

Печень

DOI: 10.16931/1995-5464.2016416-22

Виртуальное моделирование операции на печени на основе данных компьютерной томографии*Колсанов А.В.¹, Манукян А.А.³, Зельтер П.М.², Чаплыгин С.С.¹, Капишников А.В.²*¹ *Кафедра оперативной хирургии и клинической анатомии с курсом инновационных технологий и*² *кафедра лучевой диагностики и лучевой терапии с курсом медицинской информатики
ФГБОУ ВО Самарский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения
Российской Федерации; 443099, г. Самара, ул. Чапаевская, д. 89, Российская Федерация*³ *ГБУЗ "Самарский областной клинический онкологический диспансер" Министерства здравоохранения
Самарской области; 443031, г. Самара, ул. Солнечная, д. 50, Российская Федерация***Цель.** Изучить возможности компьютерной системы формирования виртуальных моделей "Автоплан" для предоперационного планирования и оценить ее эффективность при операциях на печени.**Материал и методы.** Обследовано 50 пациентов с заболеваниями печени. Всем больным проводили виртуальное моделирование. Компьютерные томограммы загружали в систему "Автоплан", формирование 3D-моделей проводил рентгенолог при участии хирурга. На этапе планирования операции хирург проводил виртуальную линию резекции и определял анатомические особенности.**Результаты.** При обследовании кисты и гемангиомы печени выявили у 20 больных, паразитарные кисты печени — у 7, абсцесс печени — у 6, гепатоцеллюлярный рак — у 5, метастазы в печени — у 8, портальный тромбоз — у 4 пациентов. Операция проведена 31 пациенту. Во время хирургического вмешательства на экран в операционную выводили 3D-модель для интерактивного сопоставления с интраоперационной картиной. Применение моделирования позволяло хирургу уверенно идентифицировать анатомические структуры и патологические образования, формировать оптимальную линию разреза, а также избегать повреждения сосудов.**Заключение.** Разработанные алгоритмы и математический аппарат системы моделирования "Автоплан" обеспечивают построение и анализ 3D-модели органов брюшной полости. Предоперационное планирование с применением 3D-моделей продемонстрировало информативность в оценке анатомических особенностей пациента и достаточности объема сохраняемой паренхимы при заболеваниях печени.**Ключевые слова:** печень, гепатоцеллюлярный рак, метастазы, гемангиома, киста, эхинококкоз, 3D-моделирование, компьютерная томография.**Preoperative Virtual Modeling of Liver Based on Computerized Tomography Data***Kolsanov A.V.¹, Manukyan A.A.³, Zelter P.M.², Chaplygin S.S.¹, Kapishnikov A.V.²*¹ *Department of Operative Surgery and Clinical Anatomy with the Course of Innovative Technologies and*² *Department of Radiology and Radiation Therapy with the Course of Medical Informatics, Samara State
Medical University; 89, Chapaevskaya str., Samara, 443099, Russian Federation*³ *Samara Regional Clinical Oncology Center; 50, Solnechnaya str., Samara, 443031, Russian Federation***Aim.** To explore the possibilities of "Avtoplan" computerized system for virtual modeling in preoperative planning and to evaluate its effectiveness in liver surgery.**Material and Methods.** The survey of 50 patients with liver disease was analyzed. All patients underwent virtual modeling. The data were loaded into "Avtoplan" system. 3D models were created by radiologist with involvement of surgeon. At the planning stage the surgeon performed a virtual resection line and learned some anatomical features.**Results.** Virtual modeling revealed following diseases: liver cyst and hemangioma (20 cases); hydatid liver cysts (7 cases); liver abscess (6 cases); hepatocellular carcinoma (5 cases); liver metastases (8 cases); portal thrombosis (4 cases). The operation was carried out in 31 patients. During surgery 3D-model was shown on the screen for interactive comparison with intraoperative situation. The use of virtual simulation allows the surgeon to confidently identify anatomical structures and pathological changes, to form an optimum resection line, as well as to avoid damage of vascular trunks.**Conclusion.** The developed algorithms of "Avtoplan" virtual simulation system provide the construction and analysis of the 3D-model of the abdominal cavity. Preoperative planning using virtual 3D-model confirmed effective evaluation of patient's anatomical features and necessary postoperative liver volume.**Key words:** liver, hepatocellular carcinoma, metastases, hemangioma, cyst, hydatid disease, 3D-modeling, computerized tomography.

