

ВОЗМОЖНОСТИ ТРЕХМЕРНОГО КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛЕГОЧНЫХ СОСУДОВ, ВЫПОЛНЕННОГО НА ОСНОВЕ ДАННЫХ РЕНТГЕНОВСКОЙ КОМПЬЮТЕРНО-ТОМОГРАФИЧЕСКОЙ АНГИОПУЛЬМОНОГРАФИИ В ПЛАНИРОВАНИИ ВИДЕОАССИСТИРОВАННЫХ СЕГМЕНТЭКТОМИЙ ЛЕГКИХ

Халимон А.И.

Цель исследования. Определение возможностей методики 3D-моделирования легочных сосудов, выполненного на основе данных КТ-ангиопульмонографии, в оценке легочной ангиоархитектоники у пациентов с планируемыми видеоассистированными сегментэктомиями легких.

Материалы и методы. В проспективное исследование были включены 52 пациента, которым планировалось и было выполнено 61 оперативное вмешательство в объеме видеоассистированной сегментэктомии по поводу периферических объемных образований легких. Всем пациентам было выполнено 3D-моделирование легочных сосудов на основе данных КТ-ангиопульмонографии с применением оптимизированного протокола сканирования. Результаты 3D-моделирования сравнивались с данными интраоперационной ревизии, проводилась оценка количества легочных артерий в области оперативного вмешательства.

Результаты. С помощью методики 3D-моделирования легочных сосудов на предоперационном этапе удалось визуализировать 253 ветви легочных артерий (96,9%) из 261, обнаруженных при интраоперационной ревизии. 66 (92,9%) из 71 ветви были выявлены при планировании верхних сегментэктомий справа, 66 (95,6%) из 69 ветвей – при планировании верхних сегментэктомий слева, 64 (100%) из 64 ветвей – при планировании нижних сегментэктомий справа, 57 (100%) из 57 – при планировании нижних сегментэктомий слева.

Обсуждение. Данные 3D-моделирования легочных сосудов в подавляющем большинстве случаев совпали с результатами интраоперационной ревизии, с немногочисленными ложноотрицательными результатами, связанными с малым диаметром сосудов, наблюдаемыми только при верхних сегментэктомиях.

Выводы. 3D-моделирование легочных сосудов является прецизионной методикой, позволяющей с высокой эффективностью оценивать ангиоархитектонику в зоне оперативного вмешательства, что, несомненно, крайне важно при использовании видеоассистированной техники.

Ключевые слова: рак легкого, НМРЛ, легочные метастазы, сегментэктомия, видеоассистированная торакальная хирургия, МСКТ, КТ-ангиопульмонография, 3D-моделирование, предоперационная навигация.

Контактный автор: Халимон А. И., e-mail: markyhaws@gmail.com

Для цитирования: Халимон А.И. Возможности трехмерного компьютерного моделирования легочных сосудов, выполненного на основе данных рентгеновской компьютерной томографической ангиопульмонографии в планировании видеоассистированных сегментэктомий легких. REJR 2017; 7(3):83-89. DOI:10.21569/2222-7415-2017-7-3-83-89.

Статья получена: 30.06.2017

Статья принята: 17.07.2017

Московский научно-исследовательский онкологический институт имени П.А. Герцена – филиал ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский радиологический центр» Минздрава России. г. Москва, Россия.

POSSIBILITIES OF THREE-DIMENSIONAL COMPUTER SIMULATION OF PULMONARY VESSELS BASED ON COMPUTED TOMOGRAPHIC ANGIOPULMONOGRAPHY DATA IN THE PLANNING OF VIDEO-ASSISTED SEGMENTECTOMY OF LUNGS

Khalimon A.I.

Purpose. To determine the possibilities of three-dimensional computer simulation of pulmonary vessels based on computed tomographic angiopulmonography data in the lung angioarchitectonics estimation in patients with planned video-assisted segmentectomy of lung.

