

ЛЕКЦИИ

УДК 616.27-006.441:616-073.756.8(001.891.7)

DOI: 10.12737/article_5a9f27123dad0.35024363

ЛИМФОМЫ СРЕДОСТЕНИЯ: ПОСТПРОЦЕССИНГОВАЯ ОБРАБОТКА ТОМОГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

А.В.Леншин, А.В.Ильин, А.Н.Одиреев, С.А.Крайнов

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Дальневосточный научный центр физиологии и патологии дыхания», 675000, г. Благовещенск, ул. Калинина, 22

РЕЗЮМЕ

Синдром лимфаденопатии (увеличение лимфоузлов) имеет место при многих заболеваниях, различающихся по этиологии, клиническому течению, методам лечения и прогнозу. При расшифровке причины лимфаденопатии диагностический поиск должен строиться с учетом клинической ситуации (характер лимфаденопатии, наличие других симптомов, анамнестические сведения, характер изменений в периферической крови и др.). Выбор наиболее информативного метода диагностики определяется диагностической гипотезой с учетом данных первичного осмотра больного, показателей периферической крови, а также знания чувствительности и специфичности соответствующего метода исследования для верификации предполагаемого заболевания.

В основу данного сообщения положен материал компьютерно-томографического обследования органов грудной клетки 491 больного с различными формами лимфом средостения в условиях консультативной поликлиники Дальневосточного научного центра физиологии и патологии дыхания с 2011 по 2017 гг. Среди них: саркоидоз внутригрудных лимфатических узлов первой, второй и частично третьей стадии (n=432); лимфома Ходжкина (n=17); метастазы в лимфоузлы средостения (n=25); лимфосаркома (n=12), туберкулез лимфатических узлов у взрослых (n=5). Всем им выполнялась, помимо традиционных цифровых рентгенологических исследований, мультиспиральная компьютерная томография, у 78% пациентов – фибробронхоскопия. Верификация была у 82% больных: трансбронхиальная биопсия при УЗИ-визуализации (72%) и трансторакальной открытой биопсии (28%).

Ключевые слова: лимфомы средостения, саркоидоз,

метастазы, лучевая диагностика, мультиспиральная компьютерная томография, постпроцессинговая обработка изображений, мультипланарная реконструкция, 3D-визуализация, виртуальная бронхоскопия.

SUMMARY

LYMPHOMAS OF MEDIASTINUM: POSTPROCESSING OF TOMOGRAPHIC IMAGES

A.V.Lenshin, A.V.Ilin, A.N.Odireev, S.A.Kraynov

Far Eastern Scientific Center of Physiology and Pathology of Respiration, 22 Kalinina Str., Blagoveshchensk, 675000, Russian Federation

The syndrome of lymphadenopathy (lymph-node hyperplasia) takes place in many diseases that are different by etiology, clinical course, methods of treatment and prediction. While identifying the cause of lymphadenopathy the diagnostic search should be based on the clinical situation (the character of lymphadenopathy, the presence of other symptoms, anamnestic data, the character of changes in the peripheral blood and others). The choice of the most informative method of diagnosis is defined by the diagnostic hypothesis with the consideration of the data of the primary examination of the patient, the parameters of the peripheral blood as well as the values of sensitivity and specificity of the corresponding method of study for verification of the disease supposed.

The basis of this research was the material of computed-tomography examination of chest organs in 491 patients with different forms of mediastinum lymphomas in the consultative policlinic of the Far-Eastern Scientific Center of Physiology and Pathology of Respiration from 2011 till 2017. Among them there were sarcoidosis of intrathoracic lymph glands of the first, second and partially third stage (n=432); Hodgkin's

lymphoma (n=17); metastases in lymph glands of mediastinum (n=25); lymphosarcoma (n=12), tuberculosis of lymph glands in adults (n=5). Beside prevailing digital radiologic studies, multispiral computed tomography was done to all of them and 78% went through fiberbronchoscopy. The verification was in 82% of patients: transbronchial biopsy under ultrasound visualization (72%) and transthoracic open biopsy (28%).

Key words: mediastinal lymphoma, sarcoidosis, metastases, X-ray diagnostics, multispiral computed tomography, image post processing, multiplanar reconstruction, 3D visualization, virtual bronchoscopy.

Медицинская визуализация повлияла на практическую медицину в последние десятилетия, что в значительной степени способствовало улучшению диагностики заболеваний, лечению и последующему наблюдению. Минимально инвазивные процедуры, ориентированные на качественное, максимально достоверное и реалистичное изображение, становятся все более распространенными в больницах, заменяя обычную инвазивную диагностику и способствуя быстрому восстановлению пациентов с меньшим количеством осложнений после процедуры. Мы предполагаем, что эта тенденция продолжится, медицинская визуализация будет играть все более важную роль в продвижении прецизионной (высокоточной) медицины в клиническую практику.

Известно, что определенной проблемой в компьютерной томографии (КТ) является то, что исследуемые объекты по своей природе являются объемными (трехмерными), и двумерные тонкие срезы не способны передать все пространственные свойства исследуемых объектов и сложны в интерпретации [12, 15].

Анализ только аксиальных КТ-срезов ограничивает полную визуализацию образования и анализ его взаимоотношения с прилежащими структурами из-за эффекта частичного объема. Оценить состояние просвета бронхов в полном объеме только по аксиальным срезам не представляется возможным из-за расположения их в разных плоскостях по отношению к плоскости сканирования [11].

Ведущий метод диагностики заболеваний легких – мультиспиральная компьютерная томография (МСКТ). МСКТ обладает не только преимуществами структурного и пространственного разрешения, но и специфической постпроцессинговой обработкой получаемого изображения [1, 3, 4, 14].

Термином «постпроцессинг» (постобработка, вторичная реконструкция КТ-изображений) принято называть обработку исходных аксиальных КТ-изображений с целью создания новых, более сложных двухмерных и трехмерных изображений [2, 16, 19, 21, 27, 40, 46, 56, 60]. В отличие от первичной реконструкции, осуществляемой из сырых данных, для вторичной реконструкции сырые данные не требуются.

Термином «рендеринг», который общепринят в зарубежной литературе, обозначается объемная 3D-визуализация. В последние годы для практического применения предложена новая модификация ренде-

ринга – «кинематический рендеринг». Кинематографический рендеринг (CR) – это новый алгоритм рендеринга, который включает более совершенную модель освещения, чем используемая для объемного рендеринга, для создания фотореалистичных 3D-изображений МСКТ [31, 36, 46, 60].

Последние достижения в компьютерной графике сделали объемную трехмерную визуализацию методом выбора. Результаты физической правдоподобности изображения зачастую легче интерпретировать для человеческого мозга, поскольку мозг обучен интерпретировать малейшие оттенки для реконфигурации информации о форме и глубине [31, 36, 46, 60].

Ряд исследователей [16, 21, 40, 46, 65] сформулировали основные задачи постпроцессинга в современных условиях:

- улучшение оценки пространственных взаимоотношений органов и структур;
- проведение презентаций для более наглядного представления КТ-данных, позволяющих врачам других специальностей лучше ориентироваться, как с точки зрения диагностики, так и оценки динамики течения патологического процесса;
- получение специальных клинических приложений для улучшения диагностики заболеваний [2, 16, 20, 29, 60];
- планирование вариантов консервативного лечения, вида и объема операции, хирургической навигации [19, 33, 41, 61, 62, 71].

У подавляющего числа современных МСКТ имеется возможность осуществлять данный вид высокотехнологической лучевой диагностики. Учитывая последовательную тенденцию наращивания в нашей стране оснащения данной техникой стационарных и амбулаторных учреждений, можно предполагать, что современный постпроцессинг при МСКТ исследовании постепенно станет рутинной технологией. Только нужно быть готовым к этому, имея ввиду обучение специалистов и мотивацию в освоении этих технологий.

Существует альтернативная точка зрения, свидетельствующая о необходимости некоторого ограничения широкого использования КТ для рутинной диагностики, в частности, грудного саркоидоза, с целью снижения лучевой нагрузки на пациентов.

Так, P.Spagnolo et al. [64] утверждают, что у многих пациентов «...результаты КТ являются нетипичными и незнакомыми большинству радиологов (например, саркоидоз, имитирующий другие заболевания легких и наоборот), и в этих случаях рекомендуется гистологическое подтверждение диагноза».

T.E.Wessendorf et al. [68] считают, что радиологическая диагностическая система все еще основана на рентгенографии грудной клетки, а КТ не является обязательной для диагностики и повседневного наблюдения.

Снижение дозы излучения при выполнении МСКТ и подавление шума, сохраняя структуру изображения, по-прежнему остается серьезной проблемой. В томо-

графических аппаратах последних поколений используются различные способы реконструкции, в том числе итеративная реконструкция, которые позволяют достичь ультранизкой дозы КТ и обеспечивают приемлемое качество изображения [25, 50, 55].

В настоящей работе нами изучены возможности применения современных способов постобработки МСКТ-изображений в диагностике патологии внутригрудных лимфоузлов (ВГЛУ) и проанализированы наиболее эффективные из них, в зависимости от поставленных диагностических задач.

В основу данного сообщения положен материал КТ-обследования органов грудной клетки в условиях консультативной поликлиники Дальневосточного научного центра физиологии и патологии дыхания с 2011 по 2017 гг. За этот период времени (7 лет) обследован 491 больной с различными формами лимфом средостения. Среди них: саркоидоз ВГЛУ первой, второй и частично третьей стадии (n=432); лимфома Ходжкина (n=17); метастазы в лимфоузлы средостения (n=25); лимфосаркома (n=12), туберкулез ВГЛУ у взрослых (n=5).

Помимо традиционных цифровых рентгенологических исследований, всем пациентам выполнялась МСКТ, фибробронхоскопия проведена 78% больным. Верификация была у 82% пациентов: трансбронхиальная биопсия при УЗИ-визуализации у 72% и трансторакальная открытая биопсия – у 28% больных.