● Введение

Хирургические вмешательства связаны с высоким риском для жизни пациента и требуют высокой точности от хирурга, знаний анатомических особенностей и синтопии у конкретного пациента. Мультиспиральная компьютерная томография (МСКТ) является одним из ведущих методов диагностики патологических изменений внутренних органов, в частности печени, и позволяет дифференцировать доброкачественные и злокачественные образования, определять их васкуляризацию и топографическую анатомию различных сосудистых структур и желчных протоков [1]. Часто хирурги при подготовке к операции изучают лишь протокол исследования, в котором зафиксированы не все необходимые моменты, или рассматривают ограниченное число изображений на рентгеновской пленке. Внедрение в работу стационара системы PACS предоставило хирургам возможность самостоятельно изучать выполненное исследование [2]. Некоторые рабочие станции обладают функцией построения 3D-изображения, которое позволяет предоставить ответы на некоторые появившиеся после изучения протокола вопросы. К сожалению, стандартная 3D-модель без цветового картирования артерий, вен и образований не предоставляет возможностей для сегментации (выделения) патологического очага из окружающей ткани, отображения образования с питающими сосудами для планирования линии разреза, объемного представления резецируемой и сохраняемой части печени для оценки достаточности ее объема. Некоторые рабочие станции обладают

рядом функций по планированию операций, но также не лишены недостатков (отсутствие русскоязычного интерфейса, высокая стоимость и т.д.). На рис. 1 представлены результаты работы подобной станции Myrian (Intrasense, Франция).

На кафедре топографической анатомии и оперативной хирургии с курсом инновационных технологий СамГМУ, в связи с актуальностью предоперационного планирования и ограничениями существующих систем, группой специалистов, включающей программистов, хирургов и рентгенологов, проводится разработка и внедрение системы для предоперационного планирования с возможностью полуавтоматической сегментации. Система планирования оперативного вмешательства должна объединить в себе медицинское оборудование, систему PACS с рабочими станциями и возможностью использования на компьютерах и мобильных устройствах непосредственно в операционной (рис. 2).

● Материал и методы

Обследовали 50 пациентов, которым выполнили МСКТ на 32-срезовом и 64-срезовом томографе. Применяли болюсное введение неионного контрастного препарата с помощью автоматического шприца (скорость введения 4–5 мл/с). Получали артериальную, венозную и отсроченную фазы контрастирования. Затем изображения в формате DICOM загружали в разработанную программу “Автоплан” с плагинами по сегментации печени, патологических очагов и сосудистых структур. Сегментацию и 3D-моделирование проводили рентгенологи при участии хирургов.

Колсанов Александр Владимирович — доктор мед. наук, профессор, заведующий кафедрой оперативной хирургии и клинической анатомии с курсом инновационных технологий ФГБОУ ВО СамГМУ, директор Института инновационного развития СамГМУ, руководитель Центра прорывных исследований “Информационные технологии в медицине”. **Манукян Арман Арутюнович** — врач-рентгенолог отделения КТ и МРТ ГБУЗ СОКОД. **Зельтер Павел Михайлович** — канд. мед. наук, ассистент кафедры лучевой диагностики и лучевой терапии с курсом медицинской информатики ФГБОУ ВО СамГМУ. **Чаплыгин Сергей Сергеевич** — канд. мед. наук, доцент кафедры оперативной хирургии и клинической анатомии с курсом инновационных технологий ФГБОУ ВО СамГМУ, руководитель отдела маркетинга и выставочной деятельности института инновационного развития СамГМУ. **Капишников Александр Викторович** — доктор мед. наук, профессор, заведующий кафедрой лучевой диагностики и лучевой терапии с курсом медицинской информатики.

Для корреспонденции: Зельтер Павел Михайлович — 443068, г. Самара, ул. Ново-Садовая, 106л-98, Российская Федерация. Тел.: 8-917-942-12-34. E-mail: pzelter@mail.ru

Kolsanov Alexander Vladimirovich — Doct. of Med. Sci., Professor, Head of the Department of Operative Surgery and Clinical Anatomy with the Course Innovative Technologies, Samara State Medical University, Director of the Institute of Innovative Development of Samara State Medical University, Head of Research Center of Breakthrough “Information Technologies in Medicine”. **Manukyan Arman Arutyunovich** — Radiologist of CT and MRI Department of the Samara Regional Clinical Oncology Center. **Zelter Pavel Mikhailovich** — Cand. of Med. Sci., Assistant of the Department of Radiology and Radiation Therapy with the Course of Medical Informatics, Samara State Medical University. **Chaplygin Sergey Sergeevich** — Cand. of Med. Sci., Senior Lecturer, Department of Surgery and Clinical Anatomy with the Course Innovative Technologies, Samara State Medical University, Head of Marketing and Exhibition Activities of the Institute of Innovative Development, Samara State Medical University. **Kapishnikov Alexander Viktorovich** — Doct. of Med. Sci., Head of the Department of Radiology and Radiation Therapy with a Course of Medical Informatics.

