медицинского факультета ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», заведующая отделом лучевой диагностики СПб ГБУЗ «Городская Мариинская больница»;

<https://orcid.org/0000-0002-8351-9216>

Павелец Константин Вадимович, д. м. н., профессор кафедры факультетской хирургии им. проф. А.А. Русанова ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет» Минздрава России, профессор кафедры общей хирургии ФГБОУ ВО «Северо-Западный государственный медицинский университет им. И.И. Мечникова» Минздрава России, заведующий 6-м хирургическим отделением СПб ГБУЗ «Городская Мариинская больница»;

<https://orcid.org/0000-0002-1921-8427>

Русанов Дмитрий Сергеевич, к. м. н., ассистент кафедры факультетской хирургии им. проф. А.А. Русанова ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет» Минздрава России, врач-эндоскопист СПб ГБУЗ «Городская Мариинская больница»;

<https://orcid.org/0000-0001-9101-7673>

Калюжный Сергей Алексеевич, врач-хирург СПб ГБУЗ «Городская Мариинская больница»;

<https://orcid.org/0000-0002-3507-6123>

Резюме

Актуальность. Рак головки поджелудочной железы (ПЖ) занимает 6–7-е место по распространенности среди онкологических заболеваний и 4–5-е место среди причин смертности. На сегодняшний день только 5% больных достигают 5-летней выживаемости. Несмотря на успехи современной диагностики и хирургического лечения, проблема раннего выявления, стадирования онкологического процесса и, как следствие, комбинированного лечения рака головки ПЖ, остается актуальной.

Цель: повышение точности диагностики и оценки резектабельности рака головки ПЖ на основе комплексного использования лучевых методов с 3D-моделированием панкреатодуоденальной зоны.

Материал и методы. В исследование включены 93 пациента (44 (47,31%) мужчины, 49 (52,69%) женщины) с осложненными образованиями панкреатодуоденальной зоны, получавшие лечение с 2019 по 2022 гг. в хирургическом отделении Городской Мариинской больницы. Возраст больных варьировался в интервале от 44 до 90 лет, средний возраст $67 \pm 0,74$ года. Всем пациентам проведена магнитно-резонансная томография (МРТ) на МР-томографе Ingenia (Philips Medical Systems, Нидерланды) с индукцией магнитного поля 3 Тл. Выполняли нативное исследование брюшной полости и забрюшинного пространства, дополненное протоколом МР-холангиопанкреатографии, а также исследование с динамическим контрастным усилением со сбором данных в артериальную, портальную и отложенную фазы. Затем получали T2-взвешенные изображения по технологии «турбоспин-эхо», в том числе с жироподавлением, для оценки структурных изменений и наличия жидкости в фасциальных пространствах. Также пациентам проводили эндоскопическое ультразвуковое исследование панкреатодуоденальной зоны

по методу push and pull и мультисрезовую компьютерную томографию (МСКТ) органов брюшной полости. Для построения 3D-моделей использовали бесплатно распространяемые программы 3D-slicer, Mimics, которые позволили в полуавтоматическом режиме выполнять построение 3D-изображения для дальнейшей оценки анатомо-топографических соотношений.

Результаты. По данным построения МСКТ-3D-модели выявили инвазию опухоли в верхнюю брыжеечную вену у 6 (23,06%) пациентов, тогда как на МРТ-моделях – у 4 (15,38%), а интраоперационное подтверждение получено у 5 человек (19,23%). Инвазия чревного ствола по данным как МСКТ, так и МРТ-моделирования обнаружена в 1 (5,2%) случае, что подтвердилось интраоперационной картиной. Инвазию нижней полой вены на МСКТ- и МРТ-моделях выявили у 3 (11,54%) пациентов, тогда как интраоперационно – у 4 (15,38%). По МСКТ- и МРТ-3D-моделям совпали данные по инвазии чревного ствола у 1 (3,85%) пациента, верхней брыжеечной артерии – у 2 (7,69%), что полностью подтвердилось интраоперационно.

Заключение. 3D-моделирование на основе МРТ и МСКТ-исследований является информативным методом в дооперационном стадировании рака головки ПЖ и его резектабельности. Данный метод позволяет объективно определить локализацию и распространенность опухолевого процесса на прилежащие анатомические структуры, а также визуально продемонстрировать метастатическое поражение регионарных лимфатических узлов. По параметрам диагностической эффективности 3D-модели максимально приближены к интраоперационной картине, что дает возможность планировать как объем, так и ход оперативного вмешательства.

Ключевые слова: 3D-моделирование; магнитно-резонансная томография; мультисрезовая компьютерная томография; аденокарцинома; цистаденома; резекция поджелудочной железы.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Кудашкина А.С., Камышанская И.Г., Павелец К.В., Русанов Д.С., Калужный С.А. Возможности 3D-моделирования в оценке резектабельности опухолей головки поджелудочной железы. *Вестник рентгенологии и радиологии.* 2023; 104(4): 244–54. <https://doi.org/10.20862/0042-4676-2023-104-4-244-254>

Для корреспонденции: Кудашкина Александра Сергеевна, E-mail: alkudashkina@gmail.com

Статья поступила 12.11.2023

После доработки 04.12.2023

Принята к печати 05.12.2023

3D-modeling Capabilities in Assessing Resectability of Pancreatic Head Tumors

Aleksandra S. Kudashkina^{1, 2}, Irina G. Kamyshanskaya^{1, 2}, Konstantin V. Pavelets^{2, 3, 4}, Dmitry S. Rusanov^{2, 3}, Sergey A. Kalyuzhnyy²

¹ Saint Petersburg State University, Universitetskaya naberezhnaya, 7–9, Saint Petersburg, 199034, Russian Federation

² City Mariinsky Hospital, Liteynyy prospekt, 56, Saint Petersburg, 191014, Russian Federation

³ Saint Petersburg State Pediatric Medical University, ul. Litovskaya, 2, Saint Petersburg, 194100, Russian Federation

⁴ Mechnikov North-Western State Medical University, Piskarevskiy prospekt, 47, Saint Petersburg, 195067, Russian Federation

