



С. А. ЕСЬКОВ, С. А. КРАСНЫЙ, В. Т. МАЛЬКЕВИЧ, Я. А. САВИЧ

ТРЕХМЕРНОЕ КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В РЕКОНСТРУКТИВНОЙ ХИРУРГИИ МЕСТНОРАСПРОСТРАНЕННОГО РАКА ЛЕГКОГО

РНПЦ онкологии и медицинской радиологии им. Н. Н. Александрова, Минск, Беларусь

Цель исследования. Демонстрация эффективности трехмерного (3D) моделирования в предоперационном планировании, контроле качества и мониторинге состояния оперированных структур после сложной трахеобронхоангиопластики по поводу рака легкого центральной локализации.

Материал и методы. Пациенту 67 лет выполнена сложная органосохраняющая реконструктивная операция на легком. Планирование операции осуществлено на 3D-модели, которая была построена с помощью программного продукта 3D Slicer на основании КТ-грамм органов грудной полости. Контроль качества выполнения операции производился интраоперационно путем сравнения удаленного препарата с его моделью. Мониторинг состояния оперированных структур осуществлялся путем анализа 3D-моделей, построенных на основании послеоперационных исследований.

Результаты. Операция проведена строго в соответствии с планом. Послеоперационный период протекал без осложнений. Период наблюдения составил 18 мес. Признаков прогрессирования заболевания не выявлено, артериальный и бронхиальный анастомозы проходимы. Отмечено увеличение оперированного легкого.

Заключение. 3D-моделирование является эффективным средством предоперационного планирования, контроля качества и мониторинга состояния оперированных структур после сложных трахеобронхоангиопластических операций по поводу рака легкого центральной локализации.

Ключевые слова: рак легкого, 3D-моделирование, хирургия, органосохраняющие операции, реконструктивные операции.

Objective. The main aim of the report is to demonstrate the effectiveness of three-dimensional (3D) modeling in preoperative planning, quality control and monitoring of the operated structures condition after a complex tracheobronchoangioplasty for centrally located lung cancer.

Materials and methods. A 67-year-old patient undergone a complex parenchyma-sparing reconstructive surgery on the lung. Operation planning was carried out on the 3D models, which had been built with the help of 3D Slicer software product based on chest CT scans. Quality control of the operation was implemented intraoperatively by comparing the removed specimen with its model. Monitoring of the operated structures was conducted by analyzing 3D models constructed on the basis of postoperative studies.

Results. The operation was performed strictly in accordance with the plan. The postoperative course was uneventful. The observation period constituted 18 months. Signs of the disease progression were not detected; arterial and bronchial anastomoses are permeable. An increase in the operated lung was noted.

Conclusion. 3D modeling is an effective tool in terms of preoperative planning, quality control and monitoring of the operated structures after complex tracheobronchoangioplasty for centrally located lung cancer.

Key words: 3D reconstruction, lung, digital anatomy, centrally located lung cancer, parenchyma-sparing surgery, reconstructive surgery.

HEALTHCARE. 2024; 1: 52—59.

THREE-DIMENSIONAL COMPUTER MODELING IN RECONSTRUCTIVE SURGERY OF LOCALLY ADVANCED LUNG CANCER.

S. A. Yeskov, S. A. Krasny, V. T. Malkevich, Y. A. Savich

По данным GLOBOCAN, рак легкого занимает первое место в структуре заболеваемости и смертности от злокачественных новообразований [1]. По данным Белорусского канцер-регистра, рак легкого по частоте встречаемости среди онкологических заболеваний находится на 2-м месте у мужчин (15,2 %) и вносит наибольший вклад в структуру их смертности — 25,4 % (16,8 % для всего населения). Методом выбора лечения пациентов с НМРЛ I—IIIA ста-

дий является хирургический [2]. При локализации опухоли в пределах доли легкого выполняется лобэктомия. При распространении опухоли легкого за пределы доли выполняется билобэктомия или пневмонэктомия. Пневмонэктомия признана золотым стандартом объема операции при центральном раке легкого [3]. Однако данный объем операции сопровождается высоким риском послеоперационных осложнений и летального исхода. Даже при тщательном отборе

пациентов 30-дневная послеоперационная летальность достигает 16—20 % [4]. 5-летняя общая выживаемость пациентов после пневмонэктомии составляет 32 % [5]. Основным трендом в торакальной онкохирургии последнего десятилетия стало широкое внедрение органосохраняющих реконструктивных оперативных вмешательств на легких как альтернативы пневмонэктомии [6]. В настоящее время точка зрения о целесообразности и предпочтительности органосохраняющего подхода даже у пациентов с сохранной функцией внешнего дыхания является доминирующей [7, 8]. При планировании такой операции необходимо учесть взаимное пространственное расположение опухоли, бронхов и легочных сосудов, а также точек их ветвления. Немаловажными являются объем и состояние сохраняемой паренхимы легкого.