For correspondence: Zelter Pavel Mikhailovich — 106l-98, Novo-Sadovaya str., Samara, 443068, Russian Federation. Phone: 8-917-942-12-34. E-mail: pzelter@mail.ru

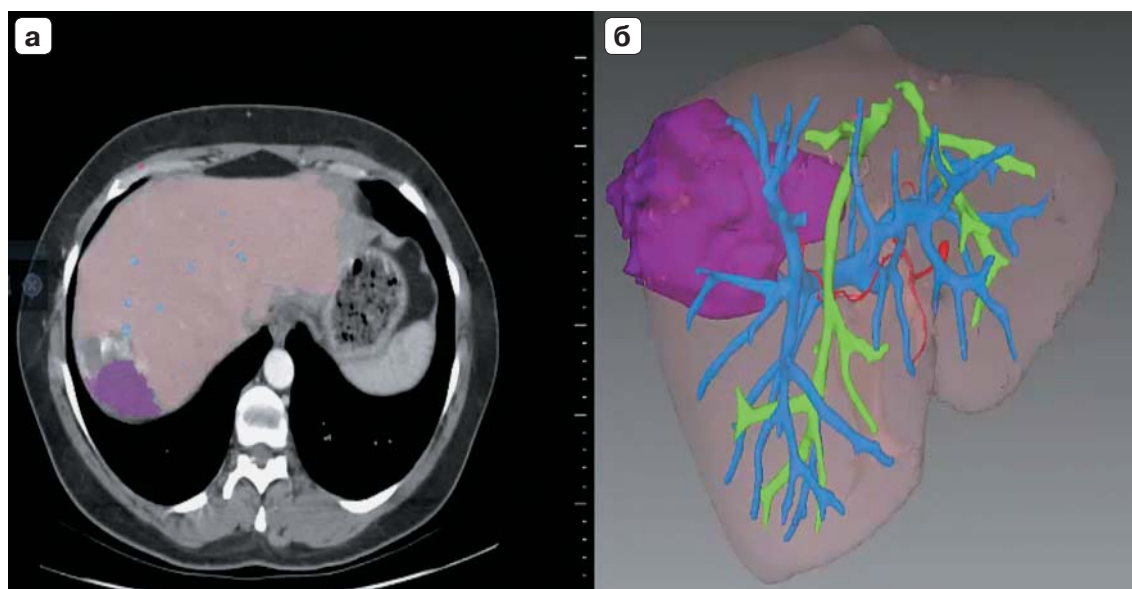


Рис. 1. Пример построения 3D-модели печени в программе Murgian: а — компьютерная томограмма, аксиальное изображение, фиолетовым цветом выделена гемангиома; б — 3D-модель, показаны объем, расположение и синтопия новообразования с артериями (красный цвет), венами (голубой цвет) и желчными протоками (зеленый цвет).