Aleksandra S. Kudashkina, Assistant Professor, Chair of Oncology, Faculty of Medicine, Saint Petersburg State University; Head of Department of Magnetic Resonance Imaging, City Mariinsky Hospital; <https://orcid.org/0009-0004-3085-9964>

Irina G. Kamyshanskaya, Dr. Med. Sc., Professor, Chair of Oncology, Faculty of Medicine, Saint Petersburg State University; Head of Department of Radiation Diagnostics, City Mariinsky Hospital; <https://orcid.org/0000-0002-8351-9216>

Konstantin V. Pavelets, Dr. Med. Sc., Professor, Rusanov Chair of Faculty Surgery, Saint Petersburg State Pediatric Medical University; Professor, Chair of General Surgery, Mechnikov North-Western State Medical University; Head of the 6th Surgical Department, City Mariinsky Hospital; <https://orcid.org/0000-0002-1921-8427>

Dmitry S. Rusanov, Cand. Med. Sc., Assistant Professor, Rusanov Chair of Faculty Surgery, Saint Petersburg State Pediatric Medical University; Endoscopist, City Mariinsky Hospital; <https://orcid.org/0000-0001-9101-7673>

Sergey A. Kalyuzhnyy, Surgeon, City Mariinsky Hospital; <https://orcid.org/0000-0002-3507-6123>

Abstract

Background. Pancreatic head cancer ranks 6–7th among oncologic diseases and 4–5th among causes of mortality, with only 5% of patients achieving 5-year survival rate to date. Despite the successes of modern diagnostics and surgical treatment, the problem of early detection, staging of oncologic process and, as a consequence, combined treatment of pancreatic head cancer remains actual.

Objective: increasing the accuracy of diagnostics and estimation of resectability of the pancreatic head cancer on the basis of the complex use of the radiation methods of investigation with pancreaticoduodenal zone 3D-reconstructions.

Material and methods. The study included 93 patients (44 (47.31%) males and 49 (52.69%) females) with complicated pancreatoduodenal masses treated from 2019 to 2022 at the Surgical Department of the City Mariinsky Hospital. The patients' age varied from 44 to 90 years, the mean age was 67±0.74 years. All patients underwent magnetic resonance imaging (MRI) on an Ingenia MR tomograph (Philips Medical Systems, Netherlands) with a magnetic field induction of 3 Tesla. The native examination of the abdomen and retroperitoneum, supplemented with MR-cholangiopancreatography protocol, and dynamic contrast enhancement with data collection in arterial, portal, and delayed phases were carried out. T2-weighted images were then performed using turbospin-echo technology, including fat-suppressed images, to evaluate structural changes and the presence of fluid in fascial spaces. Patients also underwent endoscopic ultrasound of the pancreaticoduodenal zone using the push and pull method, and abdominal multislice computed tomography (MSCT). To build 3D models, we used free 3D-slicer and Mimics programs, which allowed to build semi-automatic model for further evaluation of anatomo-topographic relations.

Results. MSCT 3D modeling revealed tumor invasion into the superior mesenteric vein in 6 (23.06%) patients, whereas MRI models showed tumor invasion in 4 (15.38%) patients, intraoperatively the results were confirmed in 5 patients (19.23%). According to both MSCT and MRI modeling data, the invasion of the ventral trunk occurred in 1 (5.2%) case, which was confirmed intraoperatively. Inferior vena cava invasion on MSCT and MRI models was detected in 3 (11.54%) patients, whereas intraoperatively – in 4 (15.38%) patients. The MSCT and MRI 3D models coincided with the data on invasion of the ventral trunk in 1 (3.85%) patient and the superior mesenteric artery in 2 (7.69%) patients, which was fully confirmed intraoperatively.

Conclusion. 3D modeling on the basis of MRI and MSCT studies is an informative method in preoperative staging of pancreatic head cancer and its resectability. This method allows to objectively determine the localization and prevalence of the tumor process on adjacent anatomical structures, as well as visually demonstrate the metastatic lesion of regional lymph nodes. By the parameters of diagnostic efficiency, 3D models are maximally close to the intraoperative picture, which allows planning both the volume and the course of surgical intervention.

Keywords: 3D modeling; magnetic resonance imaging; multislice computed tomography; adenocarcinoma; cystadenoma; pancreatic resection.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

For citation: Kudashkina AS, Kamyshanskaya IG, Pavelets KV, Rusanov DS, Kalyuzhnyy SA. 3D-modeling capabilities in assessing resectability of pancreatic head tumors. *Journal of Radiology and Nuclear Medicine*. 2023; 104(4): 244–54 (in Russian). <https://doi.org/10.20862/0042-4676-2023-104-4-244-254>

For corresponding: Aleksandra S. Kudashkina, E-mail: alkudashkina@gmail.com

Received November 12, 2023

Revised December 4, 2023

Accepted December 5, 2023

Введение / Introduction

Рак поджелудочной железы (ПЖ) – агрессивная и летальная форма рака, при которой общая выживаемость составляет менее 7–8% в течение 5-летнего периода [1–3]. Это одна из самых прогностически неблагоприятных форм злокачественных новообразований. Рак головки ПЖ занимает 6–7-е место по распространенности среди онкологических заболеваний и 4–5-е место среди причин смертности, при этом на сегодняшний день только 5% больных достигают 5-летней выживаемости. Ранние формы рака ПЖ (2–4 см в диаметре) диагностируются всего в 3,8% случаев [4–6].

Заболевание имеет наихудший прогноз среди всех злокачественных опухолей органов пищеваре-

ния. Около 90–95% злокачественных новообразований ПЖ происходят из экзокринной ткани, в частности из аденокарциномы протоков поджелудочной железы (pancreatic ductal adenocarcinoma, PDAC). PDAC является наиболее распространенным и агрессивным подтипом опухоли, на который приходится примерно 70–80% всех случаев рака ПЖ. Выявить заболевание на ранних стадиях сложно из-за отсутствия специфических симптомов, что часто приводит к задержке лечения. Стандартное лечение распространенного неоперабельного рака ПЖ включает традиционную химиотерапию, но она продлевает выживаемость пациентов лишь на несколько месяцев. Несмотря на значительные усилия по разработке новых терапевтических под-

ходов и методов диагностики рака ПЖ, уровень смертности и заболеваемости в последние годы увеличился и, по прогнозам, будет расти в будущем [6–8].