В своей практической работе, в том числе в амбулаторных условиях, мы использовали базовые программные продукты рабочей станции «Vitrea 2» мультиспирального компьютерного томографа TOSHIBA Activion 16:

- мультипланарная реконструкция (МПР);
- проекция максимальной интенсивности (МIP);
- объемный рендеринг (3D-визуализация);
- виртуальная бронхоскопия.

Данные виды постпроцессинга нами используются при выполнении МСКТ практически у всех пациентов, независимо от характеристик исходных КТ-изображений, клинических особенностей, поставленных задач перед выполнением КТ.

Мультипланарная реконструкция выполняется после первичной реконструкции из сырых данных и получении аксиального изображения. В результате формируются двухмерные изображения в любой плоскости – сагиттальной, коронарной, наклоненной (косой) или изогнутой (криволинейной).

Получаемые при этом двухмерные изображения называют мультипланарными (многоплоскостными) реконструкциями или мультипланарными реформациями (МПР, англ. *multiplanar reformation, MPR*). Некоторые авторы считают термин «реформация» более правильным, поскольку он подчеркивает независимость создания МПР от сырых данных [51, 69]. В русскоязычной литературе чаще встречается термин «мультипланарная реконструкция» [5, 6, 21].

Режим криволинейной МПР предусматривает выпрямление трехмерного объекта и проецирование его на плоскость. Такой вид реконструкции особенно удо-

бен для визуализации удлинённых анатомических структур неправильной формы, например, позвоночника при его сколиотической деформации, трахеобронхиального дерева или сосудистых структур.

В большинстве зарубежных, в том числе и последних лет публикаций, отражающих диагностические возможности МПР, представлена в основном диагностика патологии паренхимы легких [24, 32, 35, 42, 47, 51, 54, 66, 69].

M.W.Kusk et al. [51] считают, что в большинстве современных КТ генерация изображений МПР стала автоматизированной, и это, по мнению авторов, потенциально увеличивает нагрузку на радиологов. Однако, не всегда при этом ясно, насколько повышается диагностическая эффективность использования МПР во всех клинических ситуациях? Авторы провели сравнительный ретроспективный анализ результатов КТ-исследования с применением МПР у 63 пациентов с подозрением на рак легких. Сравнительный анализ результативности диагностики сопоставлялся у опытных и начинающих специалистов. По результатам проведенного исследования, такие объективные показатели, как чувствительность и специфичность диагностики у начинающих и опытных специалистов были одинаковыми. Доказательная база эффективности применения МПР у авторов оригинальна и очень убедительна, и она свидетельствует, что даже начинающим специалистам становится по плечу решение непростых диагностических задач в сложных клинических ситуациях.

По умолчанию МПР имеют толщину, равную толщине исходных аксиальных КТ-изображений. При необходимости можно построить МПР с большей толщиной, так называемые толстые МПР («слэбы»). Для этого компьютер складывает воксели в соседних срезах, формируя более толстый слой, значения КТ-чисел этих вокселей усредняются.

Построение толстых (8-10 мм) аксиальных МПР, в сочетании с косыми, а иногда криволинейными реконструкциями, позволяет «выпрямить» сложно направленную трахею, бронхи и сосуды в единую плоскость, удобную для визуального анализа (рис. 1 а), создает условия для уверенной диагностики ВГЛУ (рис. 1 б). Регистрируется неизменный просвет промежуточного бронха справа (13,6 мм) и расширение тени правого корня в 1,5 раза (21,2 мм) за счет ВГЛУ.

МСКТ следует рассматривать как основной метод уточняющей диагностики при новообразованиях средостения. Показанием к ее проведению является уже сам факт обнаружения на рентгенограммах признаков ВГЛУ в средостении. Столь же обязательным следует считать выполнение МСКТ пациентам с нормальной рентгенологической картиной, но при наличии клинических симптомов, указывающих на высокую вероятность медиастинальной патологии [17, 18].

Эффективность МПР в диагностике медиастинальных лимфом (метастазы в медиастинальные лимфоузлы неоперабельного рака желудка) представлены на рисунке 2.

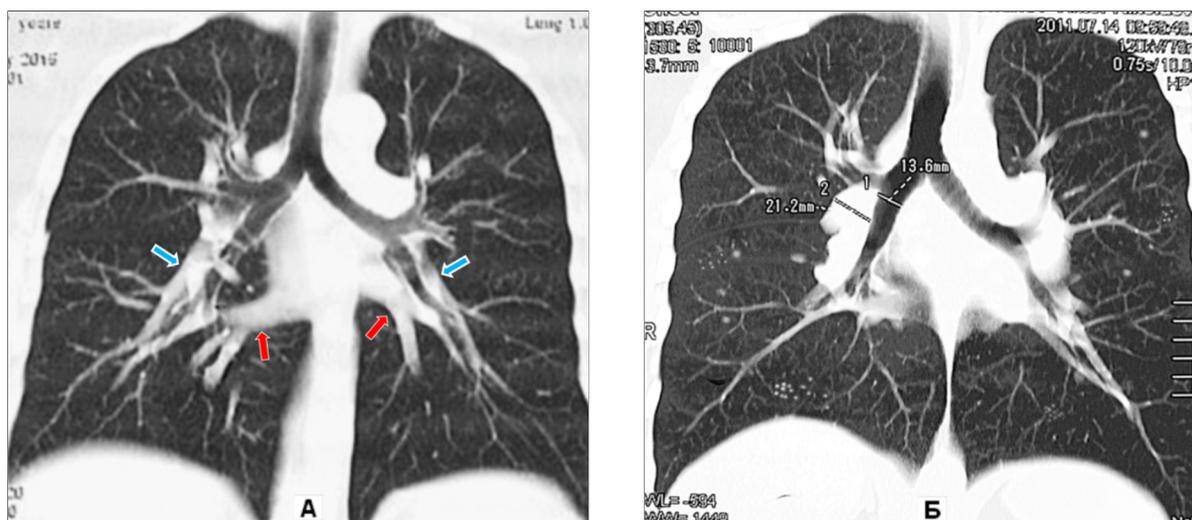


Рис. 1. А – МПР в коронарной проекции толстыми (9 мм) срезами с применением наклонных реконструкций – нормальная рентгеноанатомия корней и паренхимы легких. Отчетливо прослеживается трахея, магистральные бронхи и сосуды (артерии – синие стрелки, поперечно расположенные вены – красные стрелки). Б – МСКТ больной С., 43-х лет с медиастинально-легочной формой саркоидоза (саркоидоз II). МПР в коронарной плоскости – увеличение ВГЛУ, единичные и сгруппированные очаговые уплотнения в паренхиме легких.

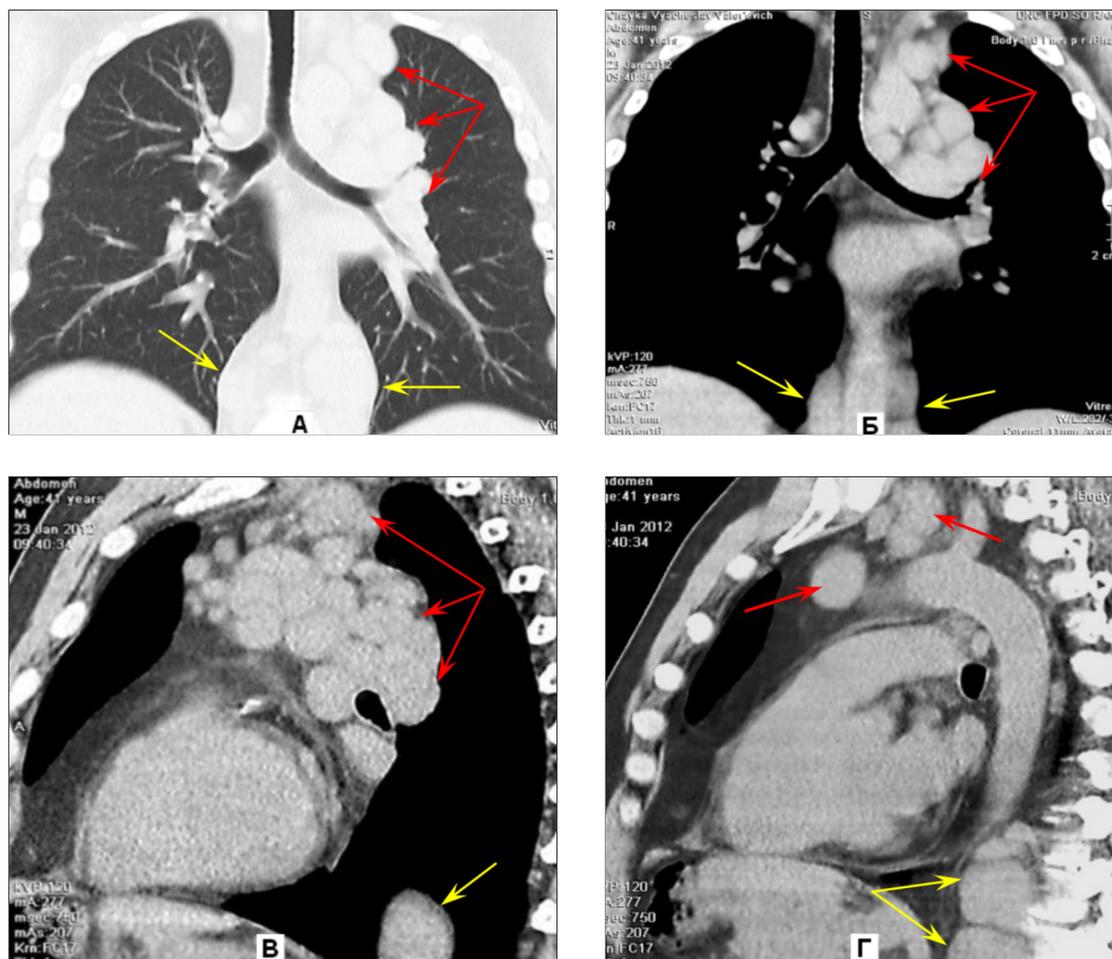


Рис. 2. Больной Ч., 41 год. Рак желудка, метастазы в лимфоузлы средостения. Односторонняя (левосторонняя) локализация. МПР. А – легочное окно в коронарной проекции; Б – мягкотканное окно в коронарной проекции; В и Г – мягкотканное окно в левой боковой проекции (различные уровни срезов). Увеличенные бронхопульмональные и верхнемедиастинальные лимфоузлы отмечены красными стрелками. Конгломерат парааортальных лимфоузлов в задненижнем средостении отмечен желтыми стрелками.