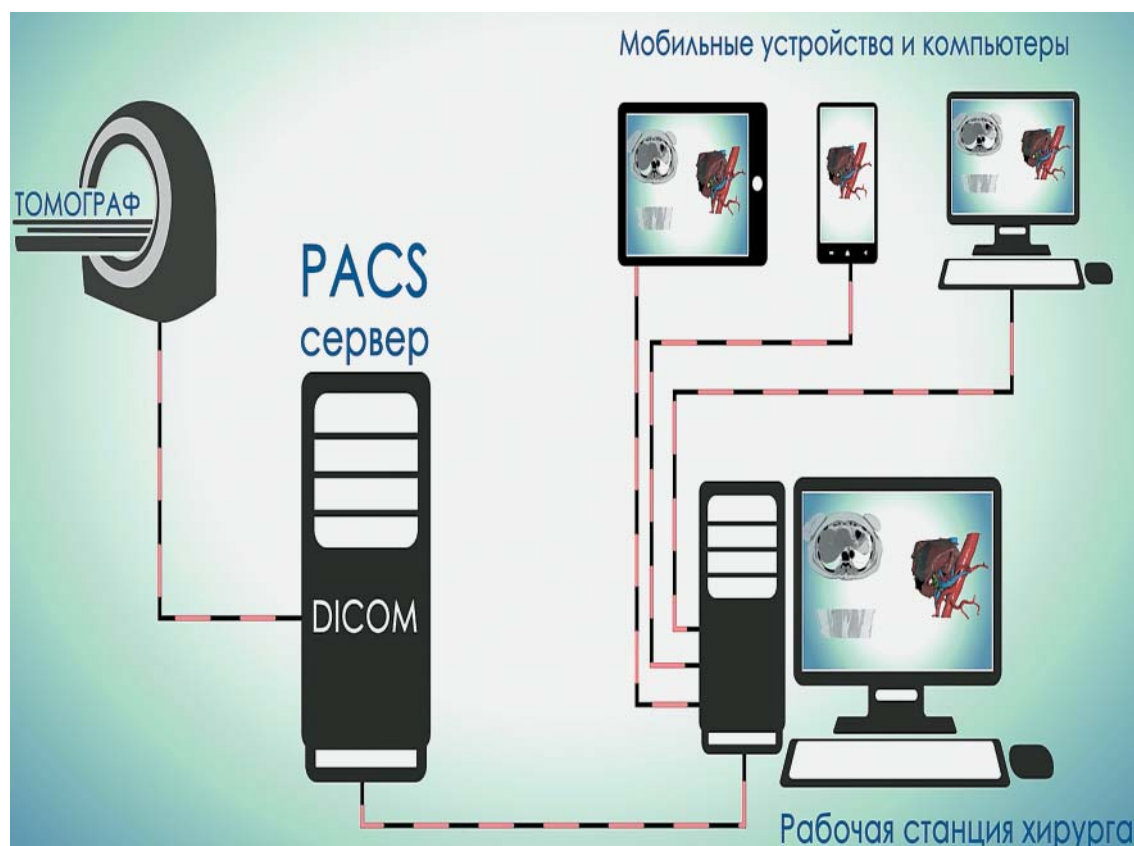


Рис. 2. Структура системы предоперационного планирования, анализа и хранения данных.

Сначала в полуавтоматическом режиме осуществляли сегментацию печени, затем пользователь в ручном режиме мог исправить погрешности. Далее, также в полуавтоматическом режиме, выделяли очаговые образования и в автоматическом режиме отслеживали сосудистые структуры. Проводили деление печени на сегменты расстановкой ключевых точек и последующим формированием секущих плоскостей. Хирург проводил виртуальную линию резекции, задавал интересующие опорные точки (синтопию с ветвями воротной вены, достаточность кровотока сохраненной части и т.д.). На обработку одного исследования затрачивали от 15 до 30 мин в зависимости от сложности патологического процесса и поставленных задач.

● Результаты

Из 50 обследованных пациентов кисту и гемангиому печени выявили у 20, паразитарные кисты печени — у 7, абсцессы печени — у 6. Гепатоцеллюлярный рак диагностирован у 5 больных, метастазы в паренхиму печени — у 8, портальный тромбоз — у 4. Безусловно, разработка программы далека от завершения, и ряду больных моделирование проводили для иллюстрации реализованных функций системы. Например, у пациентов с выявленными при МСКТ доброкачественными образованиями не планировали оперативное вмешательство. Однако пациентам с абсцессами печени, крупными кистами и портальным тромбозом моделирование применяли для предоперационной подготовки и интраоперационного контроля. В качестве иллюстрации приводим клинические наблюдения.

У пациентки 75 лет при МСКТ обнаружены гемангиомы печени (рис. 3). После 3D-моделирования достоверно определена синтопия сосудов и новообразований, рассчитан объем пораженной паренхимы печени. Операцию не выполняли ввиду явной доброкачественности процесса.

При обследовании больной 73 лет диагностированы множественные метастазы в печени (рис. 4). По сравнению с рутинной МСКТ на 3D-модели более наглядно отображен объем пораженной паренхимы печени, все сосуды, проходящие вблизи метастазов. После оценки жизнеспособности сохраняемой паренхимы печени было решено воздержаться от оперативного вмешательства (остаточный объем после резекции — 31,5%). Рассматривали возможность проведения радиочастотной абляции. Учитывая число, размеры образований и близость сосудов, от этой манипуляции также было решено воздержаться.

У пациента 53 лет при МСКТ диагностирован абсцесс печени. Применен плагин, позволяющий делить изображение печени на сегменты. На полученной 3D-модели (рис. 5) патологическое образование располагается лишь в VIII сегменте, в котором не было

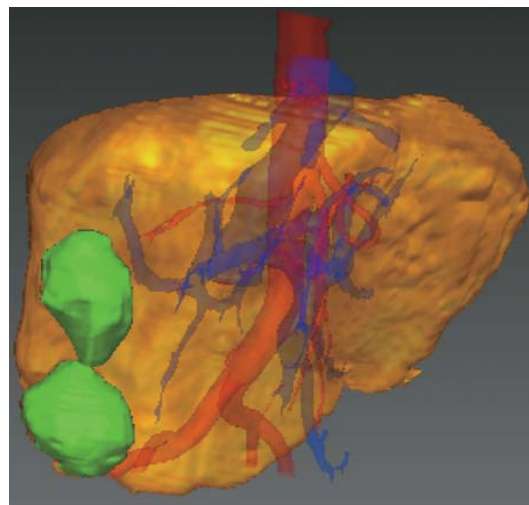


Рис. 3. 3D-модель печени. Гемангиомы печени. Зеленым цветом обозначены гемангиомы, коричневым — паренхима печени, красным — артерии, синим — вены.