В настоящее время для оценки резектабельности опухоли широко используются компьютерная томография (КТ), КТ-ангиография и магнитно-резонансная томография (МРТ), однако эти методы имеют высокую частоту ложноположительных и ложноотрицательных результатов, что затрудняет предоперационную оценку резектабельности и планирование лечения [9]. Несмотря на значительные успехи в развитии новых методов обследования, предоперационная диагностика неоперабельных опухолей ПЖ остается успешной лишь в 50% случаев, при этом около 10% опухолей ошибочно идентифицируются как неоперабельные [10].

Я.И. Нерестюк в 2018 г. описал оптимальный протокол низкодозовой перфузионной КТ ПЖ, позволяющий получать изображения высокого качества при низкой лучевой нагрузке¹. Впервые в отечественном исследовании выявлены различия перфузии нейроэндокринных опухолей ПЖ в зависимости от степени дифференцировки (Grade 1, 2) опухоли. Создана модель предсказания степени дифференцировки нейроэндокринных опухолей на основе одномоментно действующих показателей пиковой плотности в селезенке и портальной перфузии для неизменной паренхимы ПЖ. Предложена методика трехмерного моделирования опухолей ПЖ на основе совмещения фаз исследования и описаны этапы от первоначальной сегментации до планирования оперативного вмешательства.

Е.С. Дроздов в 2019 г. разработал способ дифференциальной диагностики кистозных образований ПЖ с применением ультразвуковой эластографии². Впервые предложен комбинированный способ дифференциальной диагностики кистозных неоплазий ПЖ. На основании анализа данных диагностики и лечения пациентов с кистозными образованиями ПЖ различной этиологии разработан и внедрен в клиническую практику алгоритм выбора дифференциально-диагностической и лечебной тактики у таких пациентов.

В исследовании А.Н. Тюриной и др. (2019 г.) оценивалась информативность методики про-

тонной мультивоксельной 3D-MP-спектроскопии (3D-MPC) в диагностике глиальных новообразований как одной из самых часто встречаемых опухолей головного мозга, где определение степени анаплазии является главным фактором в выборе последующего лечения [11]. Метод 3D-MPC позволил провести неинвазивную дифференциальную диагностику с достаточно высокими показателями чувствительности и специфичности глиом высокой и низкой степени злокачественности. С помощью ROC-анализа (receiver operating characteristic – рабочая характеристика приемника) получены предельные значения для разных типов глиом. Результаты продемонстрировали высокую чувствительность и специфичность методики 3D-MPC в дифференциальной диагностике глиом низкой и высокой степеней злокачественности, также был получен значительно более высокий показатель AUC (area under curve – площадь под кривой).

В работе И.У. Вагабова (2021 г.) выявлены различные виды зонального кровоснабжения паренхимы почки³. Установлены индивидуальные особенности кровоснабжения почечных сегментов при различных видах их зонального кровоснабжения. Получен пошаговый алгоритм, позволяющий создать инновационное программное обеспечение 3D-ONCONFROS для трехмерного моделирования сегментов почки человека.

Е.А. Филатовой (2022 г.) установлено, что ведущей причиной расхождения направительного и клинического диагнозов в специализированном фтизиопульмонологическом стационаре является гипердиагностика диссеминированного туберкулеза вследствие ошибочной интерпретации клинико-рентгенологической картины саркоидного поражения легких в условиях недостаточного применения комплекса современных молекулярно-генетических и морфологических методов верификации диагноза⁴. Доказано, что использование трехмерной компьютерной модели при очагово-фокусном типе диссеминации повышает эффективность диагностики диссеминированного поражения легких путем объективизации оценки динамики объема пораженной легочной ткани и оптимизации выбора зоны биопсии.

Панкреатодуоденэктомия является краеугольным камнем хирургического лечения пациентов с диагнозом рака головки ПЖ. Предоперационное

¹ Нерестюк Я.И. Оптимизация диагностики опухолей поджелудочной железы: КТ-перфузия и постпроцессорная обработка данных. Дис. ... канд. мед. наук. М.; 2018.

² Дроздов Е.С. Диагностическая и лечебная тактика при кистозных образованиях поджелудочной железы различной этиологии. Дис. ... канд. мед. наук. Томск; 2019.

³ Вагабов И.У. Трехмерная (3D) анатомия артериального русла почки и ее сегментов. Дис. ... канд. мед. наук. Уфа; 2021.

⁴ Филатова Е.А. Совершенствование диагностики диссеминированных поражений легких туберкулезной и иной этиологии на основе 3D-моделирования. Дис. ... канд. мед. наук. М.; 2022.

планирование необходимо для оценки сосудистого поражения опухолью и изменений анатомии прилежащих артерий и вен, однако это требует специальных знаний и может быть сложной задачей. Алгоритмы компьютерного распознавания, основанные на методах искусственного интеллекта, позволяют получить сегментацию опухоли ПЖ и прилежащих структур на уровне пикселей. Кроме того, развитие методов обработки изображений позволило перевести медицинские снимки в трехмерные анатомические реконструкции [12].

Цель – повышение точности диагностики и оценки резектабельности рака головки ПЖ на основе комплексного использования лучевых методов с 3D-моделированием панкреатодуоденальной зоны.

Материал и методы / Material and methods

Клиническая характеристика больных

В исследование включены 93 пациента (44 (47,31%) мужчины, 49 (52,69%) женщин) с образованиями панкреатодуоденальной зоны, проходившие лечение в хирургическом отделении Мариинской городской больницы с 2019 по 2022 гг. Возраст больных варьировался в интервале от 44 до 90 лет, средний возраст $67 \pm 0,74$ года.