Объективных критериев выполнимости органосохраняющего вмешательства на легком не существует, выбор объема операции субъективен и зависит от решения хирурга.

В настоящее время в нашем Центре при планировании хирургического лечения по поводу злокачественных новообразований центральной локализации рутинно выполняется трехмерное компьютерное моделирование с целью оценки целесообразности и выполнимости органосохраняющего реконструктивного бронхо-и/или ангиопластического оперативного вмешательства, выбора оптимального способа реконструкции, расположения линий резекции структур, прогнозирования рисков неблагоприятного течения, оценки качества и мониторинга состояния оперированных структур. В период с января 2021 г. по август 2023 г. у 82 пациентов данной категории операции выполнены на основании 3D-моделирования.

С целью демонстрации возможностей трехмерного моделирования в решении различных задач, касающихся выполнения сложных реконструктивных оперативных вмешательств на легких, приводится клинический пример.

Материал и методы

Пациент Ф., 67 лет, курильщик со стажем более 30 лет. Диагноз при обращении — плоскоклеточный рак правого верхнедолевого бронха с распространением на промежуточный и правый главный бронхи, нижнюю треть трахеи с метастазами в субкаринальных и правых нижних паратрахеальных лимфоузлах cT4N2M0

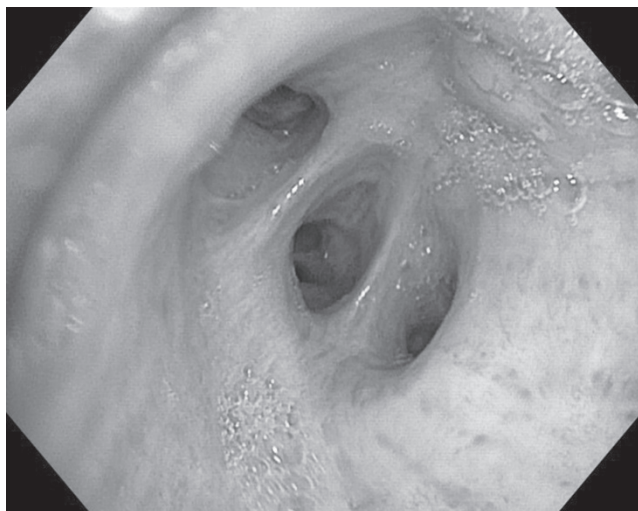
IIIB стадия. У пациента имелась выраженная сопутствующая патология: ИБС: стенокардия напряжения ФК 2. Постинфарктный (в 2005 г.) и атеросклеротический кардиосклероз. Фиброз створок аортального клапана. Относительная недостаточность митрального клапана с регургитацией I степени, трикуспидального с регургитацией I степени. Атеросклероз аорты и венечных артерий, H2A (XCH NYHA ФК 2). Облитерирующий атеросклероз артерий нижних конечностей (стенозы до 50 %). ЦВБ: стенозирующий атеросклероз брахиоцефальных артерий (стенозы до 45 %).

При фибробронхоскопии опухоль определяли в правом верхнедолевом бронхе. Она распространялась на главный бронх до нижней трети трахеи с верхней границей в 5 мм проксимальнее правого трахеобронхиального угла, дистальная граница опухоли располагалась в 7 мм от среднедолевого бронха. При морфологическом исследовании биоптата верифицирован неороговевающий плоскоклеточный рак, G2. С помощью трансbronхиальной пункционной биопсии субкаринальных лимфоузлов цитологически подтверждено их метастатическое поражение.

Эндоскопическая картина расположения опухоли в трахеобронхиальном дереве, а также способ кодирования расположения опухоли в трахеобронхиальном дереве с помощью логических и числовых переменных изображены на рис. 1. Данный способ позволяет не только кодировать границы опухоли относительно анатомических ориентиров, которыми являются устья бронхов, но и их взаимное расположение, что имеет немаловажное значение для выбора линии резекции бронхов.

По данным компьютерной томографии с ангиографией органов грудной полости и позитронно-эмиссионной томографии определялась опухоль правого верхнего долевого бронха (ВДБ) с переходом на главный бронх (ГБ) и нижнюю треть трахеи 30×31×40 мм, SUVmax до 15,5, опухоль тесно прилежала к правой легочной артерии, субкаринальные лимфоузлы увеличены до 18×24 мм с SUVmax 11,6. Правые паратрахеальные лимфоузлы верхние до 6 мм по короткой оси, SUVmax 2,2 и нижние 8×12 мм, SUVmax 5,4.