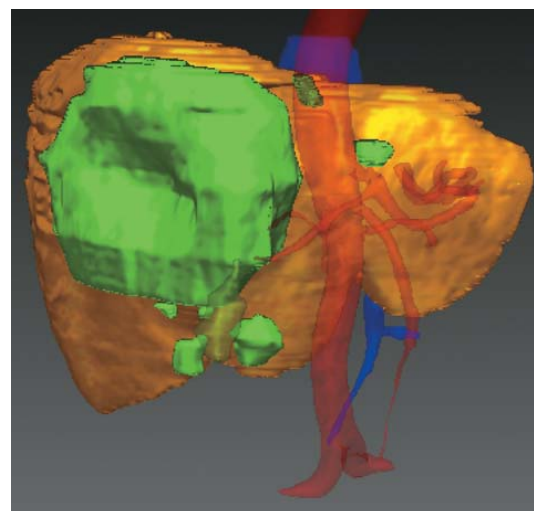


Рис. 4. 3D-модель печени. Метастазы в печени. Зеленым цветом обозначены метастазы, коричневым — паренхима печени, красным — артерии, синим — вены.

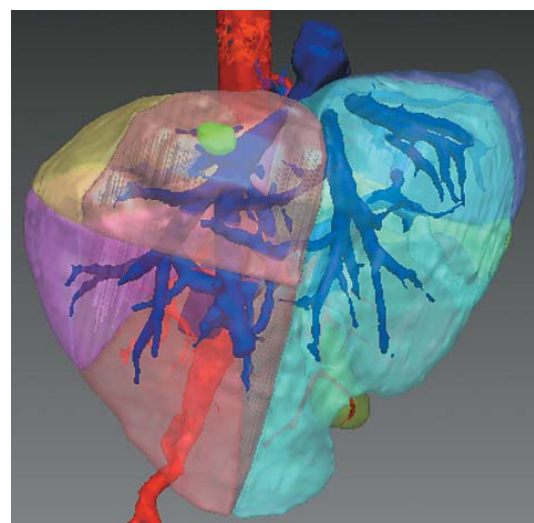


Рис. 5. 3D-модель печени. Метастазы в печени. Пример деления печени на сегменты. Зеленым цветом обозначены метастазы, красным — артерии, синим — вены.

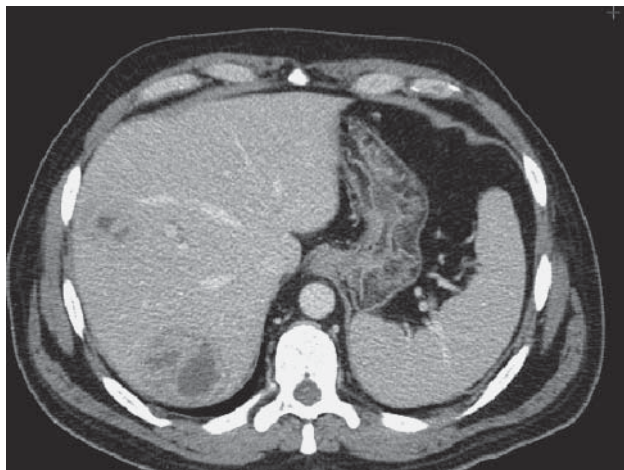


Рис. 6. Компьютерная томограмма. Эхинококкоз печени. Венозная фаза исследования, аксиальное изображение.

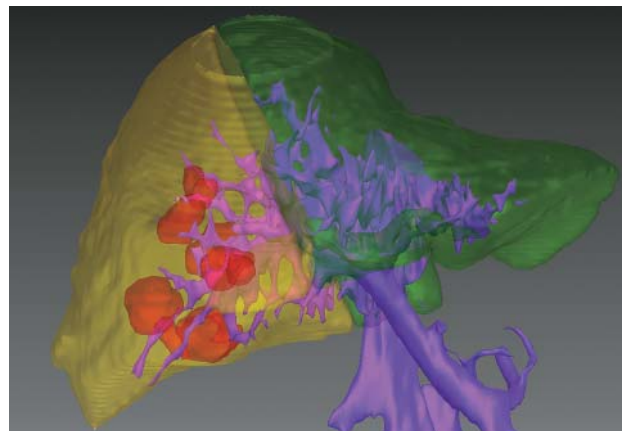


Рис. 7. 3D-модель печени. Эхинококкоз печени. Зеленым цветом обозначена сохраняемая паренхима печени, желтым — резецируемая. Красным цветом схематично показаны эхинококковые кисты, фиолетовым — ветви воротной и печеночной вен.