Большинство опухолей (75,27%) располагалось в головке ПЖ, в 6,45% случаев – в обструкционной системе, в 10,75% – в общем желчном протоке. В 1,08% случаев опухоль обнаруживалась в двенадцатиперстной кишке. У 6,45% больных наблюдали образование в виде конгломерата с трудно дифференцируемой опухолью.

У 37 (39,78%) пациентов выполнены паллиативные вмешательства:

- стентирование желчных протоков – 24 пациента (25,81%);
- наложение обходных анастомозов – 7 пациентов (7,53%);
- атипичная резекция ПЖ – 6 пациентов (6,45%).

Оставшимся 10 (10,75%) больным проведено химиотерапевтическое лечение.

Всем 93 пациентам выполнено МРТ-исследование органов брюшной полости. Эндоскопическое ультрасонографическое исследование (ЭУС) панкреатодуоденальной зоны проведено 59 (63,44%) больным. В сомнительных случаях осуществлялась диагностическая пункция лимфатических узлов (ЭУС-тип) для морфологической верификации вторичных изменений.

Трехмерная модель на мультимодальной основе полученных цветных изображений с интеграцией измененных лимфатических коллекторов построена у 58 (62,37%) пациентов, из них у 43 (46,24%) – с интеграцией данных ЭУС. Также

у 26 из 58 больных (44,83%) построены трехмерные модели как на основе МРТ, так и на основе мультисрезовой компьютерной томографии (МСКТ), что позволило провести сравнительный анализ.

МРТ в оценке образований панкреатодуоденальной зоны

МРТ-исследования были выполнены на МРТ-сканере Ingenia мощностью 3 Тл (Philips Medical Systems, Нидерланды). Пациентам проводили нативное исследование брюшной полости и забрюшинного пространства, дополненное протоколом МР-холангиопанкреатографии, а также с динамическим контрастированием в артериальную, портальную и отсроченную фазы. За 20 мин до исследования вводили ингибитор перистальтики. Больных располагали на спине с руками вдоль тела для обеспечения венозного доступа.

Первоначально в оценку включали локализацию и тип образования (солидное, кистозное, перидуктальное). Определяли перидуктальное распространение по ходу общего желчного протока с вовлечением супрапанкреатического и интрадуоденального отделов. Оценивали размеры образования и размеры ПЖ. Анализ местной распространенности включал оценку поражения окружающих тканей, воротной вены и ее притоков, чревного ствола и его ветвей, верхней брыжеечной артерии и верхней брыжеечной вены. При анализе вовлечения сосудов определяли его тип – прилегание или окутывание, для чего использовали косоаксиальные, косо корональные и кососагиттальные проекции, а также последовательности типа SPACE. Для определения целесообразности чрескожно-чреспеченочной холангиостомии анализировали выраженность билиарной гипертензии, структуру желчных протоков и вторичные изменения паренхимы печени. Изменения лимфатических узлов оценивали на основании размера, формы и наличия жировых ворот с использованием классификации лимфатических узлов Японского общества по изучению заболеваний пищевода (Japanese Society for Esophageal Diseases, JSED). Чувствительность и специфичность метода рассчитывали с помощью ROC-анализа.

ЭУС в оценке степени инвазии и лимфогенного метастазирования образований панкреатодуоденальной зоны

Пациентам проводили ЭУС по методу push and pull для оценки опухолевой инвазии головки ПЖ и наличия регионарных метастазов. Использовали конвексный эхоэндоскоп UCT 180 с радиальным датчиком и диаметром рабочей части 13,4 мм, а также комбинированный процесс EUPREMIER PLUS. Исследование давало информацию об инвазии опухоли, ее локализации, распространен-

ности, внутрибрюшной лимфаденопатии и связи опухоли с соседними сосудами. Чувствительность и специфичность рассчитывали с использованием ROC-анализа.

Оценка инвазии опухолевого процесса с использованием 3D-моделирования

Трёхмерные модели файлов типа STL применяли для описания 3D-объекта как поверхность с определенной к нему нормалью. Метод включал МРТ органов брюшной полости на разных стадиях с использованием контрастного вещества. Для построения моделей и анатомической оценки использовали программы 3D-slicer и Mimics. Компьютерное моделирование выполняли путем интеграции данных о регионарных лимфатических узлах по результатам ЭУС с последующим цветовым картированием пораженных узлов (рис. 1, 2).

При проведении МСКТ результатом исследования являлись серии срезов. Полученные плоскостные срезы изучались при помощи программ 3D-slicer и Mimics. Метод генерации 3D-модели из серий снимков был основан на лофтинге – процессе получения объемных фигур из плоских объектов. Подсчет чувствительности и специфичности метода также определяли методом ROC-анализа.

Результаты / Results

В предлагаемом методе 3D-моделирования панкреатодуоденальной зоны использовались данные МРТ и ЭУС для создания 3D-модели. Метод позволяет диагносту оценить размер опухоли, ее расположение, стадию инвазии и взаимоотношения с соседними структурами и кровеносными сосудами. Это помогает спланировать лечение и хирургическое вмешательство, включая диссекцию

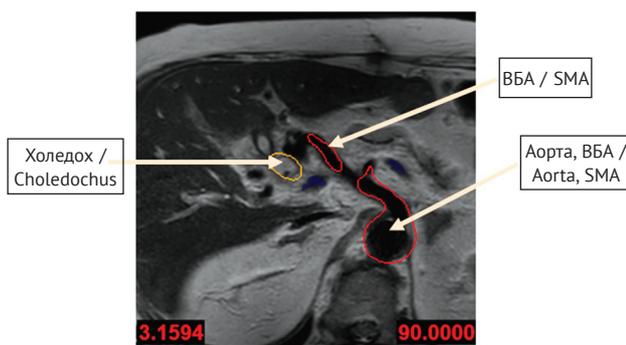


Рис. 1. Формирование полуавтоматической сегментации по скорости тока жидкости по системе чревного ствола, верхней брыжеечной артерии, холедоха.

ББА – верхняя брыжеечная артерия

Fig. 1. Formation of semi-automatic segmentation according to the velocity of fluid flow through the system of the abdominal trunk, superior mesenteric artery, choledochus.