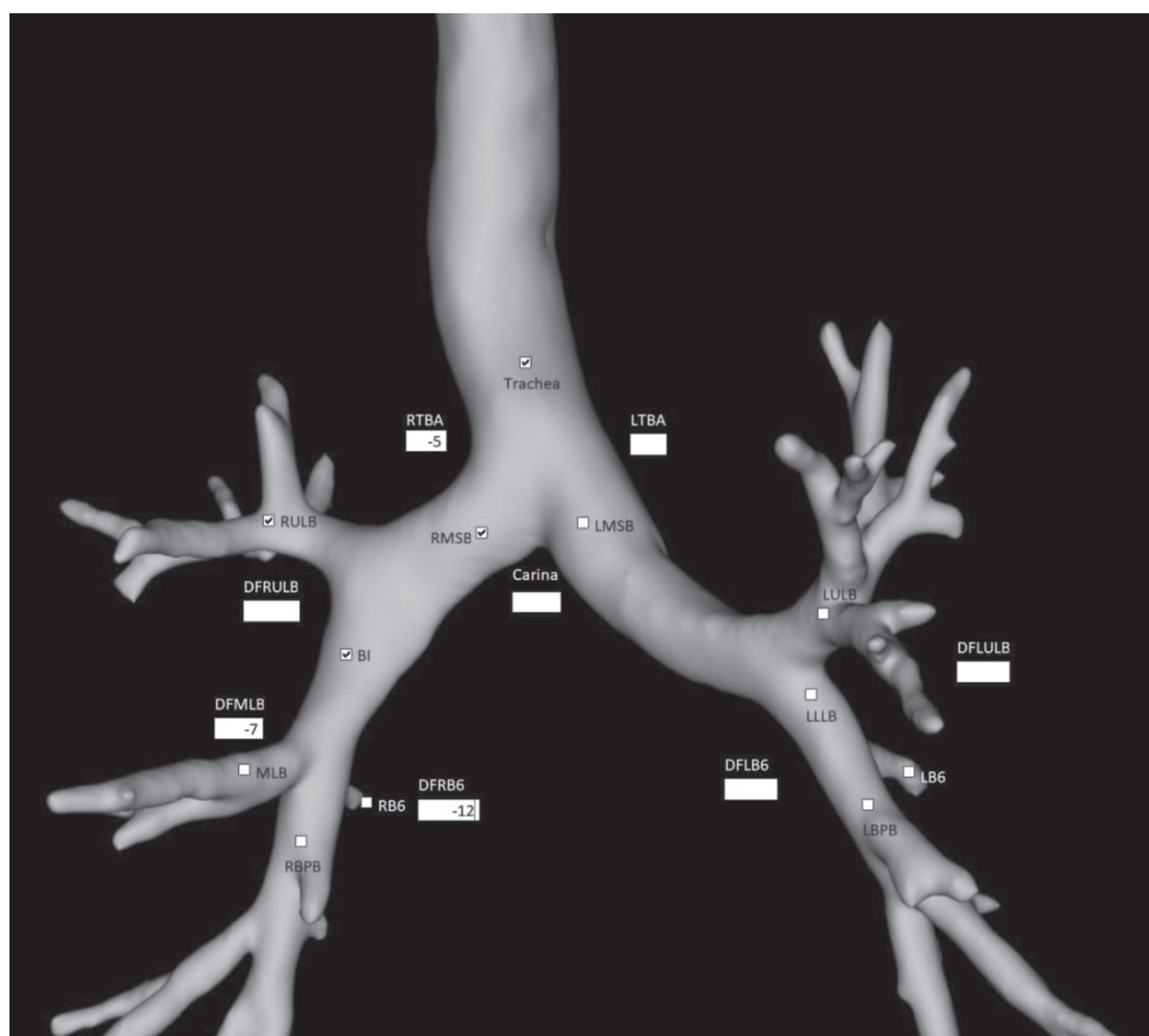
Принято решение о проведении двух курсов неoadъювантной полихимиотерапии по схеме: цисплатин+винарельбин, с последующей оценкой



А



Б



В

Рис. 1. Эндоскопическая картина расположения опухоли в трахеобронхиальном дереве: А — проксимальная граница опухоли в 5 см проксимальнее левого трахеобронхиального угла; Б — дистальная граница в 7 мм от устья среднедолевого бронха; В — преобразование данных эндоскопического исследования в цифровую форму. Устье среднедолевого бронха расположено в 5 мм от устья бронха шестого сегмента

эффекта и принятием решения о проведении хирургического лечения. В июне, августе 2021 г. проведено 2 курса неoadъювантной полихимиотерапии по указанной схеме. При контрольной позитронно-эмиссионной томографии отмечено уменьшение размеров опухоли до 31×27 мм, со снижением SUVmax до 12,2. Отмечено уменьшение размеров субкаринальных лимфоузлов до 10 мм. На данном этапе принято решение о целесообразности проведения хирургического лечения по поводу рака легкого.