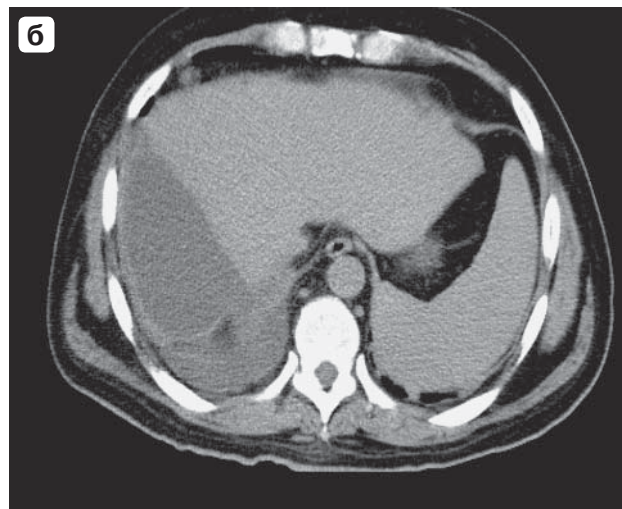
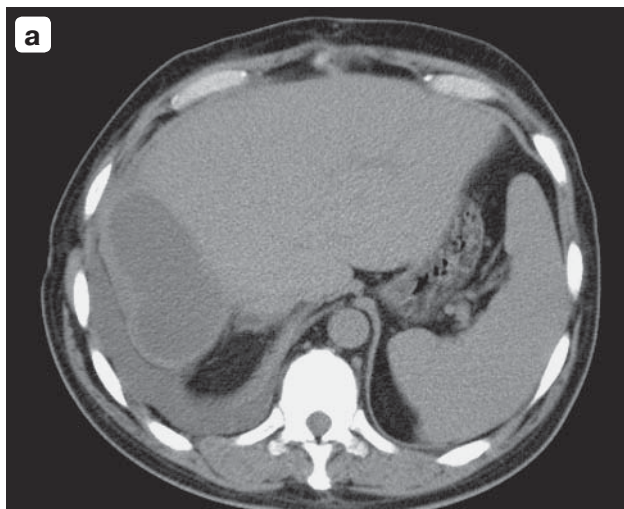


Рис. 8. Компьютерная томограмма. Скопление жидкости в области правой доли печени: а — через 1 мес после операции; б — через 3 мес после операции.

магистральных сосудов. Пациенту была выполнена секторальная резекция печени.

МСКТ выполнена больному 51 года. В правой доле печени выявлено 4 образования, соответствующих по характеру эхинококковым кистам (рис. 6). Диагноз был подтвержден иммунологическими тестами. Выполнено моделирование печени и сосудов. В результате измерений объем сохраняемой паренхимы печени составил 48% с достаточным объемом кровоснабжения (рис. 7). Выполнена правосторонняя гемигепатэктомия. Перед операцией оператор и ассистент повторно изучили модель на экране монитора. Во время операции хирург обращался к ассистенту с планшетным компьютером, на который была загружена 3D-модель, чтобы идентифицировать анатомические структуры и их синтопию. Послеоперационный период — без особенностей. Через месяц после операции выполнена МСКТ: в области расположения правой доли печени выявлено скопление жидкости 100 × 60 мм. Через 2 мес выполнена контрольная

МСКТ: объем паренхимы печени увеличился до 50 × 40 мм (рис. 8).

Учитывая разнородность исследуемой группы пациентов, провести сравнение таких объективных показателей оперативного вмешательства, как продолжительность, кровопотеря, частота осложнений, на настоящем этапе невозможно. Эта задача будет решена при накоплении достаточного объема фактического материала. Было решено ориентироваться на оценку впечатлений хирургов. Такой подход согласуется с рядом публикаций по схожей тематике [3, 4].

В 7 (14%) наблюдениях применение системы позволило отказаться от манипуляции вследствие особенностей кровоснабжения, т.е. изменить тактику лечения пациента. Было проведено сравнение объемных измерений, выполняемых системой “Автоплан”, и тех же показателей при обработке рабочей станцией томографа Toshiba

Aquilion 32. При проведении статистического анализа с помощью расчета критерия Манна–Уитни достоверных различий между объемами выявлено не было.

При опросе хирургов было выяснено, что получаемые модели обладают наглядностью, удобством использования. Во время операции ими легко управлять для создания оптимального курса. Было указано на необходимость отдельной сегментации и картирования разными цветами ветвей воротной вены и печеночных вен, что в дальнейшем будет реализовано.

● Обсуждение

В отечественной литературе тема 3D-моделирования освещалась фрагментарно. Монография [4] имела некоторые ограничения в связи с недостатками техники на этапе выполнения исследования: использована односрезовая спиральная КТ, ввиду низкой скорости вращения трубки невозможно было получить точную артериальную и венозную фазу контрастирования.

