

УДК (616.2+616.24+616.233-072.1)616-073.756.8

DOI: 10.12737/article_593602ecdf4639.95473036

АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ТОНКОСЛОЙНОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ ЛЕГКИХ ЧЕЛОВЕКА ДЛЯ СОЗДАНИЯ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ ВНЕШНИХ КОНТУРОВ БРОНХИАЛЬНОГО ДЕРЕВА**А.М.Игнатова**

Институт безопасности труда, производства и человека Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29

РЕЗЮМЕ

Современные методы медицинской диагностики должны максимально наглядно демонстрировать результаты исследований пациентов. Среди всех доступных методов медицинских исследований наиболее обширный объем графических данных можно получить методом рентгеновской тонкослойной компьютерной томографии. Тонкослойная компьютерная томография – вид рентгеновского исследования, в ходе которого съемка ведется послойно на разную глубину с заданным интервалом между слоями. Результат томографии представляет собой набор двухмерных теневых плоских изображений продольного сечения человеческого тела. В настоящее время, в клинической практике данный метод используется широко, однако, на практике врачебному анализу подвергаются в основном плоские изображения продольных сечений человеческого тела, трехмерная реконструкция используется редко. При этом трехмерная интерпретация результатов имеет явные преимущества, но прежде всего повышает точность и скорость постановки диагноза. Стандартные методы трехмерной реконструкции, заложенные в программное обеспечение, поставляемое с оборудованием для томографии, имеют ограниченные возможности. Целью исследования является поиск возможного расширения возможностей объемной интерпретации результатов томографии другими доступными программными средствами. В статье предлагается алгоритм обработки изображений, полученных тонкослойной компьютерной томографией, который включает в себя следующие операции: настройка контраста, бинаризация, фильтрация, инверсия, визуализация, корректировка и расчет. Предложенный алгоритм позволяет повысить информативность метода тонкослойной рентгеновской компьютерной томографии через построение аксонометрического (трехмерного) изображения внешних контуров бронхиального дерева человека, максимально соответствующих реальным анатомическим параметрам в натуральную величину, без экспериментов с вмешательством, то есть неинвазивно.

Ключевые слова: компьютерная томография, медицинская диагностика, обработка изображений, легкие, дыхательная система, бронхоскопия, бронхиальное дерево, трехмерное моделирование, визуализация, анатомия.

SUMMARY**THE ALGORITHM OF IMAGE PROCESSING OF THIN LAYER COMPUTED TOMOGRAPHY FOR CREATING THREE-DIMENSIONAL MODEL OF THE HUMAN BRONCHIAL TREE OUTER CONTOURS****A.M.Ignatova**

Institute for Labor Safety, Production and Human of Perm National Research Polytechnic University, 29 Komsomolsky Ave., Perm, 614990, Russian Federation

Modern medical diagnostic methods must demonstrate the results of patients' examination to the full extent. Among all available medical research methods most extensive amount of image data can be obtained by X-ray thin-layer computer tomography (CT). Thin-layer CT is a type of X-ray examination, during which the recording is done layer by layer at different depths with a predetermined interval between the layers. The result is a set of two-dimensional shadow flat images of the longitudinal cross section of a human body. Currently in clinical practice, this method is used widely, however, in certain medical practice only flat longitudinal sections of the image of the human body are analyzed; a three-dimensional reconstruction is rarely used. But this three-dimensional interpretation of the results has a clear advantage, and primarily increases the accuracy and speed of diagnosis. Standard methods for three-dimensional reconstruction, built into the software that comes with the equipment for tomography, have a limited capacity. The aim of this study is to search for possible broadening of opportunities of volumetric interpretation of the results with other available imaging software. The article suggests an algorithm of image processing received with the thin layer CT which includes the following steps: setting the contrast, binarization, filtering, inversion, imaging, correction and calculation. The proposed algorithm can improve the information content of the method of thin layer X-ray CT through the construction of axonometric (three-dimensional) images of outer contours of the human bronchial tree similar to real life-size anatomical parameters without intervention, that is to say, noninvasively.

Key words: computed tomography, medical diagnostics, image processing, lungs, respiratory system, bron-

choscopy, bronchial tree, three-dimensional modeling, visualization, anatomy.