Materials and methods. The prospective study included 52 patients with 61 planned and performed video-assisted segmentectomy for peripheral lung mass lesions. In all the cases 3D computer simulation of pulmonary vessels based on computed tomographic angiopulmonography with optimised scanning protocol data was performed. The results of 3D computer simulation were compared to the intraoperative surgical revision data, the number of pulmonary arteries was estimated in the region of interest.

Results. By means of 3D computer simulation of pulmonary vessels data, 253 (96,9%) of 261 pulmonary arteries branches detected during intraoperative revision were successfully visualized at the preoperative stage. 66 (92,9%) of 71 branches were detected during the planning stage of the upper segmentectomies on the right, 66 (95,6%) of 69 branches – during the planning stage of the upper segmentectomies on the left, 64 (100%) of 64 branches – during the planning stage of the lower segmentectomies on the right, 57(100%) of 57 branches – during the planning stage of the lower segmentectomies on the left.

Conclusion. 3D computer simulation of pulmonary vessels data was consistent with intraoperative revision results in the vast majority of cases, with rare false-negative results, related to the small vessels diameter observed only in case of upper segmentectomies. 3D computer simulation of pulmonary vessels is a sensitive method, which allows highly effective estimation of the angioarchitectonics in the area of interest, and that is, without a doubt, crucial in case of video-assisted technique.

Keywords: lung cancer, NSCLC, lung metastases, segmentectomy, video-assisted thoracoscopic surgery, MDCT, CT-angiopulmonography, 3D computer simulation, preoperative navigation.

Corresponding author: Khalimon A.I., e-mail: markyhaws@gmail.com

For citation: Khalimon A.I. Possibilities of three-dimensional computer simulation of pulmonary vessels based on computed tomographic angiopulmonography data in the planning of video-assisted segmentectomy of lungs. *REJR.* 2017; 7 (3):83-89. DOI:10.21569/2222-7415-2017-7-3-83-89.

Received: 30.06.2017

Accepted: 17.07.2017

Введение. В последнее время растет интерес к таким малоинвазивным, органосохраняющим и функционально-щадящим операциям, как видеоассистированные сегментэктомии, уже хорошо зарекомендовавшим себя при лечении пациентов с IА стадией немелкоклеточного рака легкого и химиорезистентными легочными метастазами экстрапульмональных опухолей [1 - 7]. Однако, данные операции являются технически более сложными, чем лобэк-

томии, и требуют более детальной оценки пространственного распределения бронхосудистых структур в области оперативного приема. Эта проблема крайне актуальна для верхних сегментэктомий, когда количество и характер ветвления легочных артерий крайне вариабельны, а их выделение возможно на ограниченном протяжении [8, 9]. Изучение на пред- и интраоперационных этапах трехмерных компьютерных моделей легочных сосудов, созданных на основе данных компьютерно-томографической

P.A. Herzen Moscow Research Oncology Institute, branch of «National Medical Research Radiological Center». Moscow, Russia.

ангиопульмонографии (КТ-ангиопульмонографии), позволяет определить количество, размеры и пространственное распределение ветвей легочных артерий в зоне оперативного вмешательства и, тем самым, снизить риск их травматизации и интраоперационного кровотечения в сложных условиях ограниченного оперативного доступа [10]. Подавляющее большинство работ, посвященных использованию трехмерных компьютерных моделей легочных сосудов в видеоассистированной торакальной хирургии, принадлежит японским авторам, что обусловлено их богатым опытом в хирургии ранних стадий рака легкого. Различными группами авторов были получены сходные результаты исследования этой методики, позволяющей, по их данным, визуализировать все ветви легочных артерий в зоне оперативного вмешательства в 95-97% случаев, что несомненно свидетельствует о ее высокой эффективности. Немногочисленные ложноотрицательные результаты были обусловлены малым диаметром ветвей легочных артерий, был определен порог в 2 мм [11 - 13]. Также исследователями было отмечено уменьшение объема кровопотери и длительности оперативного вмешательства у пациентов, которым было выполнено трехмерное моделирование легочных сосудов по сравнению с теми пациентами, у кого оно не проводилось [13].

Цель исследования.