Системы по созданию сегментаций и 3D-моделей с возможной интраоперационной навигацией являются активно изучаемыми в настоящее время. В систематическом обзоре [5] авторы проанализировали 11 публикаций, насчитывавших 497 пациентов. Отмечены наглядность получаемых моделей, их удобство для отображения, положительные отзывы хирургов. В качестве показателей сравнения указаны время операции, кровопотеря, изменение операционного плана, размер разреза, частота осложнений и летальность. Но число пациентов в исследованиях было небольшим, часть групп была разнородной, и адекватного сравнения с оперативными вмешательствами без моделирования зачастую не проводилось.

Существуют примеры использования 3D-моделирования и интраоперационной навигации при выполнении радиочастотной абляции метастазов в печень. Интраоперационные навигационные системы позволяют хирургу более точно подводить инструмент к патологическому очагу и оценивать его реальные размеры непосредственно во время операции. Также при повторных хирургических вмешательствах ретроспективный анализ предыдущих и построение новых 3D-моделей позволяют идентифицировать зоны радиочастотной абляции и зоны рецидива опухоли [6]. В экспериментальном исследовании на органах свиней было доказано более точное подведение иглы после виртуального моделирования [7].

В исследовании М. Peterhans и соавт. показаны положительные результаты применения 3D-моделирования и интраоперационной навигации при операциях на печени по поводу опухолей. В частности, среднее время операции с приме-

нием системы 3D-моделирования уменьшилось на 16,5 мин по сравнению с операциями, во время которых систему не применяли [8]. В работе С. Hansen и соавт. помимо 3D-моделирования печени и возможности построения линии резекции представлены новые методы оценки жизнеспособности сохраняемой ткани на основе особенностей кровоснабжения печени [9]. Также имеются публикации о системах дополненной реальности и их успешном применении при операциях на печени. Система позволяет совместить интраоперационное поле и построенную заранее 3D-модель, что помогает хирургу быстрее и точнее идентифицировать анатомические структуры и патологические образования [10].

Разработаны системы, которые позволяют хирургу полностью погрузиться в виртуальную реальность. При помощи очков виртуальной реальности перед хирургом появляется заранее построенная по данным КТ 3D-модель органов брюшной полости. В системе используют специальные перчатки, которые надевает хирург, затем датчики фиксируют движения и жесты, которые он совершает. Таким образом, у врача есть возможность непосредственного контакта с 3D-моделью в виртуальной реальности, возможность управлять ею [3]. Для создания 3D-моделей уже используются не только данные КТ, но и МРТ, которая более информативна при поражениях головного и спинного мозга [11].

Несмотря на небольшое число результатов применения подобных систем, особенно с доказанной эффективностью, в настоящее время становится очевидной их польза при подготовке к операции и во время оперативного вмешательства, в частности при заболеваниях печени.

● Заключение

Построение 3D-модели с цветовым картированием раскрывает синтопию, которую невозможно определить с помощью стандартной 3D-модели, построенной рабочей станцией. Показана информативность 3D-моделей, созданных при помощи разработанной системы “Автоплан”, в оценке достаточности сохраняемой паренхимы печени и определении характера васкуляризации объемных образований. Объемные показатели продемонстрировали высокую точность и отсутствие достоверных различий с данными сертифицированного оборудования. В 14% наблюдений применение предоперационного моделирования позволило изменить тактику лечения.

На данном этапе система получила положительные отзывы хирургов, продолжается ее применение в клинической практике. При накоплении достаточного объема фактического материала по разным заболеваниям будет проведено сравнение объективных показателей, описывающих оперативное вмешательство.