SMA – superior mesenteric artery

лимфатических узлов. Цель лучевой диагностики состоит в том, чтобы повысить надежность предоперационной оценки рака головки ПЖ. Модель сочетает в себе преимущества МРТ и ЭУС, обеспечивая визуализацию опухолевой инвазии и метастазирования в лимфатические узлы. Это точная и индивидуализированная модель, позволяющая проводить всестороннюю индивидуальную оценку. Цветное изображение облегчает восприятие дооперационной картины, а гибридный характер модели расширяет диагностические возможности. В результате путем 3D-визуализации на мультимодальной основе цветных изображений с интеграцией измененных лимфатических коллекторов обеспечивается положительный результат метода в виде дооперационной оценки онкологического процесса, планирования первичного способа лечения и оперативного вмешательства с учетом объема лимфодиссекции. Для иллюстрации полученных результатов приводим клинический пример.

Клинический пример

Больной М., 77 лет, госпитализирован с жалобами на желтушность кожных покровов, боли в животе. После госпитализации проведено комплексное обследование, при котором выявлено образование головки ПЖ Т3NхM0. По данным МРТ

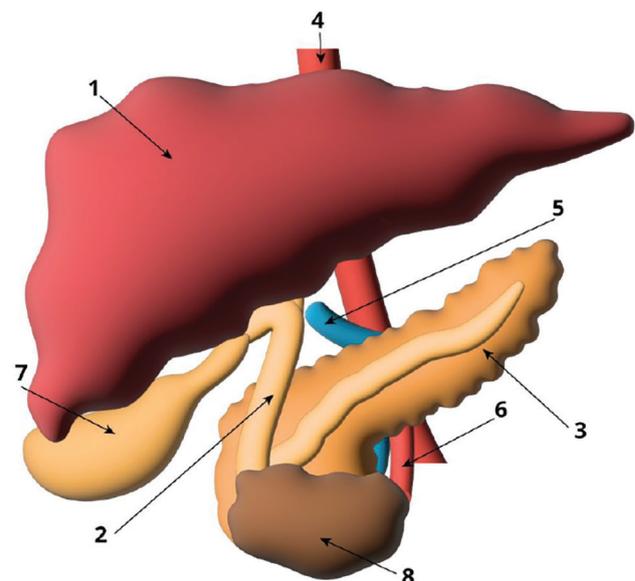


Рис. 2. Трёхмерная модель панкреатодуоденальной зоны. 1 – печень; 2 – холедох (желчный проток); 3 – поджелудочная железа; 4 – аорта; 5 – верхняя брыжеечная вена; 6 – верхняя брыжеечная артерия; 7 – желчный пузырь; 8 – образование

Fig. 2. Three-dimensional model of the pancreatoduodenal zone.

1 – liver; 2 – choledochus (bile duct); 3 – pancreas; 4 – aorta; 5 – superior mesenteric vein; 6 – superior mesenteric artery; 7 – gallbladder; 8 – mass

в головке ПЖ определяли образование размерами до 4,5 см, интимно прилежащее к нижней полой вене (НПВ), вовлекающее в себя верхнюю брыжеечную вену (ВБВ). По данным ЭУС визуализированы структурно измененные лимфатические узлы. На основании графических данных МРТ выполнено 3D-моделирование панкреатодуоденальной зоны. Визуализирована опухоль головки ПЖ, интимно прилежащая к НПВ, без ее инвазии, однако с признаками инвазии ВБВ, окружность менее 180° (рис. 3). Эти данные соответствовали стадии Т3N1.

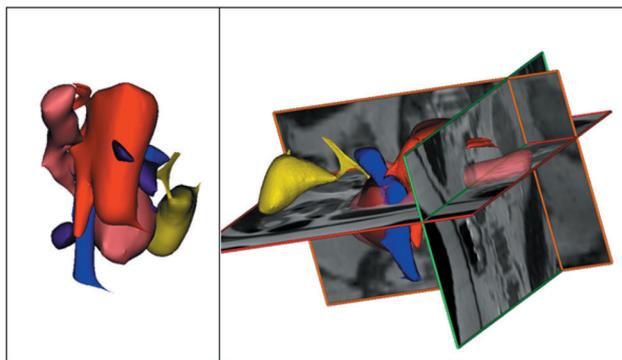


Рис. 3. 3D-модель панкреатодуоденальной зоны

Fig. 3. 3D model of the pancreaticoduodenal zone

С учетом признаков резектабельности опухоли пациенту выполнена операция в объеме пилоросохраняющей панкреатодуоденальной резекции с лимфодиссекцией в объеме D2.

Дооперационное 3D-моделирование у больных, перенесших хирургическое вмешательство

Предоперационное 3D-моделирование позволило оценить локализацию, размер опухоли, лимфаденопатию, взаимосвязь с близлежащими структурами и разработать план лечения. При комплексном обследовании больных отдаленных метастазов обнаружено не было.

У пациентов, для которых были построены 3D-модели, наиболее часто локализацию опухоли находили в головке ПЖ (79,31%). Поражение большого дуоденального сосочка и холедоха выявлено в 4 (6,90%) и 8 (13,79%) случаях соответственно. Распространенность опухоли обнаружена до стадии T2 у 25,86% больных, до стадии T3 – у 31,03%, стадия T4 выявлена у 24,14% пациентов. Интраоперационное и патогистологическое исследования подтвердили эти стадии у одинаковых долей оперированных больных: стадия T2 – у 25,86%, стадия T3 – у 32,76%, стадия T4 – у 22,41% (рис. 4).

При ROC-анализе 3D-модели в оценке протяженности опухоли чувствительность составила 98,3%, специфичность – 66,7% ($p < 0,05$).

На основании полученных данных преимущественно выявлена стадия T3 распространения опухоли, что указывает на местно-распространенные образования ПЖ. Резектабельность опухолей головки ПЖ оценивали с помощью МРТ и 3D-моделирования. Данные МРТ показали инвазию опухоли в ВБВ у 15 (25,9%) пациентов, тогда как 3D-модель указала на это только у 10 (17,2%) человек.