При планировании оперативного вмешательства на легком констатирована необходимость этапной коррекции патологии сердца, что и было выполнено — на базе РНПЦ «Кардиология» проведено аортокоронарное шунтирование, удаление тромба аневризмы левого желудочка и ее пластика.

После завершения кардиохирургического этапа лечения пациенту проведено контрольное обследование. С помощью программного пакета 3D-Slicer версии 4.2 на основании КТ ангиографии произведено 3D-моделирование с построением моделей грудной клетки, бронхов, сосудов, паренхимы легких, лимфоузлов средостения, опухоли. При построении модели использовался авторский алгоритм, включающий последовательность операций преобразования двумерного изображения в трехмерное. Модель планирования операции с определением линии резекции структур — правой легочной артерии, нижней трети трахеи, нижнедолевого бронха отражена на рис. 2. Положение линий резекции определялось расстоянием не менее 12—15 мм от границ опухоли вдоль оси структуры.

Запланирована операция в объеме правосторонней верхней билобэктомии с циркулярной резекцией бифуркации трахеи, при необходимости — циркулярной резекцией правой легочной артерии с последующей реимплантацией правого нижнедолевого бронха в медиальную стенку левого главного бронха. Разработка плана реконструкции бронхиального дерева отражена на рис. 3.

Диастаз между краями трахеи и левого главного бронха составил 22 мм, между правым нижнедолевым и планируемым местом его имплантации в медиальную стенку левого главного бронха — 45 мм. Планировали резецировать участок легочной артерии протяженностью не менее 40 мм. В качестве оперативного досту-

па избрана боковая торакотомия в пятом межреберье.

Построена 3D-модель препарата с определением длин участков, подлежащих резекции.

В декабре 2021 г. операция выполнена в запланированном объеме. Разделена косая междолевая щель, выполнена лимфодиссекция в корне нижней доли, лимфоузлы отправлены на срочное гистологическое исследование. Выделена артерия к нижней доле, нижнедолевой бронх. По данным срочного гистологического исследования лимфоузлы корня нижней доли не поражены, констатирована выполнимость органосохраняющей операции. Выполнена систематическая лимфодиссекция. Мобилизованы трахея, оба главных бронха, нижняя легочная вена. Имело место прилегание опухоли к легочной артерии без признаков инвазии. Перевязаны, прошиты и пересечены ветви легочной артерии к верхней и средней долям, верхняя легочная вена. Подготовлен стерильный контур наркозного аппарата для подключения к левому легкому через рану. Трахея пересечена в 5 кольцах от трахеобронхиального угла. Левый главный бронх пересечен у карины. Правый нижнедолевой бронх пересечен на уровне устья бронха 6-го сегмента. Препарат удален. Левый главный бронх интубирован трубкой 6 мм. Налажена искусственная вентиляция левого легкого через стерильный контур в ране (рис. 4).

Иссечены края отсечения, переданы на срочное морфологическое исследование, по результатам которого опухолевый рост в них отсутствовал.

Проведено сравнение удаленного препарата с его 3D-моделью. Констатировано полное соответствие модели полученному результату (рис. 5).