Среди современных методов медицинской диагностики, которые используются в научных и клинических исследованиях, наибольшую популярность имеют те из них, которые позволяют максимально точно и подробно визуализировать полученные данные [2, 3]. Для исследования легких, трахеи и бронхиального дерева классическими визуализирующими методами являются рентгенография, флюорография, бронхоскопия и рентгеноскопия [1]. Несмотря на обширность получаемых визуальных данных, использовать их для построения реалистичных трехмерных расчетных моделей дыхательной системы человека удается только частично, как правило, с их помощью получают сведения о величине сечений и углов, которые затем используются в ручном построении упрощенных моделей [5, 10, 12]. Известен [10] опыт получения более точных моделей бронхиального дерева, параметры, которых максимально соответствуют параметрам живого организма, методом заливки полимерной жидкости в дыхательную систему лабораторных животных и последующего извлечения полученных отливок. Очевидный недостаток такого метода – невозможность проведения многократных экспериментов на одной подопытной особи и, разумеется, невозможность проведения таких исследований на человеке. Математических моделей дыхательной системы человека с детализацией, соответствующей реальной анатомической, в настоящее время не предложено. С 1994 года в клинической практике используется тонкослойная компьютерная томография [6]. Данный метод является информативным, однако использование данных томографии для трехмерного моделирования дыхательной системы в настоящее время остается технически ограниченным.

Актуальной задачей является расширение возможностей интерпретации результатов компьютерной томографии через создание трехмерных (аксонометрических) моделей бронхиального дерева человека неинвазивным путем (без экспериментов со вмешательством), которые в дальнейшем были бы использованы для создания искусственных легких, изучения оседания мелкодисперсных частиц пыли в легких, изучения действия лекарственных аэрозолей и ингаляций, изучения работы альвеол через модель поропругой среды.

В настоящей работе представлен алгоритм обработки изображений тонкослойной компьютерной томографии для создания трехмерной модели внешних контуров бронхиального дерева человека неинвазивно в реальных условиях и натуральном масштабе.

Известно, что компьютерная томография [7] – это рентгеновское исследование, в ходе которого съемка ведется послойно с заданным интервалом между слоями. Результат томографии представляет собой набор двумерных теневых плоских изображений продольного сечения человеческого тела (рис. 1). Степень контрастности изображений зависит от исследования,

например, пациенту могут вводить специализированные рентгенконтрастные препараты, и от режимов томографирования. В работе использованы снимки, полученные при исследовании грудной клетки пациента на томографе марки GE Brightspeed Elite.

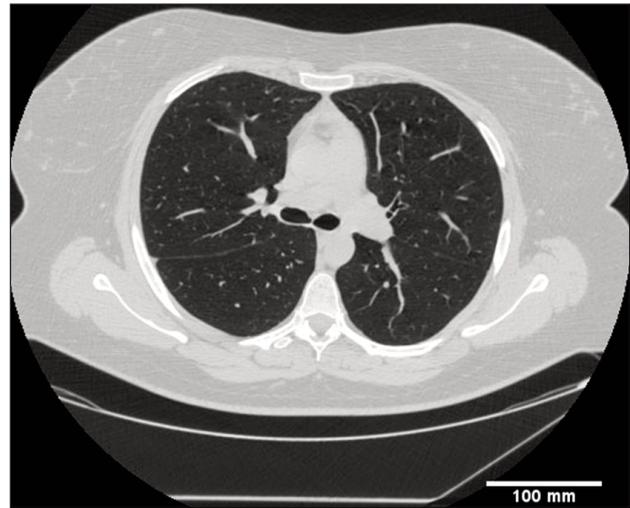


Рис. 1. Рентгеновский снимок продольного разреза, полученный методом тонкослойной компьютерной томографии.

Стандартное программное обеспечение DICOM, предоставляемое с томографами, как правило, редко используется врачами-клиницистами для трехмерной реконструкции или «виртуальной» бронхоскопии. В большинстве случаев специалисты предпочитают проводить диагностику, пользуясь плоскими изображениями, опираясь при их анализе на свой практический опыт и существующие стандартные протоколы исследований [4], которые трехмерных визуализаций не предполагают.