Определить возможности методики трехмерного компьютерного моделирования легочных сосудов (далее – 3D-моделирование), выполненного на основе данных КТ-ангиопульмонографии, в оценке легочной ангиоархитектоники у пациентов с планируемыми видеоассистированными сегментэктомиями легких.

Материалы и методы.

В проспективное исследование были включены 52 пациента, которым планировалось и было выполнено 61 оперативное вмешательство в объеме видеоассистированной сегментэктомии. Из них 32 (52%) приходились на верхние сегментэктомии у 27 пациентов (52%) (16 – справа, 16 – слева) и 29 (48%) – на нижние сегментэктомии у 25 пациентов (48%) (15 – справа, 14 – слева). Доля атипичных сегментэктомий составила 79% (48), типичных – 21% (13). Распределение пациентов по полу составило: 33 (63%) – мужчины, 19 (37%) – женщины. Средний возраст пациентов – 55±4 года. 40 пациентов (77%) были прооперированы по поводу химиорезистентного метастатического поражения легких и 12 (23%) – по поводу периферического НМРЛ IA стадии (cT1aN0M0). Из 40 пациентов с метастатическим поражением легких у 10 (25%) первичным процессом являлся почечно-клеточный рак, у 14 (35%) – колоректальный

рак, у 8 (20%) – рак молочной железы, у 5 (12,5%) – рак гортани, у 3 (7,5%) – рак околоушной слюнной железы.

Исследования проводились на рентгеновском компьютерном томографе Aquilion Prime фирмы Toshiba Medical Systems Corporation (Япония) с 80 рядами детекторов, шириной по 0,5 мм, с использованием двухколбового автоматического инжектора контрастного препарата Stellant фирмы MedRad (Bayer, Германия). Использовались неионные йодсодержащие рентгенконтрастные препараты с концентрацией йода от 350 до 400 мг/мл. Применялись следующие параметры сканирования: напряжение на рентгеновской трубке – 100kV; трехмерная модуляция силы тока с помощью утилиты SureExposure 3D в диапазоне 80-600 mA при SD (standard deviation), равном 10; коллимация – 80x0,5 мм; питч – 1,3; время 1 оборота системы «трубка-детекторы» – 0,35 с; триггер – на просвет верхней полой вены, старт сканирования после достижения порога в +140 единиц Хаунсфилда (HU); заданное время задержки голосовой команды (Voice Timing), равное 3 секундам; при локализации патологического процесса в верхних отделах легких сканирование производилось в краниокаудальном направлении, при локализации в нижних отделах – в каудокраниальном направлении, вторая фаза начиналась через 10 секунд после окончания первой фазы, направление сканирования – обратное первой фазе; скорость введения контрастного препарата и болюс-преследователя (физиологический раствор) – 5 мл/с, объем – 60 мл и 20 мл соответственно.

Для постпроцессорной обработки полученных данных использовалось программное обеспечение Murgian 1.18 фирмы Intrasure (Франция).

Результатом применения вышеописанной методики являлось получение разницы в интервалах HU в просветах артерий и вен легкого, в среднем составляющей около +450±50 HU. Полученные данные реконструировались в две серии аксиальных томограмм с толщиной реконструкции 1 мм и инкрементом 0,8 с использованием гибридного фильтра реконструкции (рис. 1).

Далее с помощью программного пакета Murgian 1.18 производилась анатомическая синхронизация данных обеих постконтрастных серий, в окне первой серии создавалась маска порогового значения, включающая в себя предполагаемые структуры для дальнейшего моделирования, а также верхний и нижний пороги интервала HU, соответствующие значениям в просветах легочных артерий, получаемые путем точечной оценки с последующим использованием инструмента трехмерного заполнения заданной области интереса. Вышеописанная про-



Рис. 1 а (Fig. 1 a).



Рис. 1 б (Fig. 1 b).

Рис. 1. КТ грудной клетки, аксиальная проекция, постконтрастное изображение, уровень устья легочного ствола. Мягкотканное электронное окно.

а - фаза контрастирования легочных артерий;

б - фаза контрастирования легочных вен. В левом легком визуализируется узловое образование.