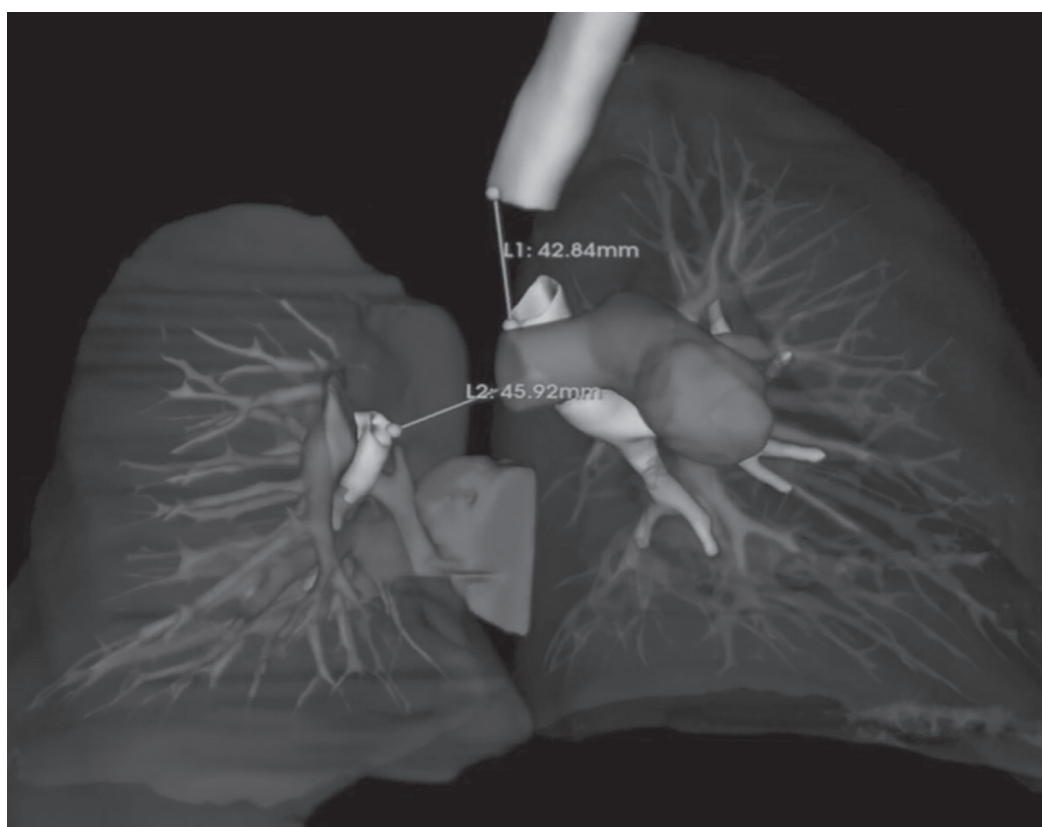
Сформирован трахеобронхиальный анастомоз (8-образные швы, полипропилен 3/0 N10). Контроль герметичности шва трахеобронхиального анастомоза (рис. 6).

Налажена высокочастотная искусственная вентиляция левого легкого через трахеальный катетер. Высечено окно в медиальной стенке левого главного бронха.

Сформировано соустье между правым нижнедолевым и левым главным бронхами. После реимплантации НДБ в левый ГБ возник избыток длины правой легочной артерии, она изогнулась дважды под острым углом (кинкинг



А



Б

Рис. 2. Линии резекции: А — нижняя треть трахеи, нижнедолевого бронха; Б — правая легочная артерия

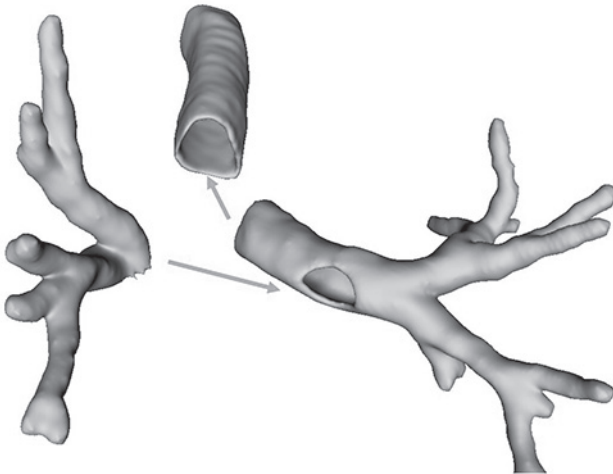


Рис. 3. План реконструкции бронхиального дерева

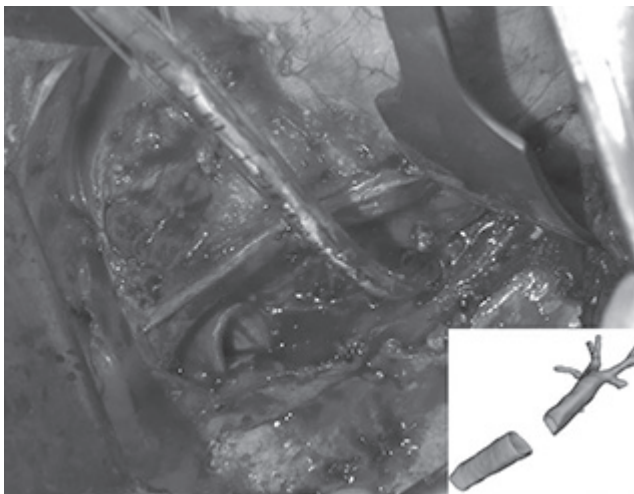


Рис. 4. Интубация левого главного бронха

легочной артерии). Проведена ее циркулярная резекция с формированием анастомоза (рис. 7).

Результаты и обсуждение

Послеоперационный период протекал без осложнений. При эндоскопическом исследовании в области трахеобронхиального анастомоза выявлены наложения фибрина.