Проекция максимальной интенсивности (MIP).

Проекция максимальной интенсивности (англ. Maximum Intensity Projection, MIP). Это такая реконструкция, когда из всех вокселей по ходу луча зрения выбираются и отображаются воксели с максимальной плотностью. Этот метод показывает структуры с меньшей КТ-плотностью, в том числе в паренхиматозных органах. Данный вид реконструкции хорошо подходит для быстрой визуализации сосудистого русла любых областей исследования. MIP наглядно показывает, обрывы артерий при ишемическом инсульте и тромбозм-

болии легочных артерий [22, 38, 40, 43, 44, 53, 59, 63, 70].

В повседневной практической работе, при МСКТ органов грудной клетки, MIP, а иногда Inv.MIP (позитивное изображение) мы используем практически у всех пациентов, так как этот способ постобработки наиболее эффективен для визуализации малоинтенсивных, мелкоочаговых уплотнений, таких, например, как гранулематозные уплотнения при саркоидозе и туберкулезе, а также малоинтенсивные метастатические очаги (рис. 3).

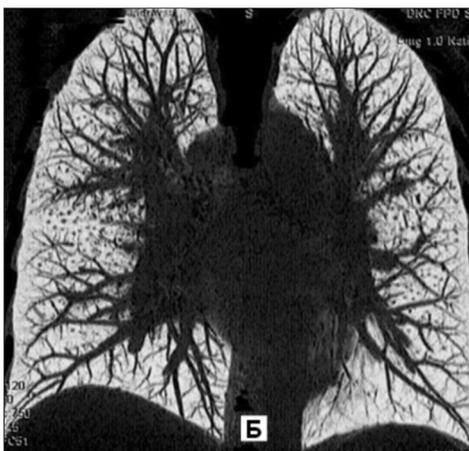
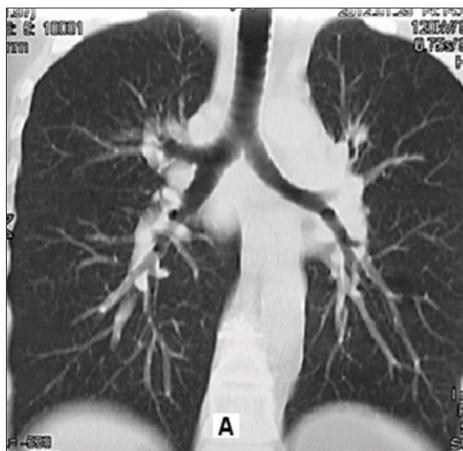


Рис. 3. Саркоидоз с поражением легочной ткани и ВГЛУ. Диагноз при направлении был саркоидоз только ВГЛУ (I ст.) без легочных поражений. А – MIP в коронарной проекции, трахеобронхиальный срез. Б – реконструкция Inv. MIP, выявляется мелкоочаговая диссеминация, невидимая при MIP.

Эффективность MIP в диагностике заболеваний органов дыхания отмечена во многих работах [34, 43, 45, 48, 49, 52]. Так, F.Kilburn-Toppin et al. [49] на основании проведенных исследований и своего опыта пришли к выводу, что изображения с максимальной интенсивностью могут быть полезны для того, чтобы отличать небольшие легочные очаги от соседних сосудов. Авторы провели оригинальное исследование, целью которого было оценить преимущества аксиальных изображений MIP над традиционными КТ-изображениями. Три специалиста радиолога независимо оценивали 2-х миллиметровые аксиальные и 10-миллиметровые наборы изображений с MIP, фиксировали количество очагов, размер и местоположение, общее время и уверенность в диагностике. В целом радиологи записали значительно больше очагов на изображениях MIP – 228 против 174 ($p < 0,05$), улучшая чувствительность с 67 до 77,5% ($p < 0,05$), но с более низким положительным прогностическим значением – 96 против 85% ($p < 0,005$). Анализ MIP-изображений занимал значительно меньше времени для чтения, чем при традиционных КТ-исследованиях ($71,6 \pm 43,7$ с против $92,9 \pm 48,7$ с).

Использование 10-миллиметровых аксиальных изображений MIP для обнаружения узелков в грудной клетке повышает диагностическую эффективность, улучшает чувствительность и сокращает время чтения по сравнению с обычными аксиальными тонкосрезовыми изображениями. Аксиальные MIP и изображения аксиального первоисточника комплементарны при обнаружении торакальных узелков.

E.J.Inarejos Clemente et al. [43], с целью изучения возможности MIP в обнаружении и дифференциации

анатомического строения легочных узлов и/или артериовенозных мальформаций, выполнили анализ результатов МСКТ у 39 детей с наследственной геморрагической телеангиэктазией. Два рентгенолога независимо друг от друга провели сопоставление эффективности стандартных (2,5 мм) и MIP при выполнении МСКТ у этой категории больных. Изучались: количество уплотнений, дифференциация сосудов (обнаружение питающей артерии артериовенозных мальформаций и дренирующей вены) как на обычных снимках, так и MIP. Скоростные показатели при выполнении этих реконструкций были сопоставимы: обнаружение узелков (стандартные – 62, MIP – 86); обнаружение питающей артерии и дренирующей вены (стандартные – 13, MIP – 23). Никакие другие параметры данных не достигали статистической значимости.

Мы в повседневной практической работе для рутинного анализа МСКТ-изображений органов дыхания используем так называемую проекцию средней интенсивности «Average» (англ. Average Intensity Projection, AIP). Эта проекция используется, если толщина MIP достаточно большая, чтобы включить весь объем просканированных тканей. В AIP все воксели объема суммируются, а получаемое изображение напоминает цифровую рентгенограмму.

Трехмерный рендеринг. Как уже нами указывалось, аксиальные КТ-изображения и получаемые из них MIP являются двухмерными. Отличием 3D-изображений от 2D является не только появление третьего измерения – глубины, но и возможность осмотреть 3D-модель со всех сторон либо заглянуть внутрь нее. Для описания процесса получения и визуализации трех-

мерных объектов в компьютерной графике и медицине применяют термин «трехмерный рендеринг» (от англ. rendering – представление, изображение, передача). 3D-рендеринг использует специальные компьютерные алгоритмы для трансформации 2D-изображений в реалистичное объемное представление объекта – его виртуальную модель. В этом отношении КТ-визуализация не отстает от современных компьютерных технологий виртуальной реальности, наглядным примером чего является виртуальная бронхоскопия.

Общим недостатком 3D-реконструкций является ненадежность, а порой и невозможность измерения в трехмерном пространстве плотностей и расстояний, поскольку алгоритм рендеринга оказывает существенное влияние на способ представления и пространственные взаимоотношения структур. Еще один недостаток – операторозависимость 3D-изображений, являющихся

результатом работы конкретного человека. В процессе обработки может быть потеряна часть важной диагностической информации, либо создано ложное впечатление об определенных свойствах объектов. Поэтому 3D-изображения в большинстве случаев не предназначены для целей диагностики, их главная цель – наглядное представление информации. Интерпретировать их необходимо с осторожностью и всегда совместно с аксиальными КТ-изображениями [21].

На рисунке 4 представлена иллюстрация на бумажном носителе, дополняющая традиционный протокол МСКТ-исследования больной генерализованной формой саркоидоза с поражением легочной ткани, сочетающимся с подмышечной, бронхопульмональной и медиастинальной лимфаденопатией.