Для обработки изображений тонкослойной компьютерной томографии можно использовать лицензионное и бесплатное программное обеспечение. Среди существующих программных продуктов, позволяющих быстро и достоверно обрабатывать большие объемы визуальных данных с минимальными техническими средствами, наиболее универсальным является программный продукт ImageJ-FiJi, созданный на основе языка программирования Java Script.

Для корректного отображения данных томографии следует использовать режим «Stacks». Этот режим позволяет, используя данные о последовательности снимков, сразу расположить их в правильной последовательности.

Алгоритм работы над изображением представлен в виде схемы (рис. 2).

На начальном этапе обработки изображений следует воспользоваться функцией настройки масштаба изображения, для этого используется следующая последовательность: Analyze→Set Scale, она позволяет задать корректное соотношение реального геометрического размера и размера пикселя на изображении. Для этого предварительно измеряется расстояние в пикселях на изображении и затем они сопоставляются с реальной величиной этого расстояния на рентгеновском

топографическом снимке. Современное оборудование для томографии, как правило, использует масштаб, при

котором один пиксель соответствует 0,8-1 мм реального масштаба изображения.



Рис. 2. Алгоритм обработки изображений компьютерной томографии в программе ImageJ-FiJi (Java Script) для создания трехмерной модели бронхиального дерева.

Следующие действия, которые следует произвести над изображением, это его настройка с помощью графического инструмента «настройка уровней контрастности». Для этого используется функция «уровни» – Image→Adjust→Threshold (рис. 3 а), такая настройка позволяет удалить с изображения информацию о других органах и системах, и оставить из графических данных те, которые необходимы для графической обработки.

После этого результат обработки изображения уже можно подвергнуть трехмерной визуализации с помощью дополнительного пакета «3D Viewer» [11]. Результат такой обработки представлен на рисунке 3 б, это изображение представляет собой модель легких в момент вдоха. Вращение такой модели, например, позволит увидеть давление ребер на внешние стенки легкого и оценить участок соприкосновения легких с диафрагмой.

Для последующего извлечения из изображения (рис. 3 а) непосредственно вида бронхиального дерева, изображение следует перевести в бинарный вид с помощью функции Binary. Затем производится корректировка изображения с последовательным использованием инструментов: Process→Binary→Voronoi; Process→Filters→Variance 3D; Image→Adjust→Threshold. При совместном использовании данные инструменты позволяют получить послойное контрастное изображение бронхиального дерева (рис. 3 в).

Параметры пакета «3D Viewer» заданы таким образом, что темные участки изображения воспринимаются как пустоты, следовательно, при обработке такого изображения пакетом результат будет неудовлетворительным.

Для того чтобы получить модель, отображающую внешние контуры бронхиального дерева, изображение следует инвертировать операцией Image→Invert (рис.

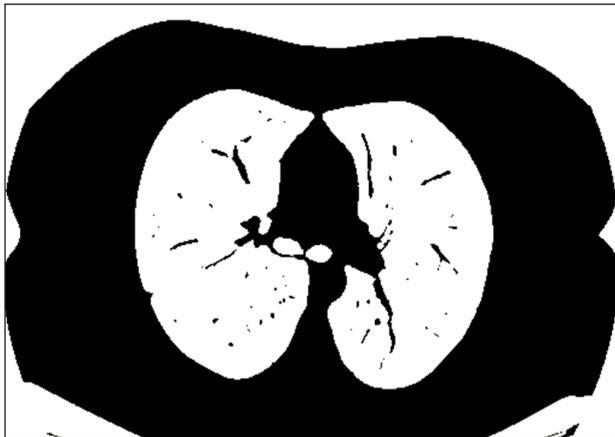
3 г). Результат обработки с помощью дополнительного пакета «3D Viewer» после инвертирования представлен на рисунке 3 д.

Получить изображения модели в разных сечениях и проекциях можно используя пакет «Volume Viewer» [12] (рис. 4).