По данным гистологического исследования препарата опухоль представлена плоскоклеточной карциномой GII с распространением на стенку трахеи и метастазом в лимфоузлах корня легкого (патоморфоз (ПТИ) 0—I стадии). В правом нижнем паратрахеальном лимфоузле выявлен очаг гиалиноза с фокусом некроза и перифокальной воспалительной реакцией (ПТИ IV стадии). Остальные присланные лимфоузлы и участок стенки легочной артерии без опухоли левого роста, pT4N2 GII R0.

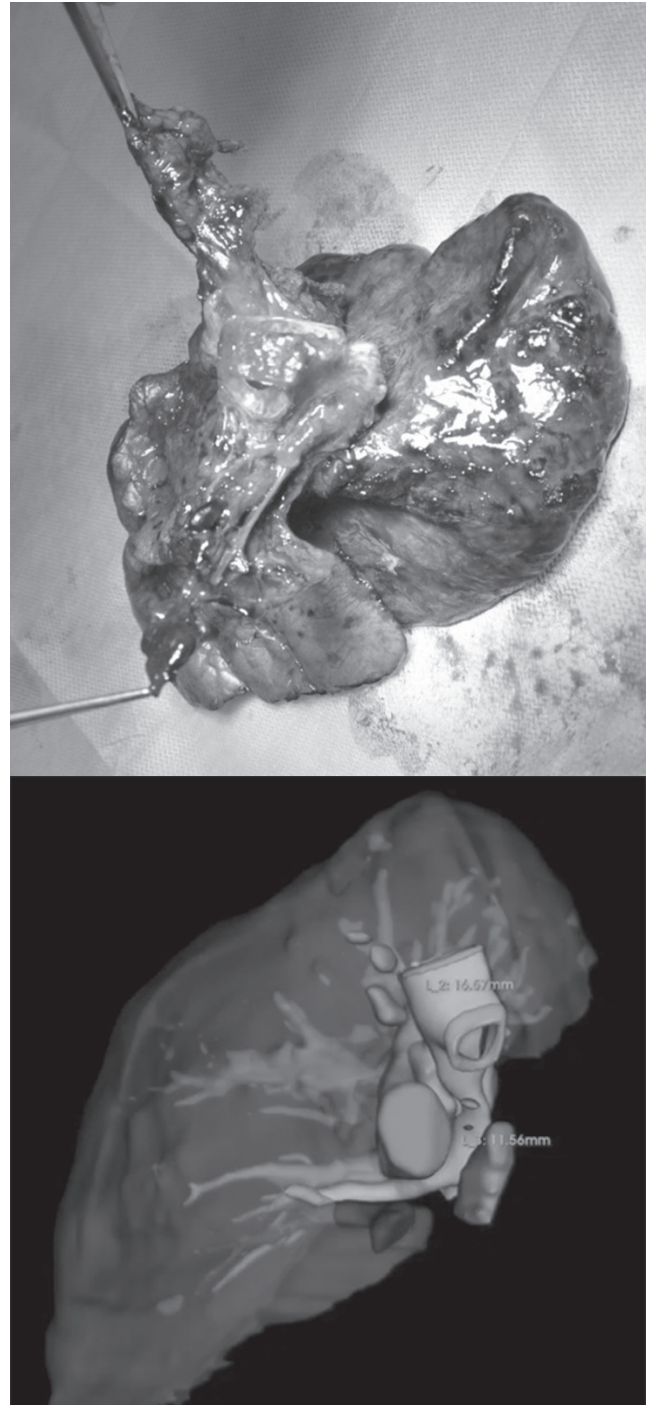


Рис. 5. Сравнение удаленного препарата с его 3D-моделью

Период наблюдения за пациентом составил 18 мес. Каждые 3—4 мес выполняли эхокардиографию, фибробронхоскопию и КТ-ангиографию.

По данным эхокардиографии патологии со стороны сердца выявлено не было, сократительная функция левого желудочка не нарушена.

По данным фибробронхоскопии патологических образований в просвете трахеобронхиального дерева не выявлено, анастомозы проходимы.