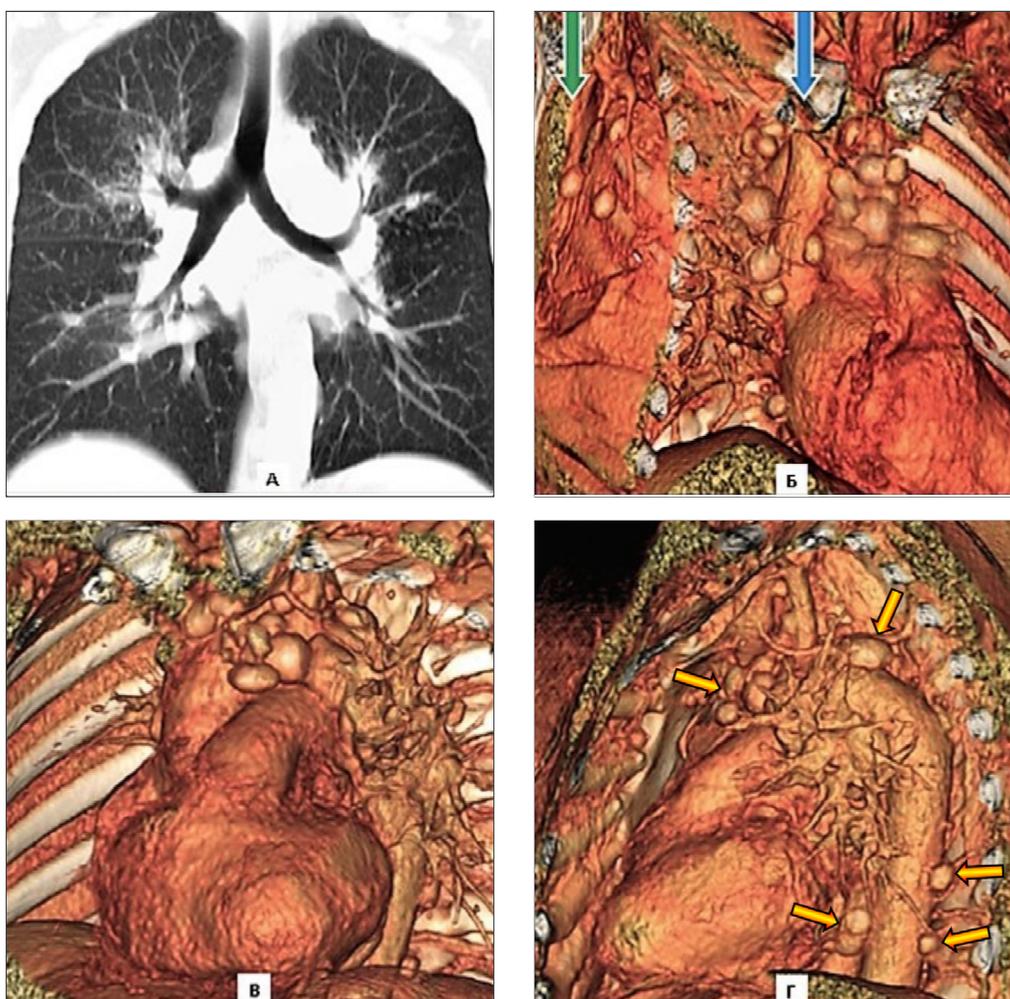


Рис. 4. Иллюстрация к протоколу МСКТ-исследования пациентки Ш., 51 года, больной грудным саркоидозом с поражением легочной ткани, сочетающимся с подмышечной, бронхопульмональной и медиастинальной лимфаденопатией. А – МПР в коронарной проекции (трахеобронхиальный срез): двухсторонняя мелкоочаговая гранулематозная паренхиматозная диссеминация, бронхопульмональная и медиастинальная лимфаденопатия. Б, В, Г – 3D-реконструкция с построением изображения в различных проекциях: Б – в правой косой, В – коронарной, Г – левой косой. Зеленая стрелка обозначает правую подмышечную область, синяя – область средостения, желтые – ВГЛУ.

Данная композиция МСКТ-изображений очень удобна для экспресс-диагностики терапевтом, пульмонологом и другими специалистами, особенно на ам-

булаторном приеме.

При анализе 3D-изображения данной пациентки (рис. 4 б, в, г), в сравнении результатами, полученными

при МПР (рис. 4 а), следует особо отметить подчеркнутость контуров практически всех групп лимфоузлов, что свидетельствует об отсутствии паранодулярной специфической (гранулематозной) инфильтрации, характерной для активной фазы воспалительного процесса. Следовательно, можно особо отметить, что данный симптомокомплекс может быть наиболее важным предиктором оценки адекватности реакции лимфатического аппарата на проводимую патогенетическую терапию.

При использовании объемного рендеринга создается возможность, позиционируя изображение на экране монитора в различных плоскостях и фиксируя наиболее значимые диагностические моменты на различных носителях, проводить количественный, топометрический и морфометрический анализ практически всех групп лимфоузлов. Это очень важно для объективной оценки динамики течения патологических изменений в процессе патогенетической терапии (рис. 5).

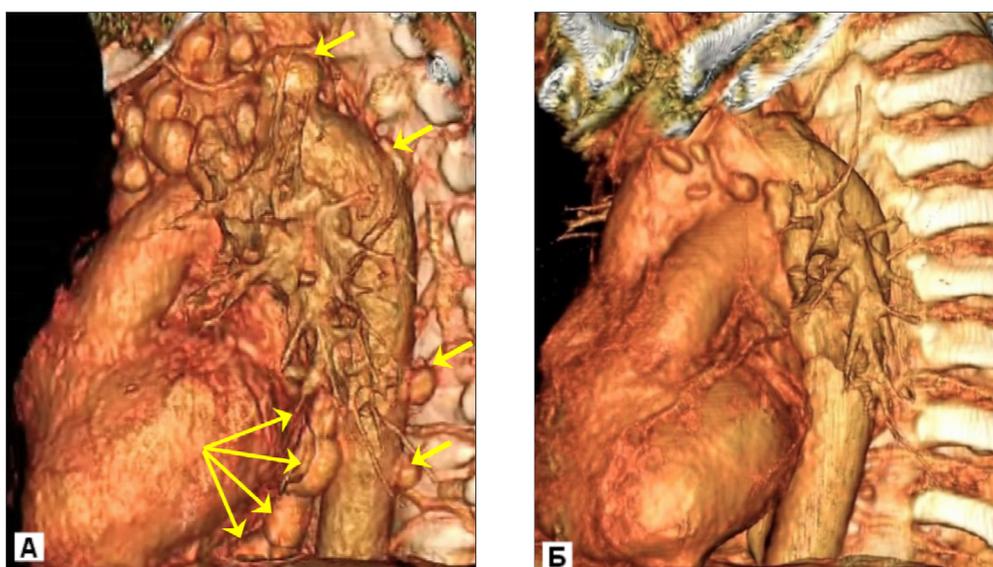


Рис. 5. Саркоидоз ВГЛУ. А – 3D реконструкция в левой косой проекции. В средостении выявляются множественные увеличенные, верхнемедиастинальные, паратрахеальные и парааортальные лимфоузлы, часть из них сливается в конгломераты. Увеличенные парааортальные лимфоузлы обозначены желтыми стрелками. Б – отмечается практически полное лизирование ВГЛУ через 3 мес. после начала лечения ГКС.

3D-реконструкция, на примере данного случая, создает хорошую возможность, помимо выполнения собственно диагностических задач, предоставлять для коллективного обсуждения понятную и доступную имидж-информацию, использовать ее с целью обучения для подготовки специалистов различного профиля.

Виртуальная бронхоскопия. Особое положение занимают наиболее сложные виды постпроцессинга (виртуальная эндоскопия, физиологическая визуализация, компьютерассистированная диагностика), которые относят к так называемым клиническим приложениям (англ. applications) МСКТ.

Виртуальная бронхоскопия (ВБ) предоставляет информацию о внутренней структуре трахеобронхиальной стенки и ее сужении, позволяет увидеть поперечное сечение трахеи и бронхов диаметром до 2-3 мм. Такой вариант информации моделирует взгляд эндоскописта на внутреннюю поверхность дыхательных путей. В этом режиме информация формируется в виде объемного представления в перспективе.

В клиническую практику метод ВБ стал внедряться в 1995-1996 годах [26, 37, 65, 67]. Среди отечественных специалистов наибольший вклад внесли работы П.М. Котлярова и соавторов [5-11]

По данным М.Д. Seemann, С.Д. Claussen [61] ВБ с цветовой кодировкой трахеобронхиального дерева

предлагает практическую альтернативу волоконно-оптической бронхоскопии и особенно перспективна для пациентов, у которых последняя невозможна, противопоказана или отказана. Кроме того, ВБ может быть использована в качестве дополнительной процедуры для волоконно-оптической бронхоскопии при оценке стеноза дыхательных путей и проведения бронхоскопической биопсии, хирургического вмешательства и паллиативной терапии и, вероятно, будет все чаще использоваться в качестве метода скрининга для людей с подозрением на эндобронхиальную злокачественность и в качестве контрольного обследования в послеоперационном лечении больных злокачественными заболеваниями.

П.М.Котляров и соавт. [7] и M.Luo et al. [57] предложили осуществлять комплексный подход к анализу данных, полученных при ВБ и нативной МСКТ, постпроцессинговых переформатирований МПР и 3D-изображений, убедительно показав увеличение диагностической эффективности ВБ в определении распространенности опухолей легкого и планировании хирургического лечения.

Сравнение данных фибробронхоскопии (ФБС) и ВБ показало их совпадение в части оценки макроструктуры просвета бронха, наличия внутриbronхиальных опухолевых масс, их вида и локализации [10, 13, 23,

61].

Для оценки достоверности получаемых стенозирующих изменений просвета дыхательных путей, мы, при наличии выявленных при ВБ изменений, также сопоставляли их с результатами инвазивной ФБС (рис. 6, 7). Определение стеноза трахеобронхиального дерева и места обрыва бронха по данным МСКТ и ФБС прак-

тически было одинаковым. Безусловно, ФБС – ведущий метод диагностики бронхиальной патологии, но учитывая, что ВБ является лишь результатом специальной постпроцессинговой обработки массива данных при выполнении МСКТ, без всяких последствий инвазивного вмешательства, практическое значение данного метода неоспоримо.



Рис. 6. Больная П., 36 лет. Легочно-медиастинальная форма саркоидоза. Двухсторонняя компрессия (стенозирование) увеличенными ВГЛУ промежуточного бронха правого корня. А – МПР в коронарной плоскости. Б – виртуальная бронхоскопия. В – фибробронхоскопия. Визуализация полной идентичности морфологических изменений при ВБ и ФБС.

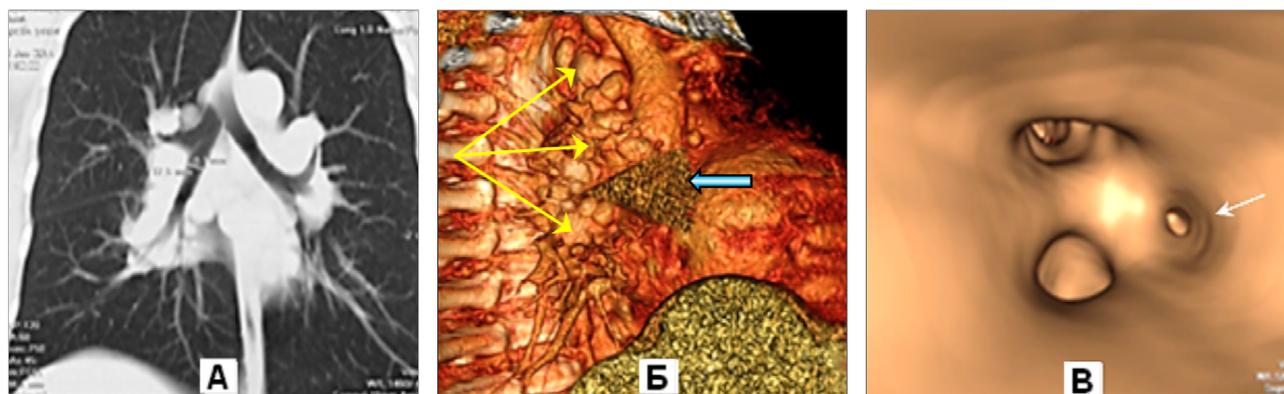


Рис. 7. Больная С., 41 год. Легочно-медиастинальная форма саркоидоза. Компрессия среднедолевого бронха справа увеличенными ВГЛУ (желтые стрелки). Стеноз среднедолевого бронха (белая стрелка). Ателектаз средней доли (синяя стрелка). А – МПР в коронарной плоскости. Б – 3D-реконструкция в правой боковой плоскости. В – виртуальная бронхоскопия.

