

И.А. ОРЛОВ, Е.А. ЗАХАРОВА

**Исследование и разработка  
методов компьютерного анализа  
спондилограмм.**

УДК 004.932.2

Муромский институт  
(филиал) ФГБОУ ВПО  
«Владимирский  
государственный  
университет имени  
А.Г. и Н.Г. Столетовых»

*В статье проводится обзор существующих программных диагностических комплексов и методов компьютерного анализа спондилограмм. Предлагается подход автоматического выделения позвоночного столба, основанный на получении адаптивной осевой линии и применении алгоритма активных контуров для поиска границ.*

*In article the review of methods application of computer processing for analysis spondylograms.*

В настоящее время наиболее распространенными средствами диагностики патологических изменений и деформации позвоночника являются клиническая картина и рентгенологическое обследование.

Особую значимость анализ спондилограмм (рентгенограмм позвоночника) приобретает в условиях острых медико-социальных проблем, к которым относится массовое распространение нарушений осанки и искривлений позвоночника (сколиозов). Сколиоз - прогрессирующее заболевание, протекающее хронически и нередко приводящее к потере трудоспособности. Поэтому своевременная и точная диагностика является одним из актуальных вопросов медицины.

На современном этапе автоматизация процессов анализа спондилограмм находится на низком уровне – медики вручную измеряют сколиотические углы по снимку, а спустя некоторое время делают повторную рентгенограмму и сравнивают с новыми данными, что приводит к необходимости обработки и хранения больших объемов

данных. Отсутствие должного уровня автоматизации оказывает негативное влияние на точность оценки показателей деформации и параметров позвоночника, которые являются решающим фактором при классификации заболевания и назначении вида лечения. Поэтому возникает необходимость разработки автоматизированных систем анализа, их методического и технического обеспечения, однозначно определенных и решенных на высоком уровне.

Целью настоящей работы является обзор медицинских методов определения угла сколиотической дуги (угла искривления) по рентгенограмме позвоночника, рассмотрение существующих программных диагностических комплексов, а также исследование и разработка методов компьютерного анализа спондилограмм, которые бы позволили при минимальных затратах труда и времени врача получать исчерпывающее и объективное описание снимков позвоночника.

Степень бокового искривления позвоночника определяется по рентгенограмме позвоночника, произведенной в прямой проекции, выполненной с использованием адекватных технических условий и фокусного расстояния (140-150 см). Для измерения угла искривления позвоночника используется несколько методов.

Метод Фергюссона основан на определении угла сколиоза, образованного пересечением линий, соединяющих центры нейтральных позвонков с центром позвонка, расположенного на высоте сколиотической дуги [1]. Нейтральные позвонки – позвонки, не имеющие признаков торсии и ротации.

Способ Кобба основан на определении угла, образованного двумя нейтральными позвонками. На снимок наносятся две линии, параллельные плоскости нейтральных позвонков. В точке пересечения этих линий измеряется угол сколиоза. При меньших искривлениях к этим линиям восстанавливаются перпендикуляры до их пересечения, и измеряется дополнительный угол [2].

Метод Лекума используется при невозможности определить нейтральные позвонки. Угол сколиоза образуется при пересечении линий, соединяющих центры двух позвонков, расположенных выше позвонка, находящегося на вершине сколиотической дуги, и двух позвонков, расположенных ниже его [3].

В. Д. Чаклин и Кобб предложили определять угол сколиоза, выделив выше и ниже вершины сколиотической дуги два максимально искривленных позвонка. Через вершину верхнего позвонка и основание нижнего в поперечном направлении проводятся две линии. Из середины верхней линии через центр нейтрального позвонка опускается перпендикуляр, а из середины нижней линии восстанавливается перпендикуляр. Пересечение перпендикуляров образуют угол (внутренний) сколиоза [4].

Каждый позвонок, входящий в состав сколиотической дуги, имеет свой наклон и различную степень деформации. Измерять угол сколиоза по сумме углов, образованных клиновидными телами позвонков и межпозвонковыми щелями предложила Е. А. Абальмасова [4].

В ходе обзора выявлены основные особенности методов определения угла искривления, определены достоинства и недостатки походов. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1

**Математические методы оценки угла искривления позвоночника**

	Метод Фергюссона	Метод Кобба	Метод Лекума	Метод Чаклина, Кобба	Метод Абальмасовой
Отсутствие необходимости поиска центров позвонков	-	+	+	+	+
Отсутствие необходимости поиска нейтральных позвонков	-	-	-	-	+
Учет торсии и ротации	-	-	-	-	-
Точность измерения углов < 50 градусов	+	-	-	+	+
Правильное представление о дуге >50 градусов	-	+	-	+	+
Высокая сложность и временные затраты	+	+	+	+	-

Рассмотрение существующих подходов позволяет выделить метод Абальмасовой и метод Чаплина и Кобба как наиболее эффективные способы оценки угла сколиотической дуги.

Существующие программные диагностические комплексы оценки показателей позвоночника ориентированы на решение трех типов задач: определение координат позвонков, расчёт установленного набора параметров, составление на его основе формализованного описания.

Программа «МЕДАРМ», совмещает ручной и автоматический способ определения координат позвонков. Для поиска контуров позвонка используется обобщённая модель его формы, учитывающая, как меняется яркость точек изображения поперек краев позвонка. Построение модели требует участия экспертов для составления коллекции позвонков. Комплекс позволяет рассчитать набор следующих параметров позвонков и межпозвонковых дисков: высота, длина, угол трапецевидности, угол наклона, смещение [5].

Для составления формализованного описания в программе используется «электронный справочник» по параметрам позвоночника. Это набор из примерно 300 определений, связывающих диапазон величин параметра с кодом патологии. Программа берет на себя наиболее трудоёмкие рутинные операции: оконтуривание, вычисление и пользование справочником. Однако, рассмотренная программа не содержит механизмов диагностики боковых искривлений позвоночника и функционирует только совместно с аппаратным обеспечением фирмы «МЕДТЕХ».

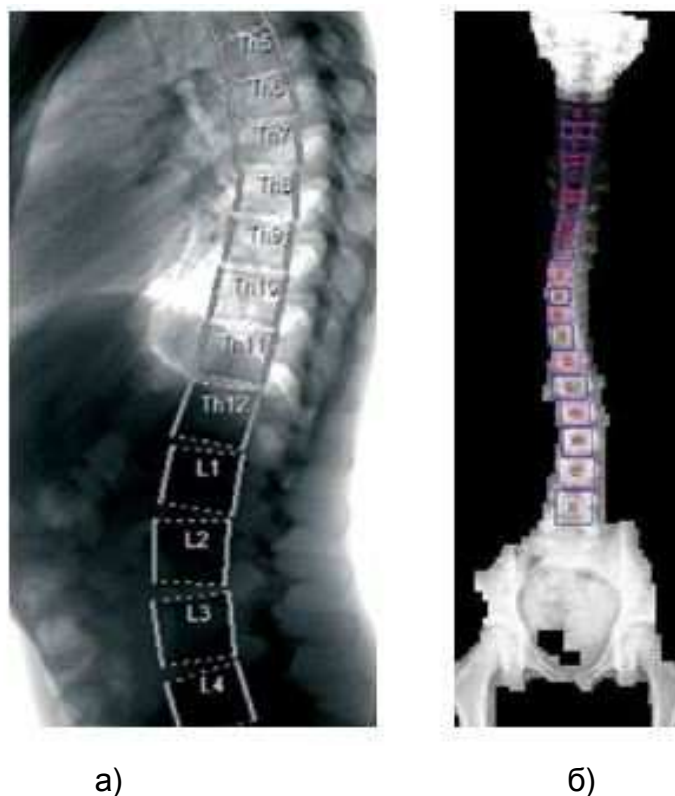
Программа КАО (компьютерный анализ ортопелвиоспондилограмм), входящая в специализированный программный комплекс, основана на методах двойной навигации и увеличения, что значительно снижает ошибку определения границ позвонка. Однако отсутствие механизмов оконтуривания позвонков и анализа искривлений позволяет использовать КАО только на подготовительном этапе обработки рентгенограмм.

Рассмотренные системы ориентированы на участие эксперта в проведении предварительной обработки рентгенограмм и выделении позвонков, что существенно увеличивает сложность и время диагностики. Поэтому на сегодняшний день остается актуальной задача автоматического выделения позвоночного столба и отдельных

позвонков на спондилограммах для дальнейшей оценки искривления. Существующие алгоритмы выделения позвоночника, работающие в автоматическом и полуавтоматическом режиме, рассмотрены в ряде зарубежных и отечественных работ [5, 6, 7, 8].

Работа Гладкова А.В. [5] ориентирована на поиск отдельных позвонков с использованием обобщённых моделей без предварительного выделения позвоночного столба. Обработка происходит в полуавтоматическом режиме и представляет собой итерационный процесс, формирующий снимок с отмеченными контурами тел позвонков (рисунок 1а). На первом шаге находится среди уже известных позвонков на других снимках контур, наиболее похожий на «затравку» (обведенное вручную тело любого позвонка). При этом учитывается как различие формы контура, так и распределение яркости точек поперёк него. Затем контур-затравка и отвечающий ему контур-образец максимально совмещаются операциями масштабирования, поворота и сдвига, происходит выравнивание яркости и контраста в области контуров, т.е. нивелируются различия снимков, связанные с режимом экспозиции и положением пациента относительно детектора. После этого один из контуров в снимке образца, соседний к найденному, проецируется на текущий снимок, и происходит возврат к поиску наиболее похожего снимка, учитывая на этот раз оба известных контура. При сохранении снимка с отмеченными позвонками он пополняет коллекцию образцов.

Недостаток подхода в том, что сами базой поиска является некоторая обобщенная модель, а не исходные снимки и контуры. Отсутствие механизмов представления позвоночного столба как единого целого позволяет использовать только метод Абальмасовой для оценки сколиотических изменений. Кроме того, подобная пошаговая тактика сильно замедляет процесс анализа, но делает его более гибким.



а)  
б)  
Рис. 1. Снимки с отмеченными контурами позвонков  
а) Работа Гладкова А.В.  
б) Подход Daniel C. Moura

Подход, описанный в работе Daniel C. Moura [6], используется для обнаружения позвоночного столба в целом и отдельных позвонков с применением прогрессивного порога. На первом этапе обработки определяется местоположение в позвоночнике осевой линии  $Y$ . Для этого исходный снимок слаживается с использованием фильтра Гаусса, реализуется подсчет суммарной интенсивности пикселей в каждом столбце и выбор столбца с наиболее высоким значением. Следующий шаг предусматривает разделение позвоночного столба в позвонках. Позвонки, как правило, имеют более высокую интенсивность, чем разделяющие их диски, однако, интенсивность позвонков очень сильно варьируются. Для решения этой проблемы в работе предлагается использовать прогрессивный подход к выбору порога. Алгоритм начинается с подсчета суммарной интенсивности в каждой строке с использованием низкого порога. Затем, пороговое значение увеличивается в медленном темпе и процесс подсчета повторяется. Низкий уровень порога позволяет изолировать позвонки с низкой интенсивностью (как правило, шейные), высокий порог - с высокой интенсивностью. Для предотвраще-

ния чрезмерного разделения позвонков выполняется два теста: 1) проверяется величина промежутков между позвонками на превышение некоторого максимального значения; 2) размер позвонка соотносится с размерами смежных позвонков. Завершающий этап обработки спондилограмм по методу Daniel C. Mouga включает в себя определение боковых границ позвонков с использованием локальной информации. Метод предусматривает деление позвонков на 15 кластеров трех групп (высокоинтенсивные, среднеинтенсивные, малоинтенсивные). Высокоинтенсивные кластеры с наибольшей разностью суммарных интенсивностей с соседними кластерами принимаются за границы позвонка.

Рассмотренный подход не требует участия эксперта в процессе предварительной подготовки спондилограмм, базой поиска является исходный снимок и контур, что существенно повышает точность. Однако подход ориентирован на анализ незначительных искривлений, вследствие жесткой привязки всех этапов анализа к начальной неадаптивной осевой линии позвоночника, выделенной на первом шаге обработки.

В работе S. Ghosh [7] рассматривается метод сегментации позвоночника, состоящий из пяти основных шагов: локализация дисков [8]; локализация позвоночного столба путем удаления структур низкой интенсивности; сегментация отдельных позвонков с использованием операции градиента (границы отмечаются там, где модуль градиента приобретает максимальное значение); обнаружение осевой линии и оценка ориентации позвонков; выявление основных граничных точек.

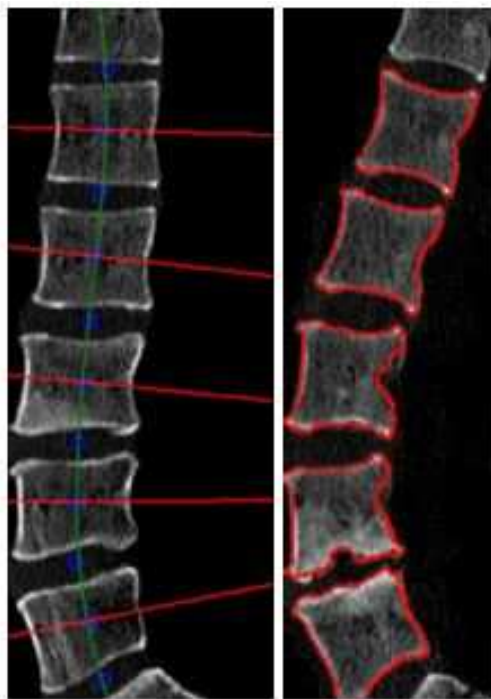


Рис. 2. Снимки с отмеченными контурами позвонков методом S. Ghosh

Рассмотренный подход позволяет анализировать позвоночный столб как целое, состоящее из набора связанных элементов (позвонков), что дает возможность использования любого из медицинских методов оценки искривления для дальнейшей диагностики. Однако метод S. Ghosh предъявляет высокие требования к качеству исходных снимков для выполнения операции градиента.

Для преодоления проблем и недостатков рассмотренных методов автоматического выделения позвоночного столба и отдельных позвонков на спондилограммах в настоящей работе предлагается использовать подход, основанный на получении адаптивной осевой линии позвоночника и применении алгоритма активных контуров для поиска границ [9-15]. Подход включает в себя ряд этапов предварительной обработки и выделения граничных опорных точек позвоночного столба (рисунок 3).



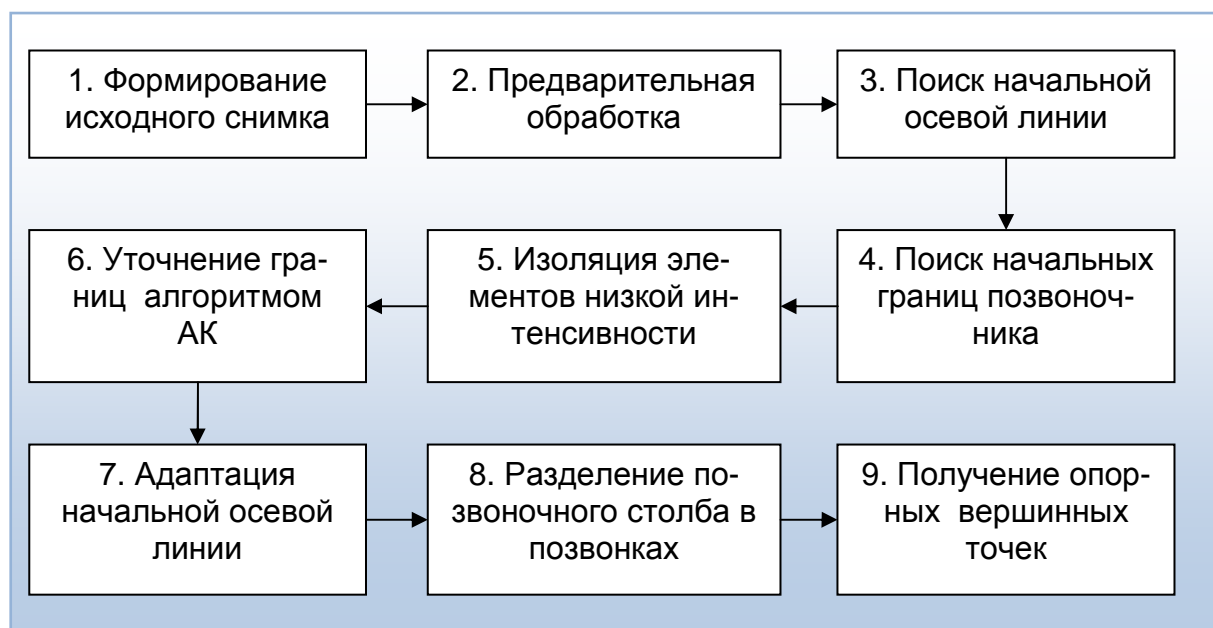