Fig. 1. Chest CT, axial reconstruction, contrast-enhanced image, on the level of pulmonary trunk entrance. Soft tissue window.

a - pulmonary arteries phase;

b - pulmonary veins phase. A nodule is visualized in the left lung.

цедура повторялась для второй серии полученных данных с использованием порогов, соответствующих значениям HU в просветах легочных вен. На следующем этапе область интереса, соответствующая легочным артериям, переносилась в окно второй фазы, осуществлялось полуавтоматическое моделирование бронхиального дерева и легочных узлов путем применения инструмента трехмерного заполнения, работа которого основана на оценке HU в близлежащих к выделяемой точке областях. В завершении постпроцессорной обработки производилось присвоение заранее предложенных цветов созданным областям интересов (рис. 2).

Полученные результаты предоставлялись в виде 3D-модели, конвертируемой в формат PDF (рис. 3).

Временной интервал, затраченный на постпроцессорную обработку, в среднем, составил 15±5 минут.

Результаты 3D-моделирования сравнивались с данными интраоперационной ревизии, проводилась оценка количества легочных артерий в области оперативного вмешательства.

Результаты.

Основное внимание в исследовании уделялось оценке строения артериального бассейна оперируемого сегмента легкого, как наиболее важного элемента при интраоперационной ревизии, так как недостаточная осведомленность хирурга об индивидуальной ангиоархитектонике может привести к травматизации артерий с риском летального исхода. Характер ветвления

венозных сосудов и бронхов оценивался для создания индивидуальной топографической картины бронхососудистого пучка, что облегчало интраоперационную навигацию.

С помощью методики 3D-моделирования легочных сосудов на предоперационном этапе удалось визуализировать 253 ветви легочных артерий (96,9%) из 261, обнаруженных при интраоперационной ревизии. 66 (92,9%) из 71 ветви были выявлены при планировании верхних сегментэктомий справа, 66 (95,6%) из 69 ветвей – при планировании верхних сегментэктомий слева, 64 (100%) из 64 ветвей – при планировании нижних сегментэктомий справа, 57 (100%) из 57 – при планировании нижних сегментэктомий слева. Данные представлены в таблице №1.

В ходе исследования оперирующими хирургами было отмечено упрощение интраоперационной ревизии и, следовательно, уменьшение длительности оперативного приема благодаря возможности визуализации 3D-модели как до, так и во время проведения оперативного вмешательства. Несколько вариантов ветвления легочных артерий представлены на 3D-моделях на рисунке 4.

Обсуждение.

3D-моделирование легочных сосудов, осуществляемое на основе данных КТ-ангиопульмонографии, является новейшей технологией визуализации в области торакальной хирургии, имеющей преимущества над традиционной ангиографией в виде своей малой ин-

Таблица №1. Распределение количества обнаруженных ветвей легочных артерий (ВЛА) при 3D-моделировании и хирургической ревизии в зависимости от оперируемых долей и частота их выявления на 3D-моделях.

	Оперлируемая доля	Количество операций	Количество обнаруженных ВЛА		Частота выявления ВЛА на 3D моделях (%)
			При 3D-моделировании	При хирургической ревизии	
	Правая верхняя	16	66	71	92,9
	Правая нижняя	15	64	64	100
	Левая верхняя	16	66	69	95,6
	Левая нижняя	14	57	57	100
	Общее	52	253	261	96,9

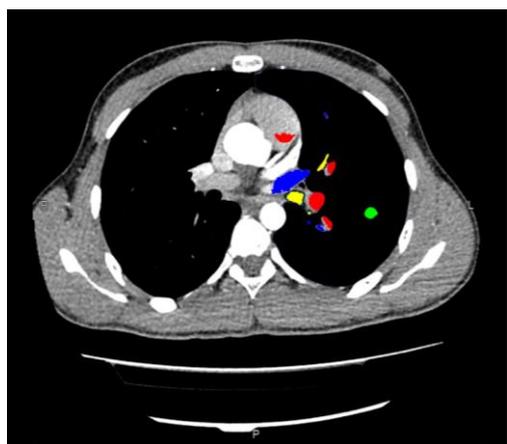


Рис. 2 (Fig. 2).