Заключение

Внедрение в клиническую практику современных МСКТ с базовыми программными продуктами постпроцессинга дает возможность получать многоплоскостной двухмерный и объемный трехмерный массив данных, значительно облегчающих диагностику заболеваний легких и, в частности, патологии ВГЛУ.

В результате объемного рендеринга моделируется виртуальная бронхоскопия с возможностью исследования внутренней поверхности трахеобронхиальной системы, которая дополняется различными методами реконструкции (МПР, МIP и MinIP).

Следствием технического совершенствования КТ-оборудования, МСКТ по своим мультипланарным свойствам сравнялась с МРТ, а мультипланарный просмотр КТ изображений становится обычным делом в ряде отделений лучевой диагностики. Постпроцессинг изображений расширяет возможности МСКТ-диагностики и визуального представления информации для научных исследований учебных презентаций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Даденко П.В., Гомболевский В.А., Щербихина Е.В., Темирханов З.С., Котляров П.М. Роль компьютерной томографии в диагностической оценке лечения лимфомы Ходжкина // Вестник Российского научного центра рентгенорадиологии Минздрава России. 2012. Т.2, №12. С.4.
2. Zonneveld F.W., Prokop M. Постпроцессинг изображений в эру мультисрезовой компьютерной томографии // Медицинская визуализация. 2004. №4. С.137–144.
3. Календер В. Компьютерная томография: основы, техника, качество изображений и области клинического использования. М.: Техносфера, 2006. 344 с.
4. Королюк И.П. Медицинское изображение как основа медицинской визуализации (лекция) // Медицинская визуализация. 2012. №5. С.113–125.
5. Котляров П.М. Мультисрезовая КТ – новый этап развития лучевой диагностики заболеваний легких // Медицинская визуализация. 2011. №4. С.14–20.

6. Котляров П.М., Темирганов З.С., Щербихина Е.В. Мультипланарные реконструкции и виртуальная бронхоскопия в оценке состояния трахеобронхиальной системы по данным мультисрезовой компьютерной томографии // Лучевая диагностика и терапия. 2011. №2. С.50–55.
7. Котляров П.М., Нуднов Н.В., Егорова Е.В. Мультиспиральная компьютерно-томографическая виртуальная бронхоскопия при бронхоэктатической болезни и остеохондропластической бронхопатии // Пульмонология. 2014. №4. С.64–68. doi: <http://dx.doi.org/10.18093/0869-0189-2014-0-4-64-68>
8. Котляров П.М. Виртуальная бронхоскопия в диагностике рака легкого // Лучевая диагностика и терапия. 2015. №1. С.56–63. doi:10.22328/2079-5343-2015-1-56-63
9. Котляров П.М., Нуднов Н.В. Мультиспиральная компьютерная томография, постпроцессинговая обработка и виртуальная бронхоскопия в диагностике бронхоэктатической болезни и ее осложнений // Высотехнологическая медицина. 2015. Т.2, №2. С.14–19.
10. Котляров П.М. Виртуальная бронхоскопия мультиспиральной компьютерной томографии в диагностике опухолевых поражений трахеобронхиальной системы // Медицинская визуализация. 2016. №5. С.18–28.
11. Котляров П.М., Овчинников В.И., Сергеев Н.И. Виртуальная бронхоскопия в диагностике заболеваний легких и трахеобронхиальной системы (обзор литературы) // Вестник Российского научного центра рентгенодиагностики Минздрава России. 2017. Т.17, №1. С.4.
12. Красильников Н.Н. Цифровая обработка 2D- и 3D-изображений: учебное пособие. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 608 с.
13. Матвеева А.В. Трехмерные реконструкции данных в томографии // Альманах современной науки и образования. 2014. №11. С.95–97.
14. Сдвижков А.М., Юдин А.Л., Кожанов Л.Г., Сологубова Г.Ф., Кулагин А.Л. Мультиспиральная компьютерная томография с трехмерным моделированием в диагностике и лечении онкологических больных // Вестник Московского онкологического общества. 2009. №3. С.1–4.
15. Симонов Е.Н., Аврамов Д.В., Аврамов М.В. Метод объемного рендеринга для визуализации трехмерных данных в рентгеновской компьютерной томографии // Вестник ЮУрГУ. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2016. Т.16, №4. С.5–12. doi: 10.14529/ctcr160401
16. Солодкий В. А., Котляров П. М., Щербихина Е.В., Егорова Е.В., Шадури Е.В. Роль мультипланарных реконструкций при постпроцессинговой обработке изображений в диагностике очаговых образований легких // Медицинская визуализация. 2010. №2. С.81–87.
17. Тюрин И.Е., Евграфова С.Ю. Дифференциальная диагностика новообразований средостения // Практическая пульмонология. 2010. №4. С.16–22.
18. Тюрин И.Е. Новые горизонты торакальной радиологии // Поликлиника. 2013. №5-1. С.12–17.
19. Федоров В.Д., Кармазановский Г.Г., Цвиркун В.В., Гузеева Е.Б., Буриев И.М. Новые возможности спиральной компьютерной томографии – виртуальная хирургия // Медицинская визуализация. 2000. №2. С.15–18.
20. Хомутова Е.Ю., Игнатъев Ю.Т., Скрипкин Д.А., Филиппова Ю.Г. Виртуальная колоноскопия: методика проведения // Радиология-практика. 2009. №2. С.21–27.
21. Хоружик С.А., Михайлов А.Н. Основы КТ-визуализации. Часть 1. Просмотр и количественная оценка изображений // Радиология-практика. 2011. №3. С.53–61.
22. Akiba T. Utility of three-dimensional computed tomography in general thoracic surgery // Gen. Thorac. Cardiovasc. Surg. 2013. Vol.61, №12. P.676–684.
23. Aliannejad R. Comment on «Comparison of virtual bronchoscopy to fiber-optic bronchoscopy for assessment of inhalation injury severity» // Burns. 2015. Vol.41, №7. P.1613–1615.
24. Arakawa H., Sasaka K., Lu W.M., Hirayanagi N., Nakajima Y. Comparison of axial high-resolution CT and thin-section multiplanar reformation (MPR) for diagnosis of diseases of the pulmonary parenchyma: preliminary study in 49 patients // J. Thorac. Imaging. 2004. Vol.19, №1. P.24–31.
25. Bai T., Yan H., Jia X., Jiang S., Wang G., Mou X. Z-Index Parameterization (ZIP) for Volumetric CT Image Reconstruction via 3D Dictionary Learning // IEEE Trans. Med. Imaging. 2017. doi: 10.1109/TMI.2017.2759819
26. Buthiau D., Antoine E., Piette J.C., Nizri D., Baldeyrou P., Khayat D. Virtual tracheo-bronchial endoscopy: educational and diagnostic value // Surg. Radiol. Anat. 1996. Vol.18, №2. P.125–131.
27. Calhoun P. S., Kuszyk B. S., Heath D.G., Carley J.C., Fishman E.K. Three-dimensional volume rendering of spiral CT data: theory and method // Radiographics. 1999. Vol.19, №3. P.745–764.
28. Camargo J.J., Irion K.L., Marchiori E., Hochegger B., Porto N.S., Moraes B.G., Meyer G., Caramori M., Holemans J.A. Computed tomography measurement of lung volume in preoperative assessment for living donor lung transplantation: volume calculation using 3D surface rendering in the determination of size compatibility // Pediatr. Transplant. 2009. Vol.13, №4. P.429–439.
29. Chen Y., Liu J., Hu Y., Yang J., Shi L., Shu H., Gui Z., Coatrieux G., Luo L. Discriminative feature representation: an effective postprocessing solution to low dose CT imaging // Phys. Med. Biol. 2017. Vol.62, №6. P.2103–2131.
30. Cody D.D. AAPM/RSNA physics tutorial for residents: topics in CT. Image processing in CT // Radiographics. 2002. Vol.22, №5. P.1255–1268.
31. Dappa E., Higashigaito K., Fornaro J., Leschka S., Wildermuth S., Alkadhi H. Cinematic rendering – an alternative to volume rendering for 3D computed tomography imaging // Insights Imaging. 2016. Vol.7, №6. P.849–856.

