

УДК 004.93

А.А. Дмитрук

ОБНАРУЖЕНИЕ УЗЛОВЫХ ОБРАЗОВАНИЙ В ЛЕГКОМ ПО ДАННЫМ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ

На примере задачи обнаружения узловых образований в легком по данным компьютерной томографии исследуются различные виды дескрипторов трехмерных структур, концепция поиска по группе образцов, фильтрация результатов поиска. Экспериментально установлено, что наилучшие результаты дают дескрипторы, основанные на яркостных характеристиках изображений.

Введение

В современной радиологии узловым образованием (в международной терминологии Solitary Pulmonary Nodule, SPN) называют округлое плотное образование в легком с нечеткими краями, имеющее размер менее 3 см в диаметре [1]. Указанные образования обнаруживаются примерно в 0,2 % случаев при рентгенологическом исследовании и примерно в 1 % случаев при проведении компьютерно-томографических (КТ) исследований грудной клетки.

Чаще всего описываемые новообразования оказываются доброкачественными опухолями типа гранулом или гамартом легкого. Однако примерно в 20 % случаев, особенно это касается курильщиков и/или пожилых людей, они представляют собой злокачественные опухоли. Учитывая, что рак легкого является одним из самых агрессивных видов рака с очень низким процентом выживаемости, раннее обнаружение злокачественных форм SPN и их своевременное лечение (как правило, оперативное) имеет чрезвычайно высокую важность. Известно, что в результате проведения современной, так называемой тонкосрезовой компьютерной томографии грудной клетки врачу-радиологу представляется для анализа трехмерное изображение, имеющее разрешение порядка 300–400 аксиальных слоев размером 512 × 512 вокселей каждое. Естественно, что проведение детального визуального анализа каждого слоя предполагает весьма высокую квалификацию врача-радиолога, требует серьезного напряжения и сопряжено со значительными временными затратами. На практике некоторые образования могут быть пропущены при визуальном анализе компьютерных томограмм, что может привести к тяжелым последствиям.

Учитывая острую необходимость своевременного обнаружения узловых образований в легком, задача компьютеризации процессов обнаружения и локализации SPN с целью их последующей дифференциации представляется весьма актуальной. Обзор литературы по состоянию проблемы показывает, что для решения данной задачи исследователями предлагаются различные подходы, проводятся соревнования с целью сравнения различных алгоритмов на одинаковых данных [2]. В настоящей работе представлены методы и алгоритмы на основе концепции многомерных матриц совместной встречаемости, расширенной на трехмерный случай [3, 4]. Обнаружение и локализация SPN были сформулированы как задача поиска изображений по содержанию: последовательное сканирование томограмм скользящим трехмерным окном с целью поиска участков, наиболее «похожих» на образец, который задает «типичный» вариант узлового образования размером около 2–3 см в диаметре.

1. Исследуемые виды дескрипторов трехмерной структуры узловых образований

Одной из важнейших характеристик системы поиска по содержанию является тип дескриптора изображений. Дескриптор – некоторое представление (описание) изображений базы данных, позволяющее разделять их на классы [5]. Чем лучше разделены изображения в пространстве признаков, тем лучше будут характеристики системы поиска по содержанию. Задача поиска образования сводится к последовательному сканированию скользящим окном КТ-исследования слой за слоем с целью нахождения областей, похожих на заданную.

Изображение любого объекта может рассматриваться как пространственная композиция пар пикселей. Элементы этой пары имеют определенные параметры (яркость, градиент яркости, цвет, некую семантическую метку и др.) и определенные отношения (расстояние между ними, угол между направлениями градиентов, разницу в яркости и др.). Множество пар пикселей, составляющих изображение, может быть представлено в виде матрицы совместной встречаемости с N измерениями. Каждое измерение соответствует определенному параметру или отношению.