● Список литературы

1. Прокоп М., Галански М. Спиральная и многослойная компьютерная томография. Пер. с англ. М.: Медпресс-информ, 2008. Т. 1. 416 с.
2. Королюк И.П. Медицинская информатика. 2-е изд., перераб. и доп. Самара: ООО "Офорт": ГБОУ ВПО "СамГМУ", 2012. 244 с.
3. Lin Q., Xu Z., Li B., Baucom R., Poulose B., Landman B.A., Bodenheimer R.E. Immersive virtual reality for visualization of abdominal CT. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.* 2013; 8673. doi: 10.1117/12.2008050.
4. Федоров В.Д., Кармазановский Г.Г., Гузеева Е.Б., Цвиркун В.В. Виртуальное хирургическое моделирование на основе данных компьютерной томографии. М.: Видар-М, 2003. 184 с.
5. Hallet J., Gayet B., Tsung A., Wakabayashi G., Pessaux P. Systematic review of the use of pre-operative simulation and navigation for hepatectomy: current status and future perspectives. *J. Hepatobiliary Pancreat. Sci.* 2015; 22 (5): 353–362. doi: 10.1002/jhbp.220.
6. Banz V.M., Baechtold M., Weber S., Peterhans M., Inderbitzin D., Candinas D. Computer planned, image-guided combined resection and ablation for bilobar colorectal liver metastases. *World J. Gastroenterol.* 2014; 20 (40): 14992–14996. doi: 10.3748/wjg.v20.i40.14992.
7. Wu W., Xue Y., Wang D., Li X., Xue J., Duan S., Wang F. Application of 3D imaging in the real-time US-CT fusion navigation for minimal invasive tumor therapy. *Int. J. Comput. Assist. Radiol. Surg.* 2015; 10 (10): 1651–1658. doi: 10.1007/s11548-015-1224-z.
8. Peterhans M., vom Berg A., Dagon B., Inderbitzin D., Baur C., Candinas D., Weber S. A navigation system for open liver surgery: design, workflow and first clinical applications. *Int. J. Med. Robot.* 2011; 7 (1): 7–16. doi: 10.1002/rcs.360.
9. Hansen C., Zidowitz S., Hindennach M., Schenk A., Hahn H., Peitgen H.O. Interactive determination of robust safety margins for oncologic liver surgery. *Int. J. Comput. Assist. Radiol. Surg.* 2009; 4 (5): 469–474. doi: 10.1007/s11548-009-0359-1.
10. Soler L., Nicolau S., Pessaux P., Mutter D., Marescaux J. Real-time 3D image reconstruction guidance in liver resection surgery. *Hepatobiliary Surg. Nutr.* 2014; 3 (2): 73–81. doi: 10.3978/j.issn.2304-3881.
11. Lo C.Y., Chao Y.P., Chou K.H., Guo W.Y., Su J.L., Lin C.P. DTI-based virtual reality system for neurosurgery. *Conf. Proc. IEEE Eng. Med. Biol. Soc.* 2007; 2007: 1326–1329.

● References

1. Prokop M., Galanski M. *Spiral'naya i mnogosloynnaya komp'yuternaya tomografiya* [Spiral and multislice computerized tomography]. Moscow: Medpress-inform, 2008. V. 1. 416 p. (In Russian)
2. Korolyuk I.P. *Meditsinskaya informatika* [Medical informatics]. Samara: Ltd "Ofort": GBOU VPO "SamGMU", 2012. 244 p. (In Russian)
3. Lin Q., Xu Z., Li B., Baucom R., Poulose B., Landman B.A., Bodenheimer R.E. Immersive virtual reality for visualization of abdominal CT. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.* 2013; 8673. doi: 10.1117/12.2008050.
4. Fedorov V.D., Karmazanovsky G.G., Guzeeva E.B., Tsvirkun V.V. *Virtual'noye khirurgicheskoye modelirovaniye na osnove dannykh komp'yuternoy tomografii* [Virtual surgical modeling based on CT data]. Moscow: Vidar-M, 2003. 184 p. (In Russian)
5. Hallet J., Gayet B., Tsung A., Wakabayashi G., Pessaux P. Systematic review of the use of pre-operative simulation and navigation for hepatectomy: current status and future perspectives. *J. Hepatobiliary Pancreat. Sci.* 2015; 22 (5): 353–362. doi: 10.1002/jhbp.220.
6. Banz V.M., Baechtold M., Weber S., Peterhans M., Inderbitzin D., Candinas D. Computer planned, image-guided combined resection and ablation for bilobar colorectal liver metastases. *World J. Gastroenterol.* 2014; 20 (40): 14992–14996. doi: 10.3748/wjg.v20.i40.14992.
7. Wu W., Xue Y., Wang D., Li X., Xue J., Duan S., Wang F. Application of 3D imaging in the real-time US-CT fusion navigation for minimal invasive tumor therapy. *Int. J. Comput. Assist. Radiol. Surg.* 2015; 10 (10): 1651–1658. doi: 10.1007/s11548-015-1224-z.
8. Peterhans M., vom Berg A., Dagon B., Inderbitzin D., Baur C., Candinas D., Weber S. A navigation system for open liver surgery: design, workflow and first clinical applications. *Int. J. Med. Robot.* 2011; 7 (1): 7–16. doi: 10.1002/rcs.360.
9. Hansen C., Zidowitz S., Hindennach M., Schenk A., Hahn H., Peitgen H.O. Interactive determination of robust safety margins for oncologic liver surgery. *Int. J. Comput. Assist. Radiol. Surg.* 2009; 4 (5): 469–474. doi: 10.1007/s11548-009-0359-1.
10. Soler L., Nicolau S., Pessaux P., Mutter D., Marescaux J. Real-time 3D image reconstruction guidance in liver resection surgery. *Hepatobiliary Surg. Nutr.* 2014; 3 (2): 73–81. doi: 10.3978/j.issn.2304-3881.
11. Lo C.Y., Chao Y.P., Chou K.H., Guo W.Y., Su J.L., Lin C.P. DTI-based virtual reality system for neurosurgery. *Conf. Proc. IEEE Eng. Med. Biol. Soc.* 2007; 2007: 1326–1329.

Статья поступила в редакцию журнала 09.03.2016.
Received 9 March 2016.