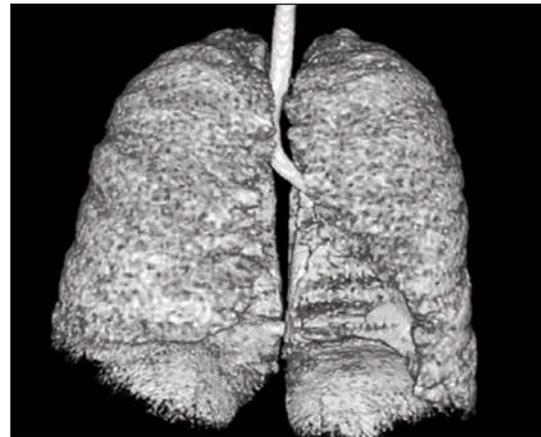
В последующем, трёхмерная модель бронхиального дерева может быть обработана при помощи инструмента Analyze→3D Object Counter и Analyze→Analyze Particles, результаты таких подсчетов могут быть переданы в наиболее универсальный программный продукт для простой обработки массива арифметических данных MS Excel.

Наиболее интересные данные можно получить при использовании функции Analyze→Analyze Particles. Данная функция подсчитывает количество плоских объектов на каждом слое трехмерного изображения. При известной величине толщины слоя математическими операциями могут быть вычислены следующие величины: объем бронхиального дерева, площадь поверхности бронхиального дерева, число отдельных элементов в реконструкции и средний размер диаметра бронхиального канала. Пример таких расчетов представлен в таблице.

Таким образом, настоящей работой показано, что информативность метода тонкослойной компьютерной томографии может быть расширена при использовании ее изображений для трехмерной интерпретации результатов. Представлен алгоритм обработки изображений тонкослойной компьютерной томографии, позволяющий получить аксонометрическое (трехмерное) изображение внешних контуров бронхиального дерева человека, максимально соответствующих реальным анатомическим параметрам в натуральную величину, без экспериментов с вмешательством, то есть неинвазивно.



а



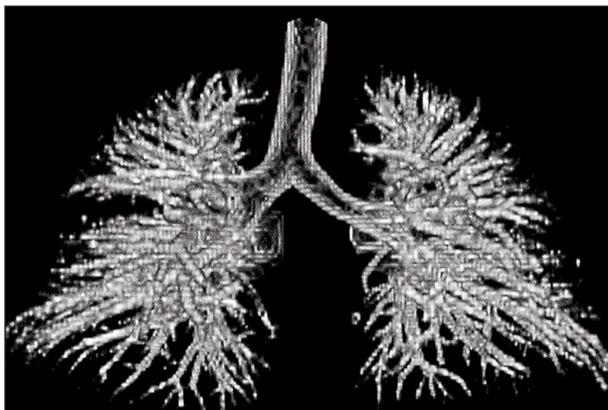
б



в



г



д

Рис. 3. Обработка изображений компьютерной томографии для построения трёхмерной модели:
 а – настройка уровня контраста;
 б – трехмерная модель легких;
 в – изображение после фильтрации;
 г – изображение после инверсии;
 д – трехмерная модель.

Таблица

Математический анализ результата трехмерной реконструкции по изображениям тонкослойной компьютерной томографии

Объем бронхиального дерева, мм ³	Площадь поверхности бронхиального дерева, мм ²	Число отдельных элементов в реконструкции, шт.	Средний размер диаметра бронхиального канала, мм
111480	350058,2	20468	5,42