Таким образом, N -мерная матрица совместной встречаемости представляет собой N -мерную гистограмму W с элементами w следующего вида:

$$W = \|w(P_1, P_2, \dots, P_M; O_{M+1}, O_{M+2}, \dots, O_N)\|,$$

где P_i принимает все возможные значения параметра i , а O_j – все возможные значения отношения j . Значение элемента матрицы w представляет собой количество пар (частоту встречаемости) пикселей с заданной комбинацией параметров и отношений. Значения параметров и отношений квантуются, т. е. осуществляется переход от их исходных значений к относительно небольшому числу (обычно в пределах 8–32) квантов или номеров интервалов (уровней) [2].

Согласно нашим оценкам, искомое трехмерное образование имеет шарообразную форму диаметром около 30 пикселей (соответствует примерно 3 см) и занимает пять слоев по оси сканирования.

В настоящей статье в качестве элементарной структуры рассматривается группа пикселей, которые расположены в определенном порядке одновременно на пяти соседних слоях окна, которым сканируется КТ-изображение. Элементарные структуры покрывают все сканирующее окно и занимают все возможные положения. Множество групп пикселей, составляющих описываемую часть изображения, может быть представлено в виде N -мерной матрицы совместной встречаемости. Такая матрица, по сути, представляет собой N -мерную гистограмму, элементами которой являются частоты встречаемости групп пикселей с заданными характеристиками. Элементы матрицы, выписанные в виде вектора, который обычно называют *вектором признаков*, будут некоторым образом описывать содержание изображения.

В качестве элементарной структуры рассматривались различные модификации обобщенной матрицы совместной встречаемости, расширенной на трехмерный случай (рис. 1). На каждом из пяти слоев имеется центральный пиксел C и один или два пиксела на расстоянии D от центрального пиксела с углом между центральным и двумя пикселами на окружности A или углом A_c между точкой на окружности и осью X . Все пять слоев в совокупности образуют элементарную структуру дескриптора.

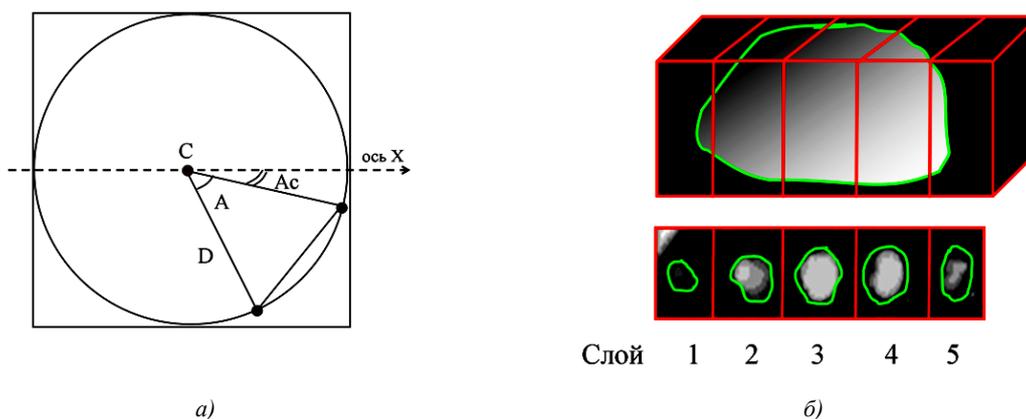


Рис. 1. Трехмерная элементарная структура матрицы совместной встречаемости для описания узловых образований на КТ-исследованиях: а) один из пяти слоев (вид сверху); б) искомое образование внутри трехмерной элементарной структуры

В качестве возможных размерностей матрицы тестировались различные свойства пикселей и их комбинации: яркость и абсолютная величина градиента пиксела, расстояние между центральным и текущим пикселом на окружности для данного слоя, угол между центральным пикселом и пикселами на окружности, разность яркостей и расстояний между пикселами.