Интраоперационно инвазия в ВБВ была подтверждена у 12 (20,1%) пациентов. Инвазия чревного ствола произошла в 3 (5,2%) случаях, что подтверждено данными 3D-моделирования и интраоперационного наблюдения. Инвазию ВБВ подтвердили у 12 (20,1%) больных при МРТ-исследовании, но только в 4 (6,9%) – с помощью 3D-моделирования, что подтвердилось интраоперационно. Преувеличение данных МРТ об инвазии воротной вены и НПВ не было подтверждено 3D-моделированием или интраоперационной оценкой (табл. 1). При ROC-анализе 3D-моделирования в оценке поражения магистральных сосудов опухолевым процессом чувствительность составила 98,3%, специфичность – 94,1% ($p < 0,05$).

Для планирования объема лимфодиссекции у 43 (74,1%) пациентов проводили интеграцию данных ЭУС в 3D-модель. 3D-модели позволили планировать более щадящий объем оперативного лечения и лимфодиссекции. Метастазы в регионарные лимфатические узлы были выявлены у 17 (39,5%) больных по данным 3D-модели и у 20 (46,5%) – по данным патогистологического исследования. Распространение онкологического



Рис. 4. Распространенность опухоли по данным трехмерного моделирования, интраоперационной оценки и патогистологического описания

Fig. 4. Tumor prevalence according to three-dimensional modeling, intraoperative assessment and pathohistological description

Таблица 1

Поражение магистральных сосудов опухолью головки поджелудочной железы по данным магнитно-резонансной томографии (МРТ), 3D-моделирования и интраоперационной картины (n = 58), n %

Table 1

Lesion of the main vessels by pancreatic head tumor according to magnetic resonance imaging (MRI), 3D modeling and intraoperative picture (n = 58), n %

Сосуд / Vessel	MPT / MRI	3D-модель / 3D model	Интраоперационная картина / Intraoperative picture
Чревный ствол / Ventral trunk	3 (5,2)	3 (5,2)	3 (5,2)
Верхняя брыжеечная артерия / Superior mesenteric artery	12 (20,1)	4 (6,9)	4 (6,9)
Верхняя брыжеечная вена / Superior mesenteric vein	15 (22,1)	10 (17,2)	12 (20,1)
Воротная вена / Portal vein	2 (3,4)	0 (0,0)	0 (0,0)
Нижняя полая вена / Inferior vena cava	9 (15,5)	7 (12,1)	7 (12,1)
Опухоль без признаков инвазии сосудов / Tumor without signs of vascular invasion	17 (29,3)	34 (58,6)	32 (55,2)

Таблица 2

Окончательное стадирование онкологического процесса (n = 43), n (%)

Table 2

The final staging of the oncological process (n = 43), n (%)

Стадия / Stage	3D-модель / 3D model	Интраоперационная картина и данные патоморфологического исследования / Intraoperative picture and pathomorphological study data
IIA	2 (4,6)	2 (4,6)
IIB	4 (9,3)	4 (9,3)
III	20 (46,5)	21 (48,8)
IV	17 (39,5)	16 (37,2)

процесса в регионарные лимфатические узлы брюшной полости установлено у 2 (4,6%) пациентов по данным ЭУС, а соответственно, и 3D-модели, однако патогистологически это было подтверждено у 3 (6,9%) прооперированных пациентов. Таким образом, чувствительность в оценке лимфогенного метастазирования опухоли головки ПЖ по данным комбинированной трехмерной модели составила 85%, а специфичность – 60% ($p < 0,05$) (табл. 2).

При ROC-анализе 3D-модели в определении стадии опухолевого процесса чувствительность составила 92,0%, специфичность – 67,8% ($p < 0,05$).

Подводя итог, следует отметить, что трехмерное моделирование на основе как МРТ-, так и МСКТ-моделей является достаточно информативным методом в дооперационном стадировании рака головки ПЖ и категории его резектабельности. Данный метод позволяет объективно определить локализацию и распространенность опухолевого процесса на прилежащие анатомические структуры, а также визуально продемонстрировать

метастатическое поражение регионарных лимфатических узлов. Указанные параметры представляют объективную и наглядную картину, максимально приближенную к интраоперационной, что позволяет планировать объем и ход оперативного вмешательства.

Обсуждение / Discussion

Несмотря на успехи современной диагностики и хирургического лечения, проблема раннего выявления, стадирования онкологического процесса и, как следствие, комбинированного лечения рака головки ПЖ остается актуальной.

Для оптимизации диагностики стадии опухоли головки ПЖ и дооперационного планирования хирургического вмешательства необходимо иметь объективное представление о регионарной инвазии и лимфогенном метастазировании карциномы данной локализации. Целью работы явилось повышение точности диагностики и оценки резектабельности рака головки ПЖ на основе комплексного использования лучевых методов исследования с 3D-реконструкций панкреатодуоденальной

зоны. Были поставлены задачи исследования, среди которых – уточнение возможностей мультимодального подхода с использованием ЭУС, МСКТ и МРТ в дооперационной оценке резектабельности рака ПЖ.

Лимфаденэктомия подразумевает иссечение лимфатических узлов и жировой ткани, которые распределяются вдоль сосудов малого таза непрерывно и комплексно. Эта процедура не лишена лимфатических осложнений, таких как лимфокисты у 20% пациентов и лимфедема у 10–15%, а в редких случаях – травмы нервов и сосудов [13, 14].

С учетом последних достижений в развитии медицинской визуализирующей аппаратуры и реконструктивных технологий трехмерные модели, реконструированные на основе наборов данных мультidetекторной компьютерной томографии (МДКТ), используются для наблюдения за анатомическими особенностями пациента, помощи в диагностике заболеваний, оценки сложности хирургических вмешательств и руководства выполнением реальных операций [15, 16].