Рис. 6. Формирование трахеобронхиального анастомоза

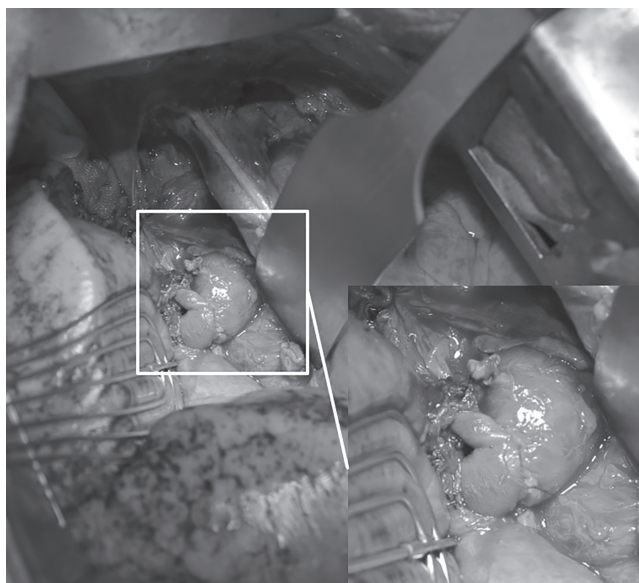


Рис. 7. Циркулярная резекция легочной артерии с формированием анастомоза

На основании двухмерных изображений КТ-ангиографии строились модели структур грудной полости. Виртуальная модель трахеобронхиального дерева оставалась неизменной, просветы анастомозов бронхов и легочной артерии достаточные, в динамике не изменялись. Отмечено постепенное увеличение объема паренхимы правого легкого с 1665 до 2330 мл уже за первые 12 мес (рис. 8).

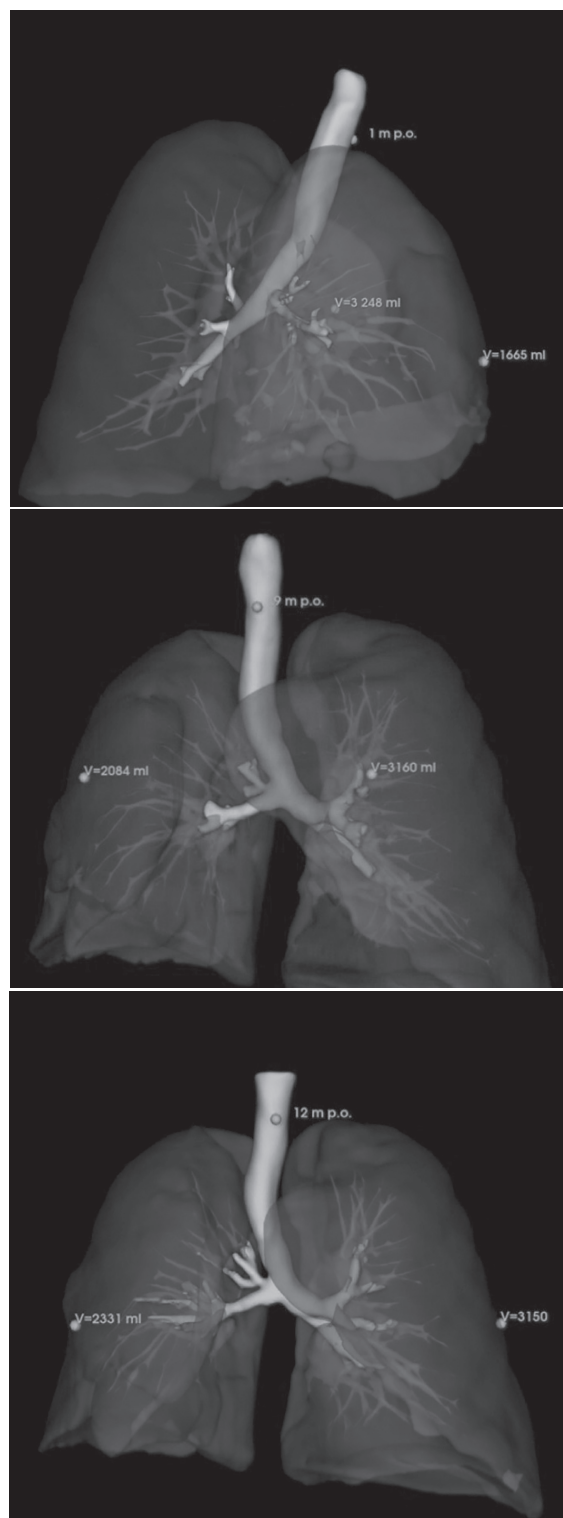


Рис. 8. Динамика увеличения объема паренхимы правого легкого за 12 мес

Кроме того, выполняли построение модели объема, расположенного между хорошо сегментируемыми структурами, которыми являются трахея, бронхи, контрастированные сосуды. Изменения этих объемов в динамике выявлено не было.

