

ИЗМЕРЕНИЕ КАРДИТОРАКАЛЬНОГО ИНДЕКСА НА ФЛЮОРОГРАФАХ СЕРИИ ПРОСКАН

В.М. Кораблев
ЗАО РЕНТГЕНПРОМ, Москва

Предложен алгоритм идентификации диафрагмы, контура грудной клетки и сердца, задействованный в программном обеспечении флюорографов серии ПроСкан для количественной оценки кардиоторакального индекса пациентов в автоматическом режиме, не требующем каких-либо дополнительных действий со стороны врача. По результатам обработки в автоматическом режиме рентгеновских изображений грудной клетки 1000 мужчин и 1000 женщин представлены распределения зависимости от возраста поперечного размера сердца, грудной клетки и кардиоторакального индекса. По тестовой группе пациентов, выбранной случайным образом, определена эффективность визуальной оценки кардиоторакального индекса врачом и эффективность правильного вычисления в автоматическом режиме.

Ключевые слова: кардиоторакальный индекс, сердце, контур грудной клетки, диафрагма, цифровой флюорограф

Введение

Рентгеновские изображения грудной клетки в прямой проекции, полученные при серийном флюорографическом обследовании населения, часто являются первым показателем кардиомегалии и возможного заболевания сердца. Кроме того, рентгеновские изображения оказывают большую помощь в оценке характера и причины увеличения сердца.

Заключение врача-кардиолога об увеличении размеров сердца, как правило, основывается на визуальной оценке, базирующейся на опыте врача и его представлении о том, каким должно быть нормальное сердце. Хорошей вспомогательной информацией для врача кардиолога была бы количественная оценка размеров сердца. Одной из количественных оценок размеров сердца, которую можно получить по оцифрованному изображению грудной клетки в прямой проекции, является кардиоторакальный индекс.

В описаниях функциональных возможностей действующих и продаваемых на рынке рентгеновских аппаратов (как отечественных,

так и зарубежных) опция, связанная с оценкой кардиоторакального индекса, не представлена.

В данной работе изложен задействованный в программное обеспечение флюорографов ПроСкан алгоритм идентификации в автоматическом режиме (без участия врача) диафрагмы, контура грудной клетки и сердца для вычисления кардиоторакального индекса. Представлены результаты обработки с применением этого алгоритма рентгеновских изображений грудной клетки 1000 мужчин и 1000 женщин.

О кардиоторакальном индексе

Под кардиоторакальным индексом (КТИ) понимается [1, 2] отношение (в процентном исчислении) максимального проекционного поперечного размера сердца в передне-задней проекции к поперечному размеру грудной клетки на уровне диафрагмы, отделяющей легкие от внутренних органов.

На рис. 1 приведен пример рентгеновского изображения с флюорографа ПроСкан



Рис. 1. Рентгеновское изображение грудной клетки пациента после программной идентификации формы сердца и контура грудной клетки на уровне диафрагмы. В рамке приведена численная оценка кардиоторакального индекса и ее погрешность

грудной клетки пациента после программной (в автоматическом режиме) идентификации формы сердца (боковые силуэты сердца обозначены квадратами) и контура грудной клетки (боковые силуэты грудной клетки) на уровне диафрагмы. По координатам левого и правого перекрестий, выделенных на контуре грудной клетки на уровне диафрагмы, вычисляется поперечный размер грудной клетки. По координатам левого и правого перекрестий, выделенных на боковых силуэтах сердца, вычисляется поперечный проекционный размер сердца. КТИ в процентном исчислении (отношение поперечного размера сердца к поперечному размеру грудной клетки) приведен в рамке, расположенной чуть выше обозначенного силуэта сердца. Здесь же приведена и погрешность оценки КТИ. Два центральных перекрестья на позвоночнике лежат на осевой линии центра тяжести проекционной плотности костной ткани позвоночника (эта линия не всегда совпадает с осевой линией визуальной симметрии позвоночника). Вертикальные координаты этих двух пере-

крестий совпадают с вертикальными координатами левого и правого перекрестий, выделенных на боковых силуэтах сердца.

По данным [1] средняя величина КТИ максимальна у новорожденных (порядка 57 %) и постепенно снижается до 45 % к возрасту 6 лет. Выше 6-летнего возраста средняя величина КТИ индекса не превышает 50 %. Большинство рентгенологов считают верхней границей нормы КТИ величину 50 % [2, 3].

В то же время в ходе обследования здоровых мужчин европейской, азиатской и афро-американской расы установлено, что КТИ превышает 50 % у европейцев в 2 % случаев, у азиатов – в 4 % случаев, у афро-американцев в 9 % случаев [4]. Из этих данных следуют два вывода:

1. Для выборки здоровых людей существует определенная вероятность превышения КТИ границы 50 %.
2. Доля здоровых людей с КТИ выше 50 % различна для людей разной национальности.

Алгоритм идентификации диафрагмы, контура грудной клетки и сердца

Позвоночник

На первом этапе по оцифрованной информации рентгеновского изображения грудной клетки пациента выделяется позвоночный столб по признаку максимальной проекционной плотности, или (что пропорционально плотности) по признаку максимального логарифмического ослабления излучения L в $1/3$ центральной части изображения по горизонту.

$$L = \ln \left\{ \frac{I_0}{I} \right\} = \max. \quad (1)$$

I_0 – интенсивность падающего на пациента рентгеновского излучения, I – интенсивность прошедшего сквозь тело пациента излучения.

Диафрагма

Справа от позвоночного столба пациента (на рентгеновском снимке ПроСкан это слева) диафрагма имеет более однородное фоновое сопровождение внутренних органов, поэтому ее граница выделяется именно на этой стороне на расстоянии 8 см от позвоночника. Обозначим вертикальную координату на изображении как y , кривизну функции $L(y)$ по координате y как

$C(y)$. Признаком, по которому определяется граница диафрагмы, заключается в выполнении одновременно трех условий:

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial y} < 0, \\ C(y) = \frac{\partial^2 L / \partial y^2}{(1 + (\partial L / \partial y)^2)^{\frac{3}{2}}} > 0, \\ C(y) = \frac{\partial^2 L / \partial y^2}{(1 + (\partial L / \partial y)^2)^{\frac{3}{2}}} = \max. \end{aligned} \quad (2)$$

Контур грудной клетки

Контур грудной клетки выделяется при движении вправо и влево от позвоночника, начиная с отступления от оси позвоночника на ± 8 см. Обозначим горизонтальную координату на изображении как x , кривизну функции $L(x)$ по координате x как $C(x)$. Признаком, по которому идентифицируется контур грудной клетки, предполагает выполнение одновременно двух условий:

$$\begin{aligned} L(x) = \max, \\ C(x) = \frac{\partial^2 L / \partial x^2}{(1 + (\partial L / \partial x)^2)^{\frac{3}{2}}} < 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Контур сердца

Время сканирования узким пирамидальным рентгеновским пучком тела пациента на флюорографе ПроСкан составляет ~ 6 с. Средний проекционный поперечный размер сердца составляет ~ 14 см, поле снимка по временной развертке пучка составляет ~ 40 см. Это означает, что время сканирования сердца составляет примерно 2 с, т.е. сердце производит в среднем два сердцебиения за период его сканирования. В связи с этим оказалось довольно трудной задачей подобрать способ выделения контура сердца.

Критерий для выделения контура сердца был определен простым перебором множества различных вариантов. В итоге оптимальным оказался вариант использования граничной величины логарифмического ослабления излучения. Состоит он в следующем. Для каждого пациента определяется величина минимального логарифмического ослабления излучения по полю правого (L_1^{\min}) и левого (L_2^{\min}) легкого. Далее, для получения граничных величин логарифмического ослабления излучения, к величинам L_1^{\min} и L_2^{\min} добавляются константы, одинаковые для всех пациентов.

$$L_1^b = L_1^{\min} + c_1, \quad L_2^b = L_2^{\min} + c_2. \quad (4)$$

Правый и левый контуры сердца определяются при движении вправо и влево от оси позвоночника с использованием признака соизмеримости логарифмического ослабления излучения с граничным значением:

$$L_1 \approx L_1^b, \quad L_2 \approx L_2^b. \quad (5)$$

Анализ обработки рентгеновских изображений

При обработке в автоматическом режиме рентгеновских изображений грудной клетки 1000 мужчин и 1000 женщин оценку КТИ удалось сделать для 1000 мужчин и 994 женщин.

Средние значения $\langle \rangle$ (плюс/минус стандартные отклонения σ) распределений по поперечному размеру грудной клетки, поперечному размеру сердца и КТИ для мужчин и женщин приведены в табл. 1.

Численные данные табл. 1 по поперечному размеру грудной клетки и сердца согласуются с ожидаемым результатом: поперечный размер грудной клетки и сердца у мужчин в среднем больше, чем у женщин. То, что КТИ у женщин в среднем выше, чем у мужчин, объясняется скорее всего отличием физиологии строения тела у мужчин и женщин, нежели какими-либо другими причинами. Величина средней погрешности оценки КТИ и у мужчин, и у женщин составляет ~ 1 %.

На рис. 2 приведены зависимости от возраста поперечного размера грудной клетки (верхний ряд), сердца (средний ряд) и КТИ (нижний ряд). Левая колонка графиков – зависимости для мужчин, правая колонка – для женщин. Сплошными линиями показан ре-

Таблица 1
Поперечный размер грудной клетки, сердца и величина КТИ

	Мужчины	Женщины
	$\langle \rangle \pm \sigma$	$\langle \rangle \pm \sigma$
Грудная клетка, см	$32,9 \pm 2,6$	$29,3 \pm 2,4$
Сердце, см	$15,1 \pm 2,2$	$14,0 \pm 2,1$
КТИ, %	$45,9 \pm 6,3$	$47,7 \pm 6,5$

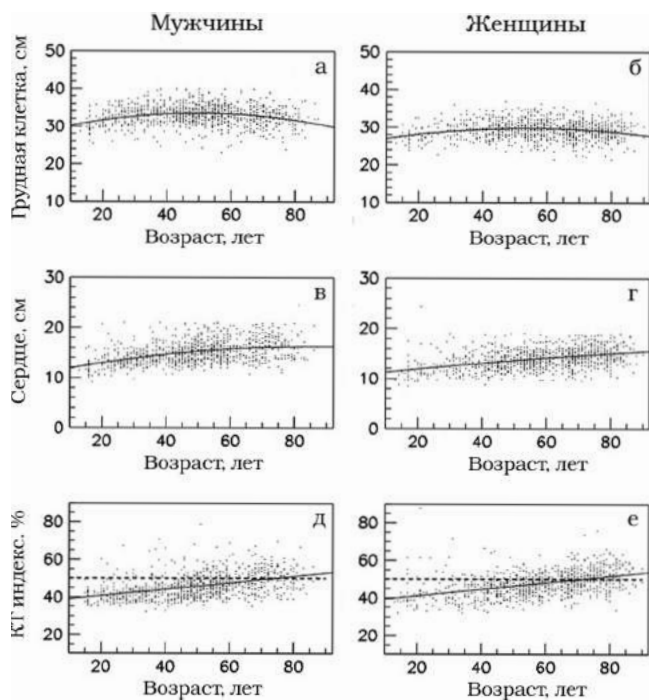


Рис. 2. Графики зависимости от возраста мужчин и женщин поперечного размера грудной клетки (а, б), сердца (в, г) и КТИ (д, е). Сплошными линиями показан результат аппроксимации по точкам квадратичной функцией для поперечного размера грудной клетки и сердца и линейной функцией – для КТИ. Пунктирными линиями показана 50 %-ая граница КТИ

зультат аппроксимации по точкам. Зависимости поперечного размера грудной клетки и сердца хорошо описываются квадратичной функцией, а зависимости КТИ – растущей линейной функцией. Пунктирные линии на нижних графиках показывают 50 %-границу КТИ. И у мужчин, и у женщин средняя величина КТ индекса пересекает 50 %-границу в возрасте ~70 лет.

На рис. 3 приведена зависимость КТИ от возраста: данные для детей в возрасте от 0 до 6 лет, отмеченные метками в виде черных квадратов, взяты из [5]; метки в виде черных (для мужчин) и белых (для женщин) кружков соответствуют результатам данной работы. Для описания поведения КТИ в зависимости от возраста взята асимптотическая функция (показана сплошной линией). Минимум средней величины КТИ по этому графику приходится на подростковый возраст 13–14 лет. Для объективности следует отметить, что на графике недостает данных из других работ по поведению КТИ в интервале от 10 до 90 лет. Поиск этих данных ведется.

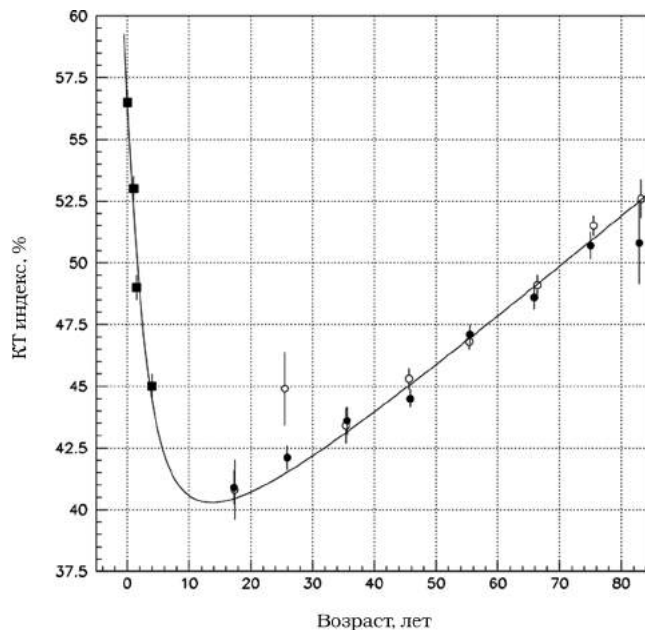


Рис. 3. Зависимость КТИ от возраста по результатам работы [5] (для детей – метки в виде черных квадратов) и данной работы (для мужчин – метки в виде черных кружков, для женщин – метки в виде белых кружков). Сплошная линия, описывающая зависимость КТИ от возраста, взята в виде асимптотической функции

Эффективность корректного определения КТИ

По случайной выборке из 43 пациентов была определена эффективность получения корректной оценки КТИ врачом и эффективность получения правильного численного значения КТИ программным (в автоматическом режиме) образом.

Врач дважды просматривал 43 изображения грудной клетки пациентов и давал визуальную оценку КТИ по признаку: *N* – норма, *M* – промежуточное состояние между нормой и патологией, *P* – патология. В отличие от численных значений КТИ, получаемых в автоматическом режиме обработки рентгеновского изображения, признаки *N*, *M* и *P*, даваемые врачом, но не имеющие количественного исчисления, будем называть оценками КТИ. Интервал между двумя просмотрами врача составил 3 недели, поэтому можно считать, что оценки первого и второго просмотров независимы. Количество совпадений оценок в пер-

вом и втором просмотре составило 36, количество несовпадений 7.

Обозначим величиной ε эффективность правильной врачебной оценки КТИ, величиной $p=36/43$ – вероятность совпадений оценок КТИ при двух независимых просмотрах. Эти величины связаны соотношением:

$$p = p\varepsilon^2 + (1-\varepsilon)^2. \quad (6)$$

В правой части (6) первое слагаемое ε^2 означает вероятность совпадения правильных оценок КТИ, второе слагаемое $(1-\varepsilon)^2$ вероятность совпадения неправильных оценок КТИ. Решение (6) относительно ε дает $\varepsilon=0,91\pm 0,12$. Таким образом, эффективность получения правильной оценки КТИ врачом при визуальном осмотре рентгеновского изображения составляет в процентном исчислении $91\pm 12\%$. Здесь и далее погрешности величины эффективности вычисляются по правилу переноса ошибок [6] в предположении пуассоновских \sqrt{N} флуктуаций количества правильных и неправильных исходов.

При обработке 43 изображений в автоматическом режиме установлено, что в 36 случаях из 43 и диафрагма, и контур грудной клетки, и форма сердца определены правильно. В остальных 7 случаях имеются дефекты идентификации, которые визуально легко определяются любым человеком (не обязательно врачом). Таким образом, эффективность корректного вычисления КТИ в автоматическом режиме по выборке из 43 пациентов составила в процентном исчислении величину $84\pm 19\%$. Эта величина никак не коррелирует с оценкой $91\pm 12\%$, полученной для врача. Использование, как и для врача, вероятностной процедуры определения эффективности корректного вычисления КТИ в автоматическом режиме неприемлемо, поскольку при любом повторном вычислении КТИ в автоматическом режиме их численные значения не меняются.

Чтобы проверить, насколько численные оценки КТИ, полученные в автоматическом режиме, соответствуют визуальным оценкам КТИ, полученным врачом, было сделано следующее. Из исходной статистики, обработанной в автоматическом режиме, удалены 7 случаев, в которых имеются какие-либо недостатки при восстановлении либо диафрагмы, либо грудной клетки, либо сердца. Оставшиеся 36 пациентов разделены на две группы относительно 50 %-ой границы КТИ: если

численное значение КТИ ниже 50 % – дается признак N , если выше 50 % – признак P . Далее из статистики 36 пациентов удалены 11 пациентов, которым врач либо в первом, либо во втором просмотре дал промежуточную оценку M , то есть не смог надежно отнести этих пациентов либо к группе N , либо к P . При эффективности правильной оценки КТИ врачом $\varepsilon=0,91$ вероятность того, что в оставшейся выборке из 25 человек будут присутствовать пациенты с неправильно определенными врачом признаками N или P , составляет $(1-\varepsilon)^2=0,008$ (менее 1 %). То есть для данной выборки в 25 пациентов врач дал правильное (практически с единичной вероятностью) заключение о состоянии сердца. Для этой выборки пациентов количество совпадений по признаку N и P по оценке врача и в автоматическом режиме составило 25 (100 % совпадение).

Полученный результат дает основания полагать, что в случаях, когда после автоматической обработки рентгеновского изображения у врача нет претензий к правильности выделения диафрагмы, грудной клетки и сердца, численное значение КТИ определено программным образом правильно.

Хотя эффективность правильной визуальной оценки КТИ, данной врачом (91 %), в среднем выше эффективности корректного вычисления КТИ программным образом (84 %), преимущество программного вычисления КТИ индекса состоит в следующем:

1. Оценка врача не является количественной оценкой КТИ и с вероятностью 9 % может быть ошибочной для данного пациента.
2. Количественная оценка КТИ, полученная в автоматическом режиме, при отсутствии нареканий со стороны врача к выделению диафрагмы, грудной клетки и сердца с вероятностью 100 % верна для данного пациента.

Выводы

1. Изложен алгоритм, позволяющий в автоматическом режиме (без участия врача) по оцифрованной информации рентгеновского изображения грудной клетки производить идентификацию диафрагмы, контура грудной клетки и сердца для вычисления КТИ пациента.
2. Получена оценка эффективности правильной идентификации органов, соответствен-

- но, эффективности правильного измерения КТИ в автоматическом режиме. Эта оценка в процентном исчислении составляет 84 ± 19 %.
3. Задействованный в программное обеспечение флюорографов ПроСкан способ измерения КТИ в автоматическом режиме расширяет функциональные возможности флюорографов и является хорошим вспомогательным инструментом для работы врачей-кардиологов.
 2. <http://www.serdechno.ru/children/rent/1654.html>.
 3. <http://lekmed.ru/bolezni/bolezni-serdechno-sosudistoy-sistemy/kardiomegaliya-3.html>.
 4. Nickol K., Wade A.J. Radiographic heart size and cardiothoracic ratio in three ethnic groups: a basis for a simple screening test for cardiac enlargement in men // Brit. J. Radiol. 1982. Vol. 55. № 654. P. 399–403.
 5. <http://www.mypacs.net/cases/CARDIOTHORACIC-INDEX-864610.html>.
 6. Hudson D.J. Lectures on Elementary Statistics and Probability. Geneva, 1964.

Список литературы

1. http://www.radiologie.insel.ch/fileadmin/drnn/dmn_users/paediatrischeradiologie/Pdf/Cardiothoracic Index.pdf.

MEASUREMENT OF THE CARDIOTHORACIC INDEX AT THE SERIES PROSCAN FLUOROGRAPHES

V.M. Korablev

ROENTGENPROM JSC, Moscow, Russia

The paper describes the algorithm for identifying the diaphragm, contour of the chest and heart involved in the software at fluoroscopes of the series ProScan for the quantitative assessment of cardiothoracic index patients in the automatic mode does not require any additional action on the part of the doctor. The results of the processing in the automatic mode of X-ray images of the chest, 1000 of men and 1000 of women, presents the distribution depending on the age of the transverse size of the heart, thoracic cage and cardiothoracic index. The test group of patients, selected at random, determined by the efficiency of visual assessment by a physician cardiothoracic index and the efficiency of the correct calculation in automatic mode.

Key words: *cardiothoracic index, heart, contour of the chest, diaphragm, digital fluorograph*

E-mail: korablevv@roentgenprom.ru