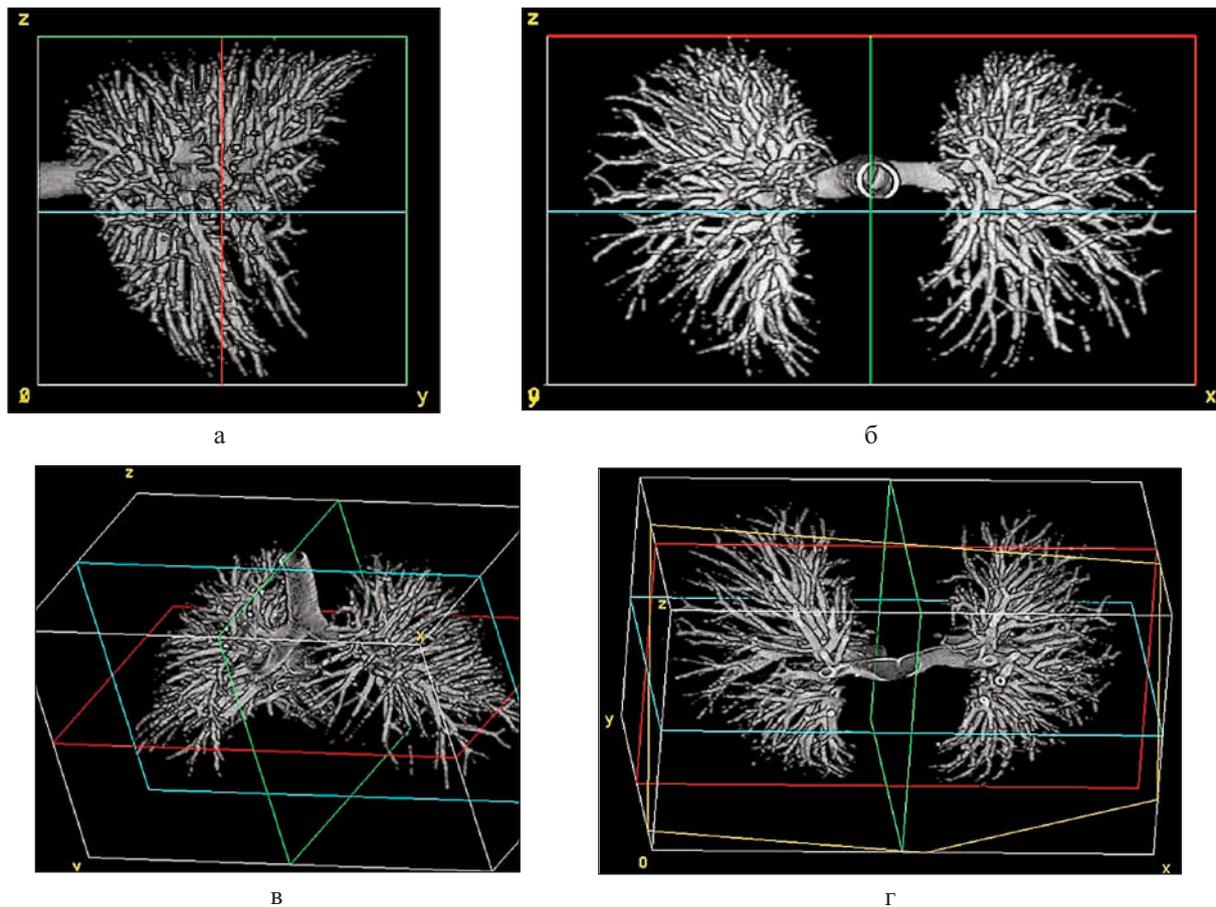


Рис. 4. Трёхмерная модель бронхиального дерева человека: а – сечение z/y; б – сечение z/x; в – разворот 30°; г – угловое сечение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лукомский Г.И., Спасская В.А. Атлас бронхоскопии. М.: Медучпособие, 1965. 90 с.
2. Орлов Р.С., Ноздрачев А.Д. Нормальная физиология. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2005. 643 с.
3. Самусев Р.П., Сентябрев Н.Н. Анатомия и физиология человека. М.: АСТ, 2016. 576 с.
4. Хофер М. Рентгенологическое исследование грудной клетки. Практическое руководство/Атлас. М.: Медицинская литература, 2008. 224 с.
5. Anjilvel S., Asgharian B. A multiple-path model of particle deposition in the rat lung // *Fundam. Appl. Toxicol.* 1995. Vol. 28, №1. P.41–50.
6. De Backer J.W., Vos W.G., Burnell P., Verhulst S.L., Salmon P., De Clerck N., De Backer W. Study of the variability in upper and lower airway morphology in Sprague-Dawley rats using modern micro-CT scan-based segmentation techniques // *Anat. Rec. (Hoboken)*. 2009. Vol.292, №5. P.720–727.
7. Fleming J., Bailey D.L., Chan H.K., Conway J., Kuehl P.J., Laube B.L., Newman S. Standardization of techniques for using single-photon emission computed tomography (SPECT) for aerosol deposition assessment of orally inhaled products // *J. Aerosol Med. Pulm. Drug Deliv.* 2012. Vol.25, Suppl.1. P.29–51.
8. Human respiratory tract model for radiological protection. A report of a Task Group of the International Com-