При планировании объема лимфаденэктомии путем 3D-моделирования оценена степень регионарного лимфогенного метастазирования рака головки ПЖ. У 43 человек провели совмещение графических данных ЭУС и 3D-модели. Полученные 3D-модели служили поводом для планирования более щадящего объема лимфодиссекции. Вторичное поражение регионарных лимфатических узлов обнаружено у 17 (39,5%) пациентов по данным 3D-модели и у 20 (46,5%) человек по патогистологическому исследованию. Отсутствие онкологического процесса в регионарных лимфатических узлах брюшной полости установлено у 2 (4,6%) человек по данным ЭУС, а соответственно, и по 3D-модели, однако патогистологически метастазирование подтвердилось у 3 (6,9%) прооперированных пациентов.

Результаты проведенного исследования обработаны с помощью ROC-анализа с определением чувствительности и специфичности. Чувствительность 3D-модели в определении стадии опухолевого процесса составила 92,0%, специфичность – 67,8% ($p < 0,05$).

Построены трехмерные модели как на основе МРТ, так и на основе МСКТ 26 пациентам из 58 (44,83%). Это позволило провести сравнительный анализ полученных МСКТ- и МРТ-3D-моделей. По данным 3D-моделирования на основе МСКТ, распространенность опухоли до стадии Т2 выявлена у 7 (26,92%) обследованных, до стадии Т3 – у 8 (30,77%), стадию Т4 определили у 6 (23,08%) пациентов, что полностью соответствовало моделям, построенным на основе МРТ. Однако

данные несколько отличались от интраоперационной оценки и патогистологического исследования. Стадия Т2 подтверждена у 7 (26,92%) больных, стадия Т3 – у 9 (34,62%), стадия Т4 определялась у 5 (19,23%) прооперированных пациентов.

Чувствительность трехмерного моделирования на основе МСКТ в определении протяженности опухоли составила 98,3%, специфичность – 66,7% ($p < 0,05$).

С помощью трехмерного МСКТ- и МРТ-моделирования оценивали резектабельность опухоли головки ПЖ. Наиболее часто по данным МСКТ-моделирования определяли опухоль без признаков инвазии сосудов. Это встретилось у 14 (53,85%) пациентов и подтвердилось интраоперационной картиной. Однако 3D-модель, построенная по МРТ, данный тип опухоли выявляла у 16 (61,54%) пациентов.

В результате построения МСКТ-3D-модели инвазию опухоли в ВБВ выявили у 6 (23,06%) пациентов, тогда как на МРТ-моделях – у 4 (15,38%), а интраоперационно – у 5 человек (19,23%). Инвазия чревного ствола по данным как МСКТ-, так и МРТ-моделирования выявлена у 1 (5,2%) пациента, что подтвердилось интраоперационной картиной. Инвазию НПВ на МСКТ- и МРТ-моделях обнаружили у 3 (11,54%) пациентов, тогда как интраоперационно – у 4 (15,38%).

Чувствительность трехмерного моделирования на основе МСКТ в оценке поражения магистральных сосудов опухолевым процессом составила 98,7%, специфичность – 94,5% ($p < 0,05$).

3D-модели на основе МСКТ оказались более чувствительны к инвазии мелких сосудов и минимальной инвазии, но не отличались от МРТ-моделей при оценке распространенности опухоли. Однако у 2 пациентов МСКТ не выявила опухоль головки ПЖ ввиду ее малых размеров. Также в 3 случаях на МСКТ не были обнаружены метастазы в печень и в 1 случае – в лимфоузлы.

Практические рекомендации

1. Больным с установленным диагнозом «механическая желтуха» и наличием объемного образования головки ПЖ по данным ультразвукового исследования с целью оценки распространенности опухолевого процесса целесообразно выполнять МРТ и ЭУС органов брюшной полости.

2. Для дооперационного стадирования рака головки ПЖ следует выполнять 3D-реконструкцию панкреатодуоденальной зоны по данным МСКТ либо МРТ, которая позволяет определить критерии резектабельности опухоли.

3. Для выбора объема лимфодиссекции необходимо интегрировать графические данные ЭУС в 3D-модель на основе МРТ панкреатодуоденальной зоны.

Заклучение / Conclusion

3D-моделирование на основе МРТ- и МСКТ-исследований является информативным методом в дооперационном стадировании рака головки ПЖ и его резектабельности. Данный метод позволяет объективно определить локализацию и распространённость опухолевого процесса на прилежащие анатомические структуры, а также визуально продемонстрировать метастатическое поражение регионарных лимфатических узлов. По параметрам диагностической эффективности 3D-модели максимально приближены к интраоперационной картине, что дает возможность планировать как объем, так и ход оперативного вмешательства.

Для объективной дооперационной оценки резектабельности опухоли головки ПЖ и точно-го объема оперативного вмешательства необходимо максимально использовать возможности мультимодальной лучевой диагностики панкреа-тодуоденальной зоны. В оценке T-стадии чувстви-тельность методов МРТ и ЭУС составила 93,2%

и 76,9%, а специфичность – 98,2% и 50,0% соот-ветственно.

Гибридная (МРТ-ЭУС) 3D-модель панкреа-тодуоденальной зоны позволяет с высокой точ-ностью стадировать онкологический процесс и определять объем лимфаденэктомии. В оценке метастазирования в регионарные лимфоузлы дан-ная модель имеет чувствительность 85% и специ-фичность 60%, в определении стадии опухолевого процесса ее чувствительность составляет 92,0%, специфичность – 67,8%.

Показатели чувствительности и специфич-ности 3D-моделей на основе данных МРТ и МСКТ в оценке инвазии магистральных сосудов близки и составляют 98,7% и 98,3%, 94,5% и 94,1% соот-ветственно. Обе 3D-модели являются достаточно информативными методами в дооперационной оценке резектабельности рака головки ПЖ.

Гибридная 3D-реконструкция панкреа-тодуоденальной зоны в большинстве случаев сопоста-вима с интраоперационной и патогистологической картиной.