32. De Filippo M., Onniboni M., Rusca M., Carbognani P., Ferrari L., Guazzi A., Casalini A., Verardo E., Cataldi V., Tiseo M., Sverzellati N., Chiari G., Rabaiotti E., Corsi A., Cacciani G., Sommario M., Ardizzoni A., Zompatori M. Advantages of multidetector-row CT with multiplanar reformation in guiding percutaneous lung biopsies // *Radiol. Med.* 2008. Vol.113, №7. P.945–953.
33. Duong P.A., Ferson P.F., Fuhrman C.R., McCurry K.R., Lacomis J.M. 3D-multidetector CT angiography in the evaluation of potential donors for living donor lung transplantation // *J. Thorac. Imaging.* 2005. Vol.20, №1. P.17–23.
34. Ebner L., Roos J.E., Christensen J.D., Dobrocky T., Leidolt L., Brela B., Obmann V.C., Joy S., Huber A., Christe A. Maximum-intensity-projection and computer-aided-detection algorithms as stand-alone reader devices in lung cancer screening using different dose levels and reconstruction kernels // *Am. J. Roentgenol.* 2016. Vol.207, №2. P.282–288.
35. Eibel R., Türk T., Kulinna C., Schöpf U.J., Brüning R., Reiser M.F. Value of multiplanar reformations (MPR) in multi-slice spiral CT of the lung // *RoFo.* 2001. Vol.173, №1. P.57–64.
36. Eid M., De Cecco C.N., Nance J.W., Caruso D., Albrecht M.H., Spandorfer A.J., De Santis D., Varga-Szemes A., choepf U.J. Cinematic rendering in CT: A Novel, Life-like 3D visualization technique // *Am. J. Roentgenol.* 2017. Vol.209, №2. P.370–379.
37. Ferretti G., Knoplioch J., Coulomb M., Brambilla C., Cinquin P. Endoluminal 3D reconstruction of the tracheo-bronchial tree (virtual bronchoscopy) // *J. Radiol.* 1995. Vol.76, №8. P.531–534.
38. Ganeshan B., Miles K.A., Young R.C., Chatwin C.R. Three-dimensional selective-scale texture analysis of computed tomography pulmonary angiograms // *Invest. Radiol.* 2008. Vol.43, №6. P.382–94.
39. Goldin J.G., Brown M. S., Petkovska I. Computer-aided diagnosis in lung nodule assessment // *J. Thorac. Imaging.* 2008. Vol.23, №2. P.97–104.
40. Govsa F., Ozer M.A., Sirinturk S., Eraslan C., Alagoz A.K. Creating vascular models by postprocessing computed tomography angiography images: a guide for anatomical education // *Surg. Radiol. Anat.* 2017. doi: 10.1007/s00276-017-1822-2
41. Hemminger B.M., Molina P.L., Egan T.M., Detterbeck F.C., Muller K.E., Coffey C.S., Lee J.K. Assessment of real-time 3D visualization for cardiothoracic diagnostic evaluation and surgery planning // *J. Digit Imaging.* 2005. Vol.18, №2. P.145–153.
42. Honda O., Takenaka D., Matsuki M., Koyama M., Tomiyama N., Murata K., Murayama S., Noma S., Moriya H., Ohno Y. Image quality of 320-detector row wide-volume computed tomography with diffuse lung diseases: comparison with 64-detector row helical CT // *J. Comput. Assist. Tomogr.* 2012. Vol.36, №5. P.505–511.
43. Inarejos Clemente E.J., Ratjen F., Manson D.E. Utility of MDCT MIP postprocessing reconstruction images in children with hereditary hemorrhagic telangiectasia // *J. Comput. Assist. Tomogr.* 2016. Vol.40, №3. P.375–379.
44. Jacob J., Bartholmai B.J., Rajagopalan S., Kokosi M., Nair A., Karwoski R., Raghunath S.M., Walsh S.L., Wells A.U., Hansell D.M. Automated quantitative computed tomography versus visual computed tomography scoring in idiopathic pulmonary fibrosis: validation against pulmonary function // *Thorac. Imaging.* 2016. Vol.31, №5. P.304–311.
45. Jensen C.T., Vicens-Rodriguez R.A., Wagner-Bartak N.A., Fox P.S., Faria S.C., Carrion I., Qayyum A., Tamm E.P. Multidetector CT detection of peritoneal metastases: evaluation of sensitivity between standard 2.5 mm axial imaging and maximum-intensity-projection (MIP) reconstructions // *Abdom. Imaging.* 2015. Vol.40, №7. P.2167–2172.
46. Johnson P.T., Schneider R., Lugo-Fagundo C., Johnson M.B., Fishman E.K. MDCT Angiography with 3D rendering: a novel cinematic rendering algorithm for enhanced anatomic detail // *Am. J. Roentgenol.* 2017. Vol.209, №2. P.309–312.
47. Kato S., Nambu A., Saito A., Araki T. Detectability of lesions in multiplanar reformation (MPR) of the lung // *Nihon Igaku Hoshasen Gakkai Zasshi.* 2005. Vol.65, №4. P.378–383.
48. Kawel N., Seifert B., Luetolf M., Boehm T. Effect of slab thickness on the CT detection of pulmonary nodules: use of sliding thin-slab maximum intensity projection and volume rendering // *Am. J. Roentgenol.* 2009. Vol.192, №5. P.1324–1329.
49. Kilburn-Toppin F., Arthurs O.J., Tasker A.D., Set P.A. Detection of pulmonary nodules at paediatric CT: maximum intensity projections and axial source images are complementary // *Pediatr. Radiol.* 2013. Vol.43, №7. P.820–826.
50. Kim Y., Kim Y.K., Lee B.E., Lee S.J., Ryu Y.J., Lee J.H., Chang J.H. Ultra-low-dose CT of the thorax using iterative reconstruction: evaluation of image quality and radiation dose reduction // *Am. J. Roentgenol.* 2015. Vol.204, №6. P.1197–1202.
51. Kusk M.W., Karstoft J., Mussmann B.R. CT triage for lung malignancy: coronal multiplanar reformation versus images in three orthogonal planes // *Acta Radiol.* 2015. Vol.56, №11. P.1336–1341.
52. Kwon O., Kang S.T., Kim S.H., Kim Y.H., Shin Y.G. Maximum intensity projection using bidirectional compositing with block skipping // *J. Xray Sci. Technol.* 2015. Vol.23, №1. P.33–44.
53. Lawler L.P., Fishman E.K. Multi-detector row CT of thoracic disease with emphasis on 3D volume rendering and CT angiography // *Radiographics.* 2001. Vol.21, №5. P.1257–1273.
54. Lee T., Park J.Y., Lee H.Y., Lim H.J., Park J.S., Cho Y.J., Kim T.J., Lee K.W., Lee J.H., Lee C.T., Yoon H.I. Bronchial angles are associated with nodular bronchiectatic non-tuberculous mycobacteria lung disease // *Int. J. Tuberc. Lung Dis.* 2017. Vol.21, №10. P.1169–1175.
55. Li W., Zhang C.Q., Li A.Y., Deng K., Shi H. Preliminary study of dose reduction and image quality of adult pelvic low-dose CT scan with adaptive statistical iterative reconstruction // *Acta Radiol.* 2015. Vol.56, №10. P.1222–

1229.

56. Luccichenti G., Cademartiri F., Pezzella F.R., Runza G., Belgrano M., Midiri M., Sabatini U., Bastianello S., Krestin G.P. 3D reconstruction techniques made easy: know-how and pictures // *Eur. Radiol.* 2005. Vol.15. №10. P.2146–2156.

57. Luo M., Duan C., Qiu J., Li W., Zhu D., Cai W. Diagnostic value of multidetector CT and its multiplanar reformation, volume rendering and virtual bronchoscopy postprocessing techniques for primary trachea and main bronchus tumors // *PLoS One.* 2015. Vol.10, №9. doi: 10.1371/journal.pone.0137329

58. Mahmut M., Nishitani H. Evaluation of pulmonary lobe variations using multidetector row computed tomography // *J. Comput. Assist. Tomogr.* 2007. Vol.31, №6. P.956–960.

59. Masutani Y., MacMahon H., Doi K. Automated segmentation and visualization of the pulmonary vascular tree in spiral CT angiography: an anatomy-oriented approach based on three-dimensional image analysis // *J. Comput. Assist. Tomogr.* 2001. Vol.25, №4. P.587–597.

60. Rowe S.P., Johnson P.T., Fishman E.K. Initial experience with cinematic rendering for chest cardiovascular imaging // *Br. J. Radiol.* 2017. doi: 10.1259/bjr.20170558

61. Seemann M.D., Claussen C.D. Hybrid 3D visualization of the chest and virtual endoscopy of the tracheo-bronchial system: possibilities and limitations of clinical application // *Lung Cancer.* 2001. Vol.32, №3. P.237–246.

62. Seemann M.D., Gebicke K., Luboldt W., Albes J.M., Vollmar J., Schäfer J.F., Beinert T., Englmeier K.H., Bitzer M., Claussen C.D. Hybrid 3-D rendering of the thorax and surface-based virtual bronchoscopy in surgical and interventional therapy control // *RoFo.* 2001. Vol.173, №7. P.650–657.

63. Seizeur R., Gérard R., Marion J., Lefèvre C., Nonent M., Forlodou P., Sénécaïl B. Anatomic study and CT angiography with 3D reconstructions of the pulmonary arterial tree // *Morphologie.* 2010. Vol.94, №306. P.45–50.

64. Spagnolo P., Sverzellati N., Wells A.U., Hansell D.M. Imaging aspects of the diagnosis of sarcoidosis // *Eur. Radiol.* 2014. Vol.24, №4. P.807–816.

65. Summers R.M., Feng D.H., Holland S.M., Sneller M.C., Shelhamer J.H. Virtual bronchoscopy: segmentation method for real-time display // *Radiology.* 1996. Vol.200, №3. P.857–862.

66. Suzuki M., Matsui O., Kawashima H., Takemura A., Matsubara K., Hayashi N., Koda W., Shibata Y. Radioanatomical study of a true tracheal bronchus using multidetector computed tomography // *Jpn. J. Radiol.* 2010. Vol.28, №3. P.188–192.

67. Vining D.J., Liu K., Choplin R.H., Haponik E.F. Virtual bronchoscopy. Relationships of virtual reality endobronchial simulations to actual bronchoscopic findings // *Chest.* 1996. Vol.109, №2. P.549–553.

68. Wessendorf T.E., Bonella F., Costabel U. Diagnosis of Sarcoidosis // *Clin. Rev. Allergy Immunol.* 2015. Vol.49, №1. P.54–62.

69. Xiang Z., Ai Z., Zhong G., Deng Y., Malhi H., Palmer S., Zee C. Diagnostic value of using multiplanar

reformation images: Case report for rare endotracheal hamartomas // *Medicine (Baltimore).* 2017. Vol.96, №40. e8231.