- mission on Radiological Protection // *Ann. ICRP*. 1994. Vol.24, №1-3. P.1–482.
9. Pietzsch T., Saalfeld S., Preibisch S., Tomancak P. BigDataViewer: visualization and processing for large image data sets // *Nat. Methods*. 2015. Vol.12, №6. P.481–483.
10. Ross B. B. Influence of bronchial tree structure on ventilation of the dog’s lung as inferred from measurements of a plastic cast // *J. Appl. Physiol.* 1957. Vol.10, №1. P.1–14.
11. Schmid B., Schindelin J., Cardona, A., Longair M., Heisenberg M. A high-level 3D visualization API for Java and ImageJ // *BMC Bioinformatics*. 2010. Vol.11, №1. P.14–18.
12. Yeh H. C., Schum G. M., Duggan M. T. Anatomic models of the tracheobronchial and pulmonary regions of the rat // *Anat. Rec.* 1979. Vol.195, №3. P.483–492.

REFERENCES

1. Lukomskiy G.I., Spasskaya V.A. Atlas of bronchoscopy. Moscow: Meduchposobie; 1965 (in Russian).
2. Orlov R.S., Nozdrachev A.D. Normal physiology. Moscow: GEOTAR-Media; 2005 (in Russian).
3. Samusev R.P., Sentyabrev N.N. Human Anatomy and Physiology. Moscow: AST; 2016 (in Russian).
4. Hofer M. Chest Radiography Examination. Moscow: Meditsinskaya literatura; 2008 (in Russian).
5. Anjilvel S., Asgharian B. A multiple-path model of

particle deposition in the rat lung. *Fundam. Appl. Toxicol.* 1995; 28(1):41–50.

6. De Backer J.W., Vos W.G., Burnell P., Verhulst S.L., Salmon P., De Clerck N., De Backer W. Study of the variability in upper and lower airway morphology in Sprague-Dawley rats using modern micro-CT scan-based segmentation techniques. *Anat. Rec. (Hoboken)* 2009; 292(5):720–727.

7. Fleming J., Bailey D.L., Chan H.K., Conway J., Kuehl P.J., Laube B.L., Newman S. Standardization of techniques for using single-photon emission computed tomography (SPECT) for aerosol deposition assessment of orally inhaled products. *J. Aerosol Med. Pulm. Drug Deliv.* 2012; 25(Suppl.1):29–51.

8. Human respiratory tract model for radiological protection. A report of a Task Group of the International Com-

mission on Radiological Protection. *Ann. ICRP* 1994; 24(1-3):1–482.

9. Pietzsch T., Saalfeld S., Preibisch S., Tomancak P. BigDataViewer: visualization and processing for large image data sets. *Nat. Methods* 2015; 12(6):481–483.

10. Ross B. B. Influence of bronchial tree structure on ventilation of the dog's lung as inferred from measurements of a plastic cast. *J. Appl. Physiol.* 1957; 10(1):1–14.

11. Schmid B., Schindelin J., Cardona, A., Longair M., Heisenberg M. A high-level 3D visualization API for Java and ImageJ. *BMC Bioinformatics* 2010; 11(1):14–18. doi: 10.1186/1471-2105-11-274.

12. Yeh H. C., Schum G. M., Duggan M. T. Anatomic models of the tracheobronchial and pulmonary regions of the rat. *Anat. Rec.* 1979; 195(3):483–492.

Поступила 24.04.2017

Контактная информация

Анна Михайловна Игнатова,

кандидат технических наук, докторант, ведущий научный сотрудник,

Институт безопасности труда, производства и человека,

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,

614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29.

E-mail: iampstu@gmail.com

Correspondence should be addressed to

Anna M. Ignatova,

PhD, Leading staff scientist of Institute for Labor Safety, Production and Human,

Perm National Research Polytechnic University,

29 Komsomolsky Ave., Perm, 614990, Russian Federation.

E-mail: iampstu@gmail.com