Литература [References]

- Orth M, Metzger P, Gerum S, et al. Pancreatic ductal adenocarcinoma: biological hallmarks, current status, and future perspectives of combined modality treatment approaches. *Radiat Oncol.* 2019; 14: 141. <https://doi.org/10.1186/s13014-019-1345-6>.
- Murakami T, Hiroshima Y, Matsuyama R, et al. Role of the tumor microenvironment in pancreatic cancer. *Ann Gastroenterolo Surg.* 2019; 3(2): 130–7. <https://doi.org/10.1002/ags3.12225>.
- Ho WJ, Jaffee EM, Zheng L. The tumour microenvironment in pancreatic cancer – clinical challenges and opportunities. *Nat Rev Clin Oncol.* 2020; 17(9): 527–40. <https://doi.org/10.1038/s41571-020-0363-5>.
- Hu JX, Zhao CF, Chen WB, et al. Pancreatic cancer: a review of epidemiology, trend, and risk factors. *World J Gastroenterol.* 2021; 27(27): 4298–321. <https://doi.org/10.3748/wjg.v27.i27.4298>.
- Жук Л.А., Тур Г.Е. Структура заболеваемости больных раком поджелудочной железы. В кн.: Маскевич С.А., Позняк С.С. (ред.) Сахаровские чтения 2019 года: экологические проблемы XXI века. Материалы 19-й международной научной конференции, 23–24 мая 2019 г. Часть 1. Минск: ИВЦ Минфина; 2019: 216–9. [Zhuk LA, Tur GE. Structure of morbidity and mortality of patients with pancreatic cancer. In: Maskevich SA, Poznyak SS (Eds). Sakharov Readings 2019: environmental problems of the XXI century. Proceedings of the 19th International Scientific Conference, May 23–24, 2019. Minsk; 2019: 216–9 (in Russ).]
- Райн В.Ю., Чернов А.А., Заботкин С.О. Выживаемость при протоковой аденокарциноме головки поджелудочной железы после панкреа-тодуоденальной резекции. *Медицинская наука и образование Урала.* 2020; 21(4): 127–30. <https://doi.org/10.36361/1814-8999-2020-21-4-127-130>. [Rayn VU, Chernov AA, Zabolkin SO. Survival after pancreaticoduodenectomy for pancreatic ductal adenocarcinoma. *Medical Science And Education Of Ural.* 2020; 21(4): 127–30 (in Russ). <https://doi.org/10.36361/1814-8999-2020-21-4-127-130>.]
- Singh RR, O'Reilly EM. New treatment strategies for metastatic pancreatic ductal adenocarcinoma. *Drugs.* 2020; 80(7): 647–69. <https://doi.org/10.1007/s40265-020-01304-0>.
- Подкопаева Д.С. Рак головки поджелудочной железы – протоковая аденокарцинома, с позиции современной онкохи-рургии. В кн.: Эксперимент в хирургии и онкологии: сборник научных трудов и материалов научно-практической конфе-ренции с международным участием. Курск: КГМУ; 2020: 20–1. <https://doi.org/10.21626/cb.20.surgeryexperiment-sept>. [Podkopaeva DS. Pancreatic head cancer – ductal adenocarcinoma, from the perspective of modern oncosurgery. In: Experiment in surgery and oncology: a collection of scientific papers and materials of the scientific and practical conference with international participation. Kursk; 2020: 20–1 (in Russ). <https://doi.org/10.21626/cb.20.surgeryexperiment-sept>.]
- Fang C, Zhu W, Wang H, et al. A new approach for evaluating the resectability of pancreatic and periampullary neoplasms. *Pancreatol.* 2012; 12(4): 364–71. <https://doi.org/10.1016/j.pan.2012.05.006>.
- Захарова О.П., Кубышкин В.А., Кармазановский Г.Г. Протокол КТ-исследования при оценке резектабельности рака подже-лудочной железы. *Хирургия. Журнал им. Н.И. Пирогова.* 2012; 8: 44–50. [Zakharova OP, Kubyskhin VA, Karmazanovskii GG. The requirement for the CT-scan protocol for the proper assessment of pancreatic tumors resectability. *Pirogov Russian Journal of Surgery.* 2012; 8: 44–50 (in Russ).]
- Тюрина А.Н., Пронин И.Н., Фадеева Л.М. и др. Протонная 3D-МР-спектроскопия в диагностике глиальных опухолей головного мозга. *Медицинская визуализация.* 2019; 3: 8–18. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-2019-3-8-18>.

- [Tyurina AN, Pronin IN, Fadeeva LM, et al. Proton 3D MR spectroscopy in the diagnosis of glial brain tumors. *Medical Visualization*. 2019; 3: 8–18 (in Russ). <https://doi.org/10.24835/1607-0763-2019-3-8-18>.]
12. Rasenberg D, Ramaekers M, Jacobs I, et al. Computer-aided decision support and 3D modelling in pancreatic cancer surgery. *Eur J Surg Oncol*. 2023; 49(2): e162–3. <https://doi.org/10.1016/j.ejso.2022.11.625>.
 13. Duan H, Liu P, Chen C, et al. Reconstruction of three-dimensional vascular models for lymphadenectomy before surgery. *Minim Invasive Ther Allied Technol*. 2020; 29(1): 42–8. <https://doi.org/10.1080/13645706.2019.1569533>.
 14. Rossetti D, Vitale SG, Tropea A, et al. New procedures for the identification of sentinel lymph node: shaping the horizon of future management in early stage uterine cervical cancer. *Updates Surg*. 2017; 69(3): 383–8. <https://doi.org/10.1007/s13304-017-0456-6>.
 15. Chen C, Chen L, Tang L, et al. Application of digital three-dimensional model of abdominal and pelvic vessels in selecting intravascular catheterization method. *J Interv Radiol*. 2015; 24(3): 252–6 (in Chinese). <http://doi.org/10.3969/j.issn.1008-794X.2015.03.017>.
 16. Hu HJ, Huang YW, Zhu YC. Tumor feeding artery reconstruction with multislice spiral CT in the diagnosis of pelvic tumors of unknown origin. *Diagn Interv Radiol*. 2014; 20(1): 9–16. <http://doi.org/10.5152/dir.2013.12176>.