70. Zappala C.J., Desai S.R., Copley S.J., Spagnolo P., Sen D., Alam S.M., du Bois R.M., Hansell D.M., Wells A.U. Accuracy of individual variables in the monitoring of long-term change in pulmonary sarcoidosis as judged by serial high-resolution CT scan data // *Chest.* 2014. Vol.145, №1. P.101–107.

71. Zhang S.X., Liu Y. Computer-based three-dimensional reconstruction of lung cancer using 64-slice CT scanning data and virtual surgery // *Nan Fang Yi Ke Da Xue Xue Bao.* 2016. Vol.36, №4. P.562–566.

REFERENCES

1. Datsenko P.V., Gombolevskiy V.A., Shcherbakhina E.V., Temirkhanov Z.S., Kotlyarov P.M. Role of CT in a diagnostic assessment of treatment for Hodgkin's lymphoma. *Vestnik Rossiyskogo nauchnogo tsentra rentgenoradiologii Minzdrava Rossii* 2012; 2(12):4 (in Russian).

2. Zonneveld F.W., Prokop M. Image post-processing in the age of multislice CT. *Meditsinskaya vizualizatsiya* 2004; 4:137–144 (in Russian).

3. Kalender V. Computed tomography: basics, techniques, image quality, and areas of clinical use. Moscow: Technosphere; 2006 (in Russian).

4. Korolyuk I.P. Medical imaging is as the basis of medical visualization (lecture). *Meditsinskaya vizualizatsiya* 2012; 5:113–125 (in Russian).

5. Kotlyarov P.M. Multislice computer tomography – new stage of development of radiology diagnostic of diseases of lungs. *Meditsinskaya vizualizatsiya* 2011; 4:14–20 (in Russian).

6. Kotlyarov P. M., Temirchanov Z. S., Shcherbachina E. V. Multiplanar reconstruction and virtual bronchoscopi in an assessment of a condition trachea bronchial system according to multislice computer tomography. *Luchevaya diagnostika i terapiya* 2011; 2:50–55 (in Russian).

7. Kotlyarov P.M., Nudnov N.V., Egorova E.V. Multidetector computed tomography with virtual bronchoscopy in patients with bronchiectasis or osteochondroplastic tracheobronchopathy. *Russian Pulmonology* 2014; (4):64–68 (in Russian). doi:10.18093/0869-0189-2014-0-4-64-68

8. Kotlyarov P.M. Virtual bronchoscopy in the diagnosis of lung cancer. *Diagnostic radiology and radiotherapy* 2015; (1):56–63 (in Russian). doi:10.22328/2079-5343-2015-1-56-63

9. Kotlyarov P.M., Nudnov N.V. Multislice computed tomography, postprocessing and virtual bronchoscopy in the diagnosis of bronchiectasis and its complications. *Vysokotekhnologicheskaya meditsina* 2015; 2(2):14–19 (in Russian).

10. Kotlyarov P.M. Virtual Bronchoscopy Multislice Computed Tomography in Diagnostics of Neoplastic Lesions of the Tracheobronchial Systems. *Meditsinskaya vizualizatsiya* 2016; 5:18–28 (in Russian).

11. Kotlyarov P.M., Ovchinnikov V. I., Sergeev N. I. Virtual bronchoscopy in the diagnosis of diseases of the lungs and tracheobronchial system (literature review). *Vest-*

nik Rossiyskogo nauchnogo tsentra rentgenoradiologii Minzdrava Rossii 2017; 17(1):4 (in Russian).

12. Krasil'nikov N.N. Digital processing of 2D and 3D images. St. Petersburg: BHV-Peterburg; 2011 (in Russian).

13. Matveeva A.V. Three-dimensional reconstructions of tomographic data. *Al'manakh sovremennoy nauki i obrazovaniya* 2014; 11:95–97 (in Russian).

14. Sdvijkov A.M., Yudin A.L., Kojanov L.G., Sologubova G.F., Kulagin A.L. The use of multispiral computerized tomography in current clinical oncologists' practice. *Vestnik Moskovskogo onkologicheskogo obshchestva* 2009; 3:1–4 (in Russian).

15. Simonov E.N., Avramov D.V., Avramov M.V. Method of volume rendering for visualization three-dimensional data in X-ray computed tomography. *Vestnik Yu-UrGU. Seriya: Komp'yuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika* 2016; 16(4):5–12 (in Russian). doi: 10.14529/ctcr160401

16. Solodky V.A., Kotljarov P.M., Shcherbahina E.V., Egorova E.V., Shaduri E.V. Role of Multiplanar Reconstruction at Postprocessings of Images in Diagnostics Solitary Pulmonary Nodules. *Meditinskaya vizualizatsiya* 2010; 2:81–87 (in Russian).

17. Tyurin I.E., Evgrafova S.Yu. Differential diagnosis of mediastinal tumors. *Prakticheskaya pul'monologiya* 2010; 4:16–22 (in Russian).

18. Tyurin I.E. New Horizons of Thoracic Radiology. *Poliklinika* 2013; 5-1:12–17 (in Russian).

19. Fedorov V. D., Karmazanovskiy G.G., Tsvirkun V.V., Guzeeva E.B., Buriev I.M. New possibilities of spiral computed tomography - virtual surgery. *Meditinskaya vizualizatsiya* 2000; 2:15–18 (in Russian).

20. Khomutova E. Yu., Ignat'ev Yu. T., Skripkin D.A. Filippova Yu.G. Virtual colonoscopy: methodology. *Radiologiya-praktika* 2009; 2:21–27 (in Russian).

21. Kharuzhik S.A., Mikhailov A. N. Fundamentals of CT visualization. Part 1. Images viewing and quantification. *Radiologiya-praktika* 2011; 3:53–61 (in Russian).

22. Akiba T. Utility of three-dimensional computed tomography in general thoracic surgery. *Gen. Thorac. Cardiovasc. Surg.* 2013; 61(12):676–684.

23. Aliannejad R. Comment on «Comparison of virtual bronchoscopy to fiber-optic bronchoscopy for assessment of inhalation injury severity». *Burns* 2015; 41(7):1613–1615.

24. Arakawa H., Sasaka K., Lu W.M., Hirayanagi N., Nakajima Y. Comparison of axial high-resolution CT and thin-section multiplanar reformation (MPR) for diagnosis of diseases of the pulmonary parenchyma: preliminary study in 49 patients. *J. Thorac. Imaging* 2004; 19(1):24–31.

25. Bai T., Yan H., Jia X., Jiang S., Wang G., Mou X. Z-Index parameterization (ZIP) for volumetric CT image reconstruction via 3D dictionary learning. *IEEE Trans. Med. Imaging* 2017;

26. Buthiau D., Antoine E., Piette J.C., Nizri D., Baldeyrou P., Khayat D. Virtual tracheo-bronchial endoscopy: educational and diagnostic value. *Surg. Radiol. Anat.* 1996; 18(2):125–131.

27. Calhoun P. S., Kuszyk B. S., Heath D.G., Carley J.C., Fishman E.K. Three-dimensional volume rendering of spiral CT data: theory and method. *Radiographics* 1999; 19(3):745–764.

28. Camargo J.J., Irion K.L., Marchiori E., Hochegger B., Porto N.S., Moraes B.G., Meyer G., Caramori M., Holemans J.A. Computed tomography measurement of lung volume in preoperative assessment for living donor lung transplantation: volume calculation using 3D surface rendering in the determination of size compatibility. *Pediatr. Transplant.* 2009; 13(4):429–439.

29. Chen Y., Liu J., Hu Y., Yang J., Shi L., Shu H., Gui Z., Coatrieux G., Luo L. Discriminative feature representation: an effective postprocessing solution to low dose CT imaging. *Phys. Med. Biol.* 2017; 62(6):2103–2131.

30. Cody D.D. AAPM/RSNA physics tutorial for residents: topics in CT. Image processing in CT. *Radiographics* 2002; 22(5):1255–1268.

31. Dappa E., Higashigaito K., Fornaro J., Leschka S., Wildermuth S., Alkadhi H. Cinematic rendering – an alternative to volume rendering for 3D computed tomography imaging. *Insights Imaging* 2016; 7(6):849–856.

32. De Filippo M., Onniboni M., Rusca M., Carbognani P., Ferrari L., Guazzi A., Casalini A., Verardo E., Cataldi V., Tiseo M., Sverzellati N., Chiari G., Rabaiotti E., Corsi A., Cacciani G., Sommario M., Ardizzoni A., Zompatori M. Advantages of multidetector-row CT with multiplanar reformation in guiding percutaneous lung biopsies. *Radiol. Med.* 2008; 113(7):945–953.

33. Duong P.A., Ferson P.F., Fuhrman C.R., McCurry K.R., Lacomis J.M. 3D-multidetector CT angiography in the evaluation of potential donors for living donor lung transplantation. *J. Thorac. Imaging* 2005; 20(1):17–23.

34. Ebner L., Roos J.E., Christensen J.D., Dobrocky T., Leidolt L., Brelva B., Obmann V.C., Joy S., Huber A., Christe A. Maximum-intensity-projection and computer-aided-detection algorithms as stand-alone reader devices in lung cancer screening using different dose levels and reconstruction kernels. *Am. J. Roentgenol.* 2016; 207(2):282–288.

35. Eibel R., Türk T., Kulinna C., Schöpf U.J., Brüning R., Reiser M.F. Value of multiplanar reformations (MPR) in multi-slice spiral CT of the lung. *RoFo* 2001; 173(1):57–64.

36. Eid M., De Cecco C.N., Nance J.W., Caruso D., Albrecht M.H., Spandorfer A.J., De Santis D., Varga-Szemes A., choepf U.J. Cinematic rendering in CT: a novel, lifelike 3D visualization technique. *Am. J. Roentgenol.* 2017; 209(2):370–379.

37. Ferretti G., Knoplioch J., Coulomb M., Brambilla C., Cinquin P. Endoluminal 3D reconstruction of the tracheo-bronchial tree (virtual bronchoscopy). *J. Radiol.* 1995; 76(8):531–534.