Введем следующие обозначения:

I – яркость пиксела на окружности;

D – расстояние от текущей точки сканирующего окна до центра;

D_c – расстояние от текущей точки на окружности до центра;

ΔD – расстояние между двумя текущими точками на окружности;

A_c – угол между текущей точкой и осью;

ΔI – разность яркостей двух текущих точек на окружности;

ΔI_c – разность яркостей между текущей и центральной точками;

G – градиент пиксела на окружности;

G_t – пороговое значение градиента пиксела на окружности: $G_t = \begin{cases} 1, & G \geq \text{threshold} \\ 0, & G < \text{threshold} \end{cases}$;

A – угол между двумя текущими точками на окружности;

A_c – угол между текущей точкой на окружности и осью X .

Индекс c обозначает центральный пиксел (либо разность между центральной точкой и текущей), переменные без индекса c – точки на окружности. Знак Δ обозначает разность между величинами. Все абсолютные значения углов квантизованы на 12 интервалов (по 30° каждый), а остальные характеристики пикселов – на 16. Редуцирование числа возможных значений параметров позволяет уменьшить влияние шума и существенно сократить размер дескриптора.

Условно все дескрипторы можно разделить на две группы в зависимости от числа точек на окружности (табл. 1).

Таблица 1
Типы дескрипторов, предложенные для поиска узловых образований

Номер дескриптора	Формула
Одна точка на окружности	
1	$I - D_c$
2	$I - D_c - A_c$
3	$I - D_c - \Delta I_c$
4	$I - D_c - G$
5	$\Delta I_c - D_c$
9	$G_t - D_c$
10	$G_t - I - D_c$
12 (аналог 1)	$I - D$
Две точки на окружности	
6	$\Delta I - D_c - A$
7	$\Delta I - D_c - \Delta D$
8	$G - G - D_c$
11	$I - I - D_c$
13 (аналог 11)	$I - I - D$

Следует отметить, что во всех дескрипторах, кроме номеров 12 и 13, рассматриваются пикселы на окружностях с радиусами от 0 до половины ширины сканирующего окна. В трехмерном пространстве эта область соответствует цилиндру. В дескрипторах 11 и 13 рассматривается встречаемость пар пикселов на окружности на противоположных сторонах окружности.

Поскольку при подсчете дескриптора рассматривается совместная встречаемость пикселов на различных расстояниях от центра, их общее число для разных расстояний будет различным. На рис. 2 значения пикселов содержат величину удаления от центра.

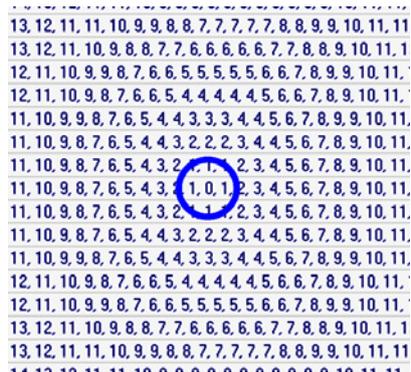


Рис. 2. Пиксели на разном расстоянии от центра одного из слоев изображения

Чем больше радиус, тем большее число пикселей будет на нем находиться. Для учета вклада элементов дескриптора были внесены весовые коэффициенты, равные количеству пикселей на данном радиусе. Коэффициенты соответственно равны 1, 8, 12, 16, 32, 28, 40, Впоследствии, при сравнении матриц, каждый элемент на данном расстоянии делится на это число. Такое действие уравнивает вклад пикселей на разных расстояниях от центра.

2. Исходные компьютерно-томографические данные

Для оценки способности дескриптора находить узловые образования была создана соответствующая база из 908 КТ-изображений. В базе изображений использовались данные по больным с обнаруженными периферическими заболеваниями легкого. Результаты обследования представляли собой трехмерное КТ-изображение, размер каждого слоя 512×512 пикселей, 16 бит яркости. Количество слоев варьировалось, в каждом томе было не менее 75 срезов с шагом 5 мм. База содержала данные обследований 60 пациентов (40 мужчин и 20 женщин) в возрасте от 27 до 83 лет. Врачом-диагностом было отмечено 122 образования, из них 35 доброкачественных, 69 злокачественных. Для оставшихся образований характер поражения ткани не определен.

Что касается узловых образований легкого опухолевой и неопухолевой природы на предоставленных КТ-изображениях органов грудной полости, то их размер варьируется в достаточно широком диапазоне – от 5 до 60 мм. Для экспериментов по поиску были отобраны 16 шаровидных образований (табл. 2).

Таблица 2

База из 16 узловых образований, принадлежащих тестовой базе данных КТ-изображений

Диаметр, мм	Изображение (пять соседних слоев)	Диаметр, мм	Изображение (пять соседних слоев)
15		21	
16		23	
17		23	
17		26	
19		27	
20		30	
20		30	
21		30	

3. Выбор эффективного типа дескриптора трехмерной структуры узловых образований

Изначально для всех изображений рассчитываются их дескрипторы (векторы признаков). Сравнение изображений заключается в подсчете расстояния (L_1 -нормы) между их векторами признаков. Дескриптор в виде матрицы совместной встречаемости был посчитан для каждого изображения одним из 13 описанных выше способов. Дополнительно рассматривался вариант с нормализацией дескриптора. Таким образом, было проведено 26 экспериментов по поиску образований. В качестве запроса последовательно выступало каждое изображение. Результатом являлось число найденных изображений нужного класса (узловое образование) среди первых 20 результатов.

Из графиков на рис. 3 видно, что наилучшим разделительным свойством обладают дескрипторы, в которых рассматривается совместная встречаемость яркостных характеристик пикселей на разных расстояниях от центра сканирующего окна (1N, 12N, 13N). Это позволяет сделать вывод, что яркостные, а не градиентные или разностные характеристики пикселей являются наиболее информативными для данной задачи. Кроме того, нормализованные версии дескрипторов во всех случаях показывали лучшее качество поиска, чем их ненормализованные версии.

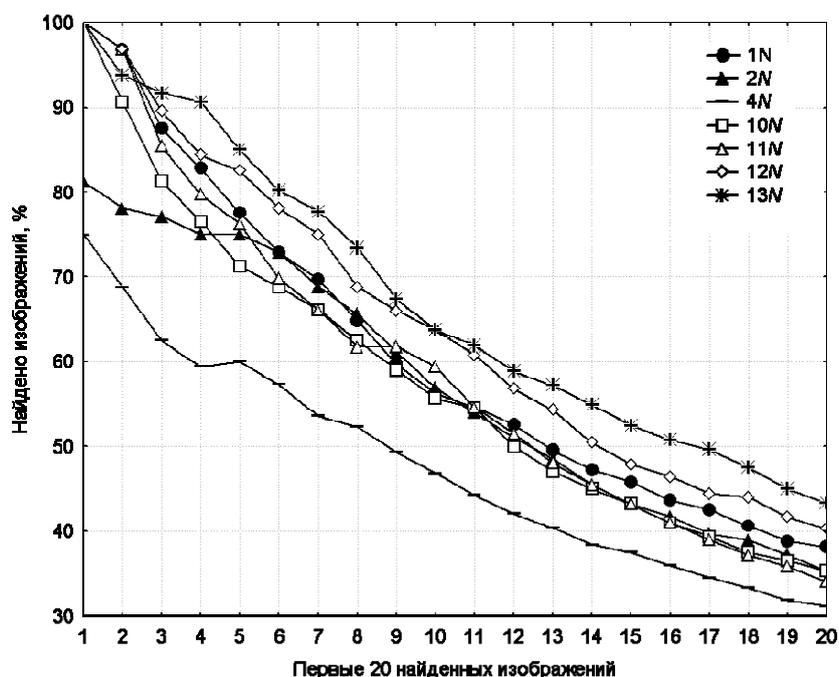


Рис. 3. Процент правильно найденных узловых образований в тестовой базе данных по образцу в зависимости от типа дескриптора (показаны семь наиболее эффективных нормализованных дескрипторов)

4. Использование концепции «поиск по группе»

В некоторых ситуациях концепция поиска по образцу не может быть применима. Примером является поиск некоторого класса изображений, имеющих высокую степень вариабельности в пространстве признаков. В таком случае образец для поиска, заданный центроидом класса (центром масс), может оказаться ближе к противоположному классу изображений. Более того, изображений, соответствующих искусственно полученному центриду, может вообще не существовать в природе. В описанной ситуации можно перейти от одного изображения-образца к группе изображений. Задача поиска по группе изображений сводится к нахождению минимального расстояния D до группы изображений. В общем случае оно может быть записано следующим образом:

$$D = \frac{\sum d_n}{n},$$

где n – число образцов в группе.

Разделив общее расстояние от образца до группы элементов на их число, делаем расстояние независимым от числа элементов в группе. В таком представлении задача поиска по группе представляет собой серию простых поисков по одному образцу. Вычислительная сложность прямо пропорционально зависит от числа образцов в группе. Этот вид поиска позволяет учитывать вариативность изображений некоторого класса.

Для оценки выигрыша от использования концепции «поиск по группе» была проведена следующая серия экспериментов. В ней из числа узловых образований были выбраны три образца в качестве группы для поиска. Поиск представлял собой нахождение минимального расстояния (L_I -нормы) от текущего сканируемого изображения до всех изображений группы, состоящей из трех образцов. Оценивалось число правильно найденных образований среди первых 20 результатов для каждого из 26 типов дескрипторов.

По результатам экспериментов пять типов дескрипторов: $1N$, $10N$, $11N$, $12N$, $13N$ – показали наилучшие результаты поиска по группе. До первых семи результатов поиска они показали идеальное качество поиска. Оценить выигрыш от использования концепции поиска по группе вместо концепции поиска по образцу можно на рис. 4.

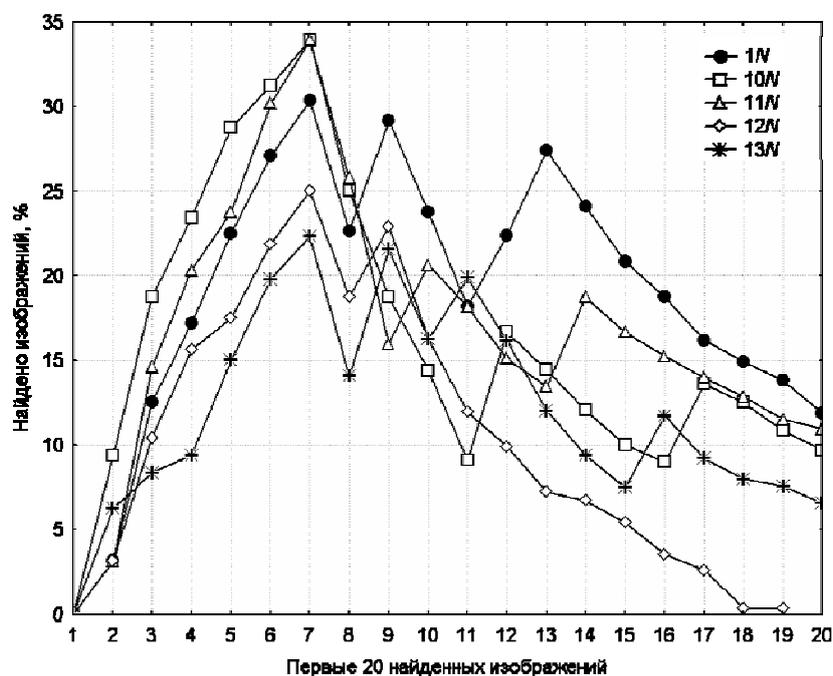


Рис. 4. Разность в проценте правильно найденных узловых образований в тестовой базе данных при поиске по группе из трех образцов и при поиске по одному образцу в зависимости от типа дескриптора (показаны наиболее производительные типы дескрипторов)

В целом при поиске по группе качество поиска оказалось лучшим. Это может быть обусловлено следующими причинами:

1. Использование в качестве образца для поиска группы изображений позволяет учитывать естественную вариативность объектов для поиска и тем самым улучшить результаты.
2. При поиске по группе число искомых изображений уменьшается с 16 до 13, что, естественно, оказывает влияние на результаты.

Вместе с тем существенного прироста при использовании исследуемого подхода не наблюдается.

Среди пяти выбранных дескрипторов наибольший интерес в плане вычислительной емкости вызывают дескрипторы $1N$ и $13N$. Их отличием является то, что в дескрипторе $13N$ рассматриваются пиксели всего сканирующего окна, а в дескрипторе $1N$ – только пиксели внутри круга, вписанного в квадратное окно. Пороговые значения расстояний, по которым можно относить объект, находящийся внутри сканирующего окна, к классу образований, представлены в табл. 3.

Таблица 3
Минимальные и максимальные L_1 -расстояния от группы трех изображений-образцов до изображений, относящихся к образованиям и не образованиям

Дескриптор	Подвыборка	Мин. расстояние до группы	Макс. расстояние до группы
2N	13 образований	43,5116	103,8793
	892 не образований	83,6527	160,0000
16N	13 образований	52,9791	125,8688
	892 не образований	103,7001	220,0000

Из таблицы видно, что классы образований и не образований перекрываются, поэтому при высокой точности поиска неизбежно будут возникать ошибки первого рода – система будет находить образования, которые таковыми не являются. Поскольку дескрипторы не дают 100 % разделения образцов на классы, при реализации алгоритма необходимо использовать пред- и постобработку результатов, исключающую заведомо ложные случаи срабатывания алгоритма.

5. Фильтрация результатов поиска в окрестности

При сканировании трехмерным скользящим окном часто в результатах оказываются изображения одной и той же окрестности, но со сдвигом на несколько пикселей (рис. 5, в). В результате поиска количество найденных изображений, являющихся, по сути, идентичными, значительно возрастает.

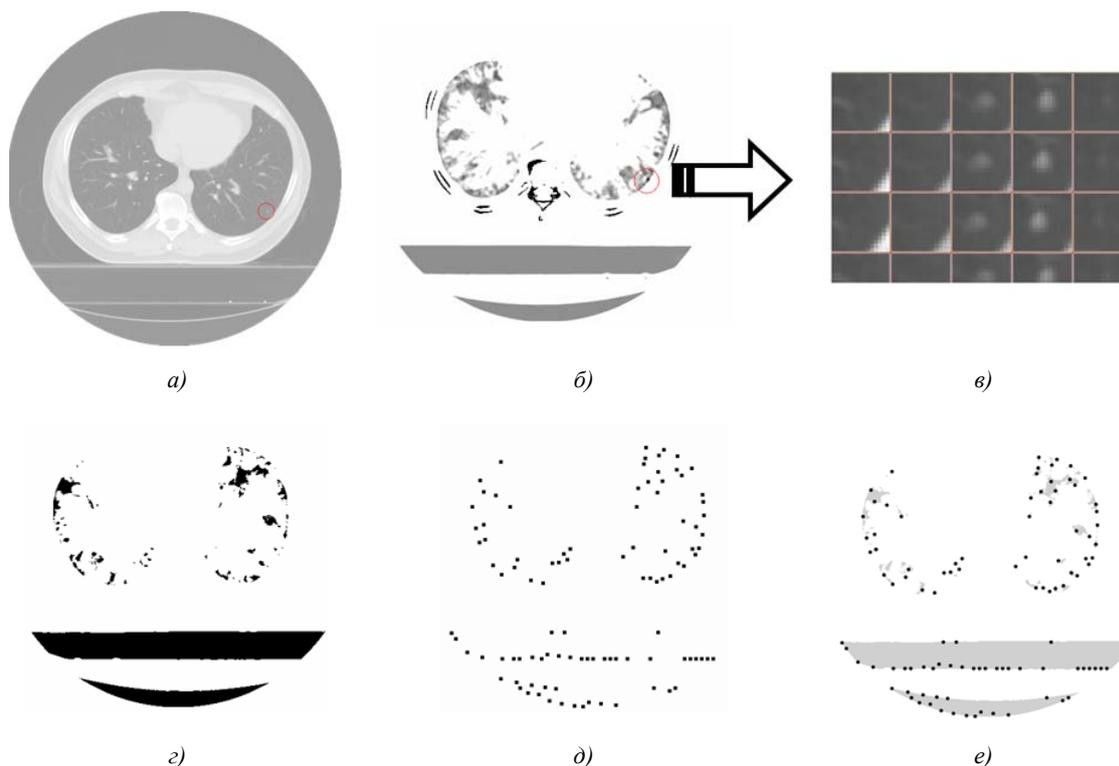


Рис. 5. Общая схема фильтрации результатов поиска в окрестности: а) один из слоев КТ-исследования с отмеченной областью интереса, содержащей образование-запрос; б) карта схожести, полученная после поиска по образцу; в) практически идентичные результаты в окрестности после сканирования скользящим окном; г) необработанные результаты поиска по образцу (области черного цвета); д) результаты поиска по образцу (черные точки) после обработки; е) результаты поиска по образцу до (серые области) и после (черные точки) обработки

Рассмотрим результаты поиска по образцу, при котором образцом выступает часть изображения размером 15×15 пикселей (рис. 5, а). После сканирования всего слоя получим карту вероятности нахождения узловых образований на изображении (рис. 5, б). При некотором пороговом значении меры схожести имеем 21 248 результатов поиска, которые видны как области черного цвета (рис. 5, в).

Для того чтобы уменьшить количество идентичных результатов и тем самым преодолеть подобный негативный эффект, было предложено осуществить обработку результатов поиска с целью их объединения в некоторой окрестности. Обработка представляет собой свертку фильтром 7×7 с той лишь разницей, что минимум из всех 49 пикселей окрестности записывается не в центр, как обычно, а остается на своем месте [6]. Остальным пикселям присваивается некоторое заведомо большее значение. Результат обработки показан на рис. 5, д. Число результатов поиска уменьшилось с 21 248 до 102 наилучших (рис. 5, е).

6. Программная компонента поиска узловых образований

Функция обнаружения узловых образований была реализована как в виде отдельной программы, так и в виде подключаемого модуля (динамической библиотеки). При анализе исследования модуль возвращает координаты найденных образований (X, Y, Z). При этом в качестве образца для поиска используется заранее посчитанный по типичному узловому образованию дескриптор.

Единственным параметром, влияющим на результаты поиска, является пороговое значение, по которому текущая область изображения классифицируется как образование. Учитывая некоторую унифицированность томографических изображений (яркости всегда находятся в шкале Хаунсфилда), данное пороговое значение может быть заранее заданным для всех томографических изображений. Таким образом, разработанный программный модуль может функционировать в автоматическом режиме. В результате его работы будут автоматически найдены узловые образования размером около 3 см (рис. 6). В результате первых экспериментов по поиску узловых образований в легком было найдено 27 из 37 образований, что составляет 73 %. Алгоритм является базовым и требует дальнейшей пред- и постобработки результатов поиска для практического применения в медицинской практике.

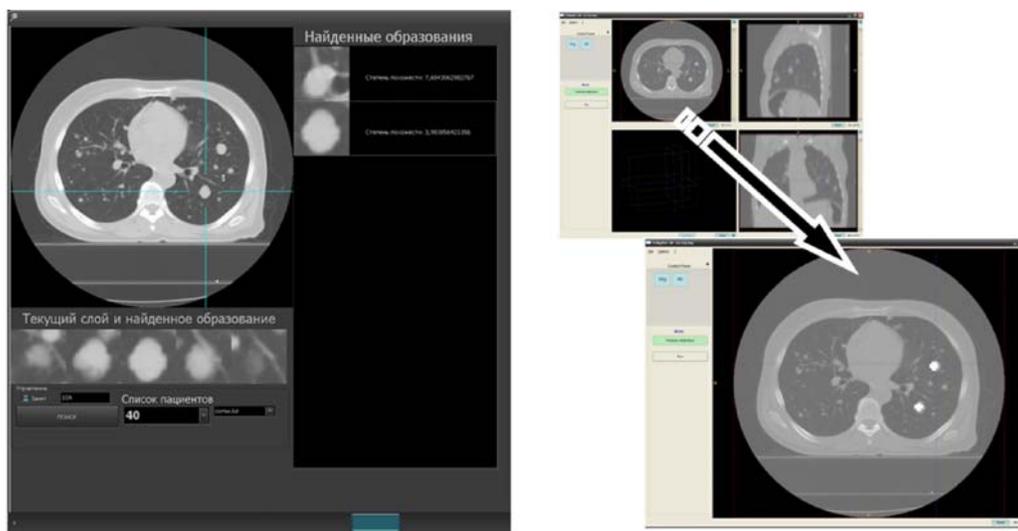


Рис. 6. Варианты графического пользовательского интерфейса программы обнаружения узловых образований на томографических исследованиях

Заключение

Разработан метод поиска узловых образований опухолевой или неопухолевой природы по трехмерным КТ-изображениям грудной клетки. Метод основан на использовании концепции многосортных матриц совместной встречаемости, расширенной на трехмерный случай. Проведение

но тестирование 26 типов дескрипторов для задачи нахождения узловых образований. Проведены эксперименты с поиском как по одному образцу, так и по группе образцов. Предлагается использовать дескрипторы, учитывающие яркостные характеристики изображений, а также концепцию поиска по группе. При реализации алгоритма необходимо использовать пред- и постобработку результатов, исключая заведомо ложные случаи срабатывания алгоритма.

Список литературы

1. Winer-Muram, H.T. The solitary pulmonary nodule / H.T. Winer-Muram // Radiology. – 2006. – Vol. 239. – P. 34–49.
2. Comparing and combining algorithms for computer-aided detection of pulmonary nodules in computed tomography scans: the ANODE09 study / B. van Ginneken [et al.] // Medical Image Analysis. – 2010. – Vol. 14. – P. 707–722.
3. Kovalev, V. Texture anisotropy in 3-D images / V. Kovalev, M. Petrou, Y. Bondar // IEEE Transactions on Image Processing. – 1999. – Vol. 8, № 3. – P. 346–360.
4. Ковалев, В.А. Анализ структуры трехмерных медицинских изображений / В.А. Ковалев. – Минск : Беларуская навука, 2008. – 263 с.
5. Chang, P. Object Recognition with Color Cooccurrence Histograms / P. Chang, J. Krumm // Computer Vision and Pattern Recognition. – 1999. – Vol. 2. – P. 498–504.
6. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB / Р. Гонсалес, Р. Вудс, С. Эддинс. – М. : Техносфера, 2006. – 616 с.

Поступила 17.11.10

*Объединенный институт проблем
информатики НАН Беларуси,
Минск, Сурганова, 6
e-mail: dmitruk@newman.bas-net.by*

A.A. Dmitruk

DETECTING SOLITARY PULMONARY NODULES IN CT IMAGES

The paper is dedicated to the study of nodule detection problem in computer tomography. Different types of descriptors for three-dimensional structures are investigated. The «Searching by image group» concept is introduced and enhancing of retrieval results by a filtration algorithm is suggested. Comparative assessments of retrieval results revealed that the best type of features is the intensity-based nodule descriptors.