Рак легкого центральной локализации при стандартном подходе требует выполнения лечебной операции в объеме пневмонэктомии. В ряде случаев целесообразна и технически выполнима органосохраняющая бронхо-, ангиопластическая операция. Этому не может препятствовать даже распространение опухоли на трахею или другие структуры средостения. При этом необходимо соблюсти баланс между радикализмом и стремлением к сохранению непораженного участка легкого. Следует учитывать факторы, среди которых гистологическая принадлежность опухоли, взаимное пространственное расположение структур корня сохраняемого участка легкого и опухоли, состояние и объем его паренхимы легкого. Трехмерное компьютерное моделирование позволяет учесть все эти моменты и подвергнуть трехмерную модель, а не пациента виртуальной операции. При этом можно спрогнозировать натяжение по линии анастомозов и диаметры анастомозируемых структур. Известно, что эти факторы являются наиболее значимыми для неосложненного заживления бронхиального анастомоза.

Сравнение измерений трехмерной модели препарата с его фактическими размерами позволяет осуществить непосредственный контроль качества и соответствия операции плану во время нее. В отдаленном периоде трехмерное моделирование позволяет оценить динамику изменений со стороны оперированных структур — долгосрочную состоятельность просвета анастомозов и изменения объемов паренхимы легких. Построение 3D-моделей на основании послеоперационных исследований помогает произвести непосредственный контроль качества выполнения оперативного вмешательства и его соответствия плану, а также своевременно выявить изменения, требующие принятия мер по их коррекции.

Немаловажной деталью, требующей внимания при выполнении органосохраняющей операции на легком по поводу рака, является соблюдение критериев радикализма операции. В настоящее время процесс построения моделей достаточно трудоемкий и требует владения навыками работы со специализированным программным обеспечением, однако в будущем ожидается автоматизация этого процесса за счет внедрения технологий машинной обработки медицинских изображений. Благодаря этому технология станет доступна для рутинного

применения широкому кругу специалистов в различных областях хирургии. На данном этапе идет накопление опыта и разработка принципов применения технологии 3D-моделирования для решения различных прикладных задач в медицине.

Таким образом, 3D-моделирование является эффективным средством предоперационного планирования, контроля качества и мониторинга состояния оперированных структур после сложных трахеобронхоангиопластических операций по поводу рака легкого центральной локализации.

Контактная информация:

Еськов Сергей Александрович — к. м. н., ведущий научный сотрудник лаборатории торакальной онкопатологии. Республиканский научно-практический центр онкологии и медицинской радиологии им. Н. Н. Александрова. Агр. гор. Лесной, 223040, Минский р-н. Сл. тел.: +375 29 374-37-43.

Участие авторов:

Концепция и дизайн исследования: С. А. Е., С. А. К., В. Т. М. Сбор и обработка материала: С. А. Е., С. А. К., В. Т. М. Написание текста: С. А. Е. С. А. К., В. Т. М., Я. А. С. Редактирование текста: С. А. Е., Я. А. С.

Конфликт интересов отсутствует.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bray F., Ferlay J., Soerjomataram I. et al. Global cancer statistics 2018: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. *CA: A Cancer Journal for Clinicians*. 2018; 68 (6): 394—424.
2. Gorenstein L. A., Sonett J. R. The surgical management of stage I and stage II lung cancer. *Surg. Oncol. Clin. N. Am.* 2011; (20): 701—20.
3. Ma Q. L., Guo Y.-Q., Shi B. et al. For non-small cell lung cancer with T3 (central) disease, sleeve lobectomy or pneumonectomy? *J. Thorac. Dis.* 2016; (8): 1227—33.
4. Melloul E., Egger B., Krueger Th. et al. Mortality, complications and loss of pulmonary function after pneumonectomy vs. sleeve lobectomy in patients younger and older than 70 years. *Interact Cardiovasc Thorac Surg.* 2008; (7): 986—8.
5. Riquet M., Mordant P., Pricopi C. et al. A review of 250 ten-year survivors after pneumonectomy for non-small-cell lung cancer. *Eur. J. Cardiothorac Surg.* 2014; (45): 876—81.
6. Deslauriers J., Gregoire J., Jacques L. F. et al. Sleeve lobectomy versus pneumonectomy for lung cancer: a comparative analysis of survival and sites of recurrences. *The Annals of Thoracic Surgery*. 2004; (77): 1152—6.
7. Wang S., Wang X., Zhou Q. et al. Stereotactic ablative radiotherapy versus lobectomy for stage I non-small cell lung cancer: A systematic review. *Thorac Cancer*. 2018; (9): 337—47.
8. Nagayasu T., Yamasaki N., Tsuchiya T. et al. The evolution of bronchoplasty and broncho-angioplasty as treatments for lung cancer: Evaluation of 30 years of data from a single institution. *Eur. J. Cardiothorac. Surg.* 2016; (49): 300—6.

Поступила 18.10.2023.

Принята к печати 24.11.2023.