38. Ganeshan B., Miles K.A., Young R.C., Chatwin C.R. Three-dimensional selective-scale texture analysis of computed tomography pulmonary angiograms. *Invest. Radiol.* 2008; 43(6):382–394.

39. Goldin J.G., Brown M. S., Petkovska I. Computer-aided diagnosis in lung nodule assessment. *J. Thorac. Im-*

aging. 2008; 23(2):97–104.

40. Govsa F., Ozer M.A., Sirinturk S., Eraslan C., Alagoz A.K. Creating vascular models by postprocessing computed tomography angiography images: a guide for anatomical education. *Surg. Radiol. Anat.* 2017. doi: 10.1007/s00276-017-1822-2

41. Hemminger B.M., Molina P.L., Egan T.M., Detterbeck F.C., Muller K.E., Coffey C.S., Lee J.K. Assessment of real-time 3D visualization for cardiothoracic diagnostic evaluation and surgery planning. *J. Digit. Imaging.* 2005; 18(2):145–153.

42. Honda O., Takenaka D., Matsuki M., Koyama M., Tomiyama N., Murata K., Murayama S., Noma S., Moriya H., Ohno Y. Image quality of 320-detector row wide-volume computed tomography with diffuse lung diseases: comparison with 64-detector row helical CT. *J. Comput. Assist. Tomogr.* 2012; 36(5):505–511.

43. Inarejos Clemente E.J., Ratjen F., Manson D.E. Utility of MDCT MIP postprocessing reconstruction images in children with hereditary hemorrhagic telangiectasia. *J. Comput. Assist. Tomogr.* 2016; 40(3):375–379.

44. Jacob J., Bartholmai B.J., Rajagopalan S., Kokosi M., Nair A., Karwoski R., Raghunath S.M., Walsh S.L., Wells A.U., Hansell D.M. Automated quantitative computed tomography versus visual computed tomography scoring in idiopathic pulmonary fibrosis: validation against pulmonary function. *Thorac. Imaging* 2016; 31(5):304–311.

45. Jensen C.T., Vicens-Rodriguez R.A., Wagner-Bartak N.A., Fox P.S., Faria S.C., Carrion I., Qayyum A., Tamm E.P. Multidetector CT detection of peritoneal metastases: evaluation of sensitivity between standard 2.5 mm axial imaging and maximum-intensity-projection (MIP) reconstructions. *Abdom. Imaging* 2015; 40(7):2167–2172.

46. Johnson P.T., Schneider R., Lugo-Fagundo C., Johnson M.B., Fishman E.K. MDCT angiography with 3D rendering: a novel cinematic rendering algorithm for enhanced anatomic detail. *Am. J. Roentgenol.* 2017; 209(2):309–312.

47. Kato S., Nambu A., Saito A., Araki T. Detectability of lesions in multiplanar reformation (MPR) of the lung. *Nihon Igaku Hoshasen Gakkai Zasshi* 2005; 65(4):378–383.

48. Kawel N., Seifert B., Luetolf M., Boehm T. Effect of slab thickness on the CT detection of pulmonary nodules: use of sliding thin-slab maximum intensity projection and volume rendering. *Am. J. Roentgenol.* 2009; 192(5):1324–1329.

49. Kilburn-Toppin F., Arthurs O.J., Tasker A.D., Set P.A. Detection of pulmonary nodules at paediatric CT: maximum intensity projections and axial source images are complementary. *Pediatr. Radiol.* 2013; 43(7):820–826.

50. Kim Y., Kim Y.K., Lee B.E., Lee S.J., Ryu Y.J., Lee J.H., Chang J.H. Ultra-low-dose CT of the thorax using iterative reconstruction: evaluation of image quality and radiation dose reduction. *Am. J. Roentgenol.* 2015; 204(6):1197–1202.

51. Kusk M.W., Karstoft J., Mussmann B.R. CT triage for lung malignancy: coronal multiplanar reformation ver-

sus images in three orthogonal planes. *Acta Radiol.* 2015; 56(11):1336–1341.

52. Kwon O., Kang S.T., Kim S.H., Kim Y.H., Shin Y.G. Maximum intensity projection using bidirectional compositing with block skipping. *J. Xray Sci. Technol.* 2015; 23(1):33–44.

53. Lawler L.P., Fishman E.K. Multi-detector row CT of thoracic disease with emphasis on 3D volume rendering and CT angiography. *Radiographics* 2001; 21(5):1257–1273.

54. Lee T., Park J.Y., Lee H.Y., Lim H.J., Park J.S., Cho Y.J., Kim T.J., Lee K.W., Lee J.H., Lee C.T., Yoon H.I. Bronchial angles are associated with nodular bronchiectatic non-tuberculous mycobacteria lung disease. *Int. J. Tuberc. Lung Dis.* 2017; 21(10):1169–1175.

55. Li W., Zhang C.Q., Li A.Y., Deng K., Shi H. Preliminary study of dose reduction and image quality of adult pelvic low-dose CT scan with adaptive statistical iterative reconstruction. *Acta Radiol.* 2015; 56(10):1222–1229.

56. Luccichenti G., Cademartiri F., Pezzella F.R., Runza G., Belgrano M., Midiri M., Sabatini U., Bastianello S., Krestin G.P. 3D reconstruction techniques made easy: know-how and pictures. *Eur. Radiol.* 2005; 15(10):2146–2156.

57. Luo M., Duan C., Qiu J., Li W., Zhu D., Cai W. Diagnostic value of multidetector CT and its multiplanar reformation, volume rendering and virtual bronchoscopy postprocessing techniques for primary trachea and main bronchus tumors. *PLoS One.* 2015; 10(9):e0137329. doi: 10.1371/journal.pone.0137329

58. Mahmut M., Nishitani H. Evaluation of pulmonary lobe variations using multidetector row computed tomography. *J. Comput. Assist. Tomogr.* 2007; 31(6):956–960.

59. Masutani Y., MacMahon H., Doi K. Automated segmentation and visualization of the pulmonary vascular tree in spiral CT angiography: an anatomy-oriented approach based on three-dimensional image analysis. *J. Comput. Assist. Tomogr.* 2001; 25(4):587–597.

60. Rowe S.P., Johnson P.T., Fishman E.K. Initial experience with cinematic rendering for chest cardiovascular imaging. *Br. J. Radiol.* 2017; 22:20170558. doi: 10.1259/bjr.20170558

61. Seemann M.D., Claussen C.D. Hybrid 3D visualization of the chest and virtual endoscopy of the tracheo-bronchial system: possibilities and limitations of clinical application. *Lung Cancer* 2001; 32(3):237–246.

62. Seemann M.D., Gebicke K., Luboldt W., Albes J.M., Vollmar J., Schäfer J.F., Beinert T., Englmeier K.H., Bitzer M., Claussen C.D. Hybrid 3-D rendering of the thorax and surface-based virtual bronchoscopy in surgical and interventional therapy control. *RoFo* 2001; 173(7):650–657.

63. Seizeur R., Gérard R., Marion J., Lefèvre C., Nonent M., Forlodou P., Sénécaïl B. Anatomic study and CT angiography with 3D reconstructions of the pulmonary arterial tree. *Morphologie* 2010; 94(306):45–50.

64. Spagnolo P., Sverzellati N., Wells A.U., Hansell D.M. Imaging aspects of the diagnosis of sarcoidosis. *Eur. Radiol.* 2014; 24(4):807–816.

65. Summers R.M., Feng D.H., Holland S.M., Sneller M.C., Shelhamer J.H. Virtual bronchoscopy: segmentation method for real-time display. *Radiology* 1996; 200(3):857–862.
66. Suzuki M., Matsui O., Kawashima H., Takemura A., Matsubara K., Hayashi N., Koda W., Shibata Y. Radioanatomical study of a true tracheal bronchus using multidetector computed tomography. *Jpn J. Radiol.* 2010; 28(3):188–192.
67. Vining D.J., Liu K., Choplin R.H., Haponik E.F. Virtual bronchoscopy. Relationships of virtual reality endobronchial simulations to actual bronchoscopic findings. *Chest* 1996; 109(2):549–553.
68. Wessendorf T.E., Bonella F., Costabel U. Diagnosis of Sarcoidosis. *Clin. Rev. Allergy Immunol.* 2015; 49(1):54–62.
69. Xiang Z., Ai Z., Zhong G., Deng Y., Malhi H., Palmer S., Zee C. Diagnostic value of using multiplanar reformation images: Case report for rare endotracheal hamartomas. *Medicine (Baltimore)* 2017; 96(40):e8231.
70. Zappala C.J., Desai S.R., Copley S.J., Spagnolo P., Sen D., Alam S.M., du Bois R.M., Hansell D.M., Wells A.U. Accuracy of individual variables in the monitoring of long-term change in pulmonary sarcoidosis as judged by serial high-resolution CT scan data. *Chest* 2014; 145(1):101–107.
71. Zhang S.X., Liu Y. Computer-based three-dimensional reconstruction of lung cancer using 64-slice CT scanning data and virtual surgery. *Nan Fang Yi Ke Da Xue Xue Bao* 2016; 36(4):562–566.

Поступила 30.10.2017

Контактная информация

Анатолий Васильевич Ленишин,

доктор медицинских наук, профессор, заведующий отделением лучевой диагностики, ведущий научный сотрудник лаборатории функциональных методов исследования дыхательной системы,

Дальневосточный научный центр физиологии и патологии дыхания,

675000, г. Благовещенск, ул. Калинина, 22.

E-mail: lenshin42@mail.ru

Correspondence should be addressed to

Anatoliy V. Lenshin,

MD, PhD, DSc, Professor, Head of Department of X-Ray Diagnostics, Leading staff scientist of Laboratory of Functional Research of Respiratory System,

Far Eastern Scientific Center of Physiology and Pathology of Respiration,

22 Kalinina Str., Blagoveshchensk, 675000, Russian Federation.

E-mail: lenshin42@mail.ru