Рис. 2. КТ грудной клетки, аксиальная проекция.

Уровень устья легочного ствола, постконтрастное изображение, полученное в фазу контрастирования легочных вен, с заданными областями интересов в левом легком. Мягкотканное электронное окно. Красным цветом обозначены легочные артерии, синим – легочные вены, желтым – бронхиальное дерево, зеленым – узловое образование.

Fig. 2. Chest CT, axial reconstruction.

Contrast-enhanced chest CT scan on the level of pulmonary trunk entrance with the defined regions of interest, axial reconstruction. Pulmonary veins phase. Soft tissue window. Pulmonary arteries are marked red, pulmonary veins – blue, bronchial tree – yellow, lung nodule – green.

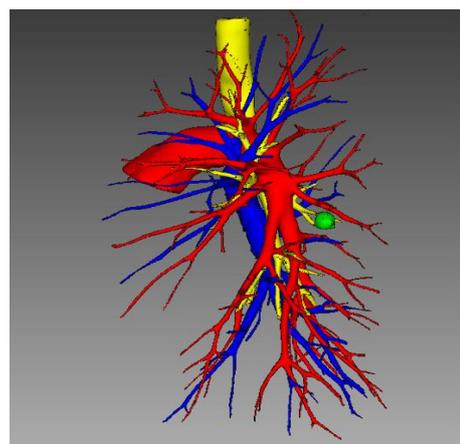


Рис. 3 (Fig. 3).

Рис. 3. 3D-модель бронхососудистых структур левого легкого.

Красным цветом обозначены легочные артерии, синим – легочные вены, желтым – бронхиальное дерево, зеленым – узловое образование.

Fig. 3. 3D model of bronchovascular structures in the left lung.

Pulmonary arteries are marked red, pulmonary veins – blue, bronchial tree – yellow, lung nodule – green.

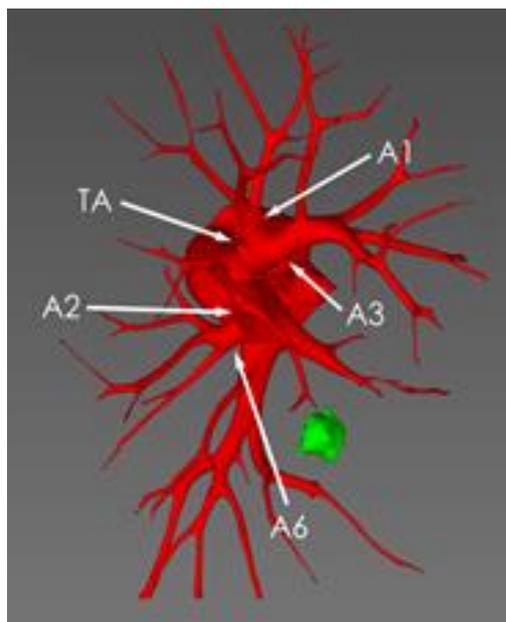


Рис. 4 а (Fig. 4 a).

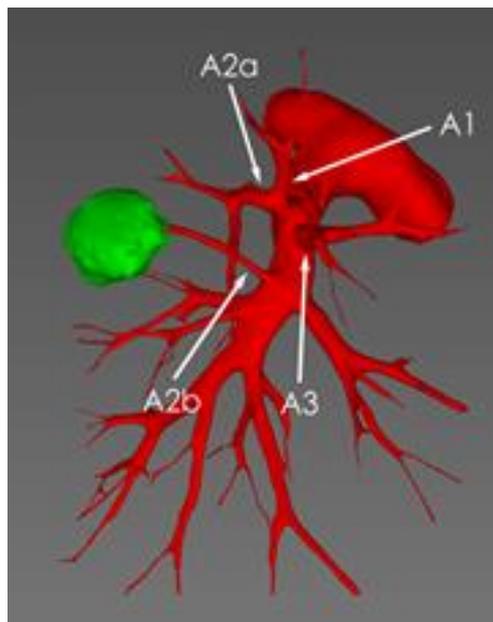


Рис. 4 б (Fig. 4 b).

Рис. 4. 3D-модели легочных артерий правого легкого двух различных пациентов.

Красным цветом обозначены легочные артерии, зеленым – узловые образования.

а - белыми стрелками указаны ветви правой легочной артерии, составляющие артериальный бассейн верхней доли правого легкого: ТА – передний ствол (truncus anterior), А1 – апикальная ветвь, А3 – вентральная ветвь, А2 – дорзальная ветвь, А6 – верхняя сегментарная артерия нижней доли правого легкого. Образование расположено в S2 правого легкого, кровоснабжение которого осуществляется посредством дорзальной ветви (А2), отходящей от верхней сегментарной артерии нижней доли (А6).

б - белыми стрелками указаны ветви правой легочной артерии, составляющие артериальный бассейн верхней доли правого легкого: А1 – апикальная ветвь, А3 – вентральная ветвь, А2а – возвратная дорзальная ветвь (отходящая от А1), А2b – восходящая дорзальная ветвь (отходящая от междолевой артерии).

Fig. 4. 3D models of the right lung pulmonary arteries of two different patients.

Pulmonary arteries are marked red, lung nodule – green.

а - white arrows indicate branches of the right pulmonary artery, composing arterial supply of the right lung upper lobe: TA indicates truncus anterior; А1 – apical branch, А3 – ventral branch, А2 – dorsal branch. The white arrow also indicates superior segmental artery of the right lung lower lobe – А6. A nodule is located in S2 of the right lung, which is supplied by the dorsal branch (А2), originating from the superior segmental artery of the lower lobe (А6).

б - white arrows indicate branches of the right pulmonary artery, composing arterial supply of the right lung upper lobe: А1 indicates apical branch, А3 – ventral branch, А2а – recurrent dorsal branch (originating from А1), А2b – ascending dorsal branch (originating from the interlobar artery).

вазивности и возможности оценки изображения под произвольно выбранным углом, удобным для оператора, как на предоперационном, так и на интраоперационных этапах. Данные классических постконтрастных аксиальных компьютерных томограмм, ортогональных мультипланарных реконструкций (MPR) и реконструкций в искривленных плоскостях (curved MPR), в том числе с использованием проекций максимальной интенсивности (MIP) и даже техники объемного рендеринга (VRT), зна-

чительно уступают в наглядности 3D-модели легочных сосудов. MPR в режиме MIP с применением как ортогональных реконструкций, так и реконструкций в искривленных плоскостях, при небольших слэбах (объединение данных нескольких томографических срезов), имеют ограниченный объем данных, что затрудняет восприятие хирургом общей картины ангиоархитектоники пораженного сегмента легкого. При увеличении слэба информативность изображения также снижается вследствие увеличения степени наложения данных. Наряду с этим

необходимость одновременного просмотра классических трех окон MPR вносит отрицательный вклад в оценку данных. Использование VRT позволяет избежать многих недостатков MPR, однако, взаимная контрастность легочных артерий и вен значительно уступает таковой на 3D-моделях, при которой возможно выделять сосуды, бронхи и легочные узлы произвольными цветами вне зависимости от их плотности. Стоит отметить, что вышеперечисленные алгоритмы реконструкции также не позволяют получать одновременно аналогичные по информативности изображения бронхиального дерева.

В ходе исследования было установлено, что методика 3D-моделирования легочных сосудов позволяет с высокой эффективностью визуализировать ветви легочных артерий с многочисленными ложноотрицательными результатами, связанными с малым диаметром сосудов, наблюдаемыми только при верхних сегментэктомиях. Полученные результаты сходны с вышеприведенными данными других авторов, изучающих эту методику.

3D-модели, сопровождающие видеоматериал проведенных операций, могут использо-

ваться в виде наглядного пособия в процессе обучения начинающих специалистов в области видеоассистированной торакальной хирургии. Также перспективным представляется использование 3D-моделей при робот-ассистированных операциях на легких.

Выводы.

3D-моделирование легочных сосудов является прецизионной методикой, рекомендуемой для эффективного проведения видеоассистированных сегментэктомий. Предоставляемая информация обладает высокой ценностью для оперирующих с помощью видеоассистированной техники хирургов, так как знание индивидуальной сосудистой анатомии позволяет безопасно и более уверенно выполнять оперативный прием в условиях ограниченного доступа.

Источник финансирования и конфликт интересов.

Авторы данной статьи подтвердили отсутствие финансовой поддержки исследования и конфликта интересов, о которых необходимо сообщить.

References:

1. Bao F., Ye P., Yang Y., Wang L., Zhang C., Lv X., et al. Segmentectomy or lobectomy for early stage lung cancer: a meta-analysis. *European Journal of Cardio-Thoracic Surgery*. 2014; 46 (1): 1-7.
2. Martin-Ucar A.E., Waller D.A., Atkins J.L., Swinson D., O'Byrne K.J., Peake M.D. The beneficial effects of specialist thoracic surgery on the resection rate for non-small-cell lung cancer. *Lung Cancer*. 2004; 46 (2): 227-232.
3. Riaz S.P., Linklater K.M., Page R., Peake M.D., Møller H., Lüchtenborg M. Recent trends in resection rates among non-small cell lung cancer patients in England. *Thorax*. 2012; 67 (9): 811-814.
4. Griffin J.P., Eastridge C.E., Tolley E.A., Pate J.W. Wedge resection for non-small cell lung cancer in patients with pulmonary insufficiency: prospective ten-year survival. *Journal of Thoracic Oncology*. 2006; 1 (9): 960-964.
5. Lau K.K., Martin-Ucar A.E., Nakas A., Waller D.A. Lung cancer surgery in the breathless patient—the benefits of avoiding the gold standard. *European Journal of Cardio-Thoracic Surgery*. 2010; 38 (1): 6-13.
6. Schuchert M.J., Pettiford B.L., Pennathur A., Abbas G., Awais O., Close J., et al. Anatomic segmentectomy for stage I non-small-cell lung cancer: comparison of video-assisted thoracic surgery versus open approach. *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*. 2009; 138 (6): 1318-1325.
7. Jaklitsch M.T., Burt B.M., Jett J.R., Bravo Iniguez C.E. Surgical resection of pulmonary metastases: Benefits, indications, preoperative evaluation and techniques. *UpToDate*. 2015.
8. Oizumi H., Kanauchi N., Kato H., Endoh M., Suzuki J., Fukaya K., et al. Anatomic thoracoscopic pulmonary segmentectomy under 3-dimensional multidetector computed tomography simulation: a report of 52 consecutive cases. *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*. 2011; 141 (3): 678-682.
9. Gossot D., Zaimi R., Fournel L., Grigoriou M., Brian E., Neveu C. Totally thoracoscopic pulmonary anatomic segmentectomies: technical considerations. *The Journal of Thoracic Disease*. 2013; 5: 200-206.
10. Yamada S., Suga A., Inoue Y., Inoue H. Use of multi-detector row angiography for the arrangement of video-assisted modified segmental resection. *European Journal of Cardio-Thoracic Surgery*. 2009; 36 (4): 727-730.
11. Fukuhara K., Akashi A., Nakane S., Tomita E. Preoperative assessment of the pulmonary artery by three-dimensional computed tomography before video-assisted thoracic surgery lobectomy. *European Journal of Cardio-Thoracic Surgery*. 2008; 34 (4): 875-877.
12. Watanabe S., Arai K., Watanabe T., Koda W., Urayama H. Use of three-dimensional computed tomographic angiography of pulmonary vessels for lung resections. *The Annals of Thoracic Surgery*. 2003; 75 (2): 388-392.
13. Hagiwara M., Shimada Y., Kato Y., Nawa K., Makino Y., Furumoto H., et al. High-quality 3-dimensional image simulation for pulmonary lobectomy and segmentectomy: results of preoperative assessment of pulmonary vessels and short-term surgical outcomes in consecutive patients undergoing video-assisted thoracic surgery. *European Journal of Cardio-Thoracic Surgery*. 2014; 46 (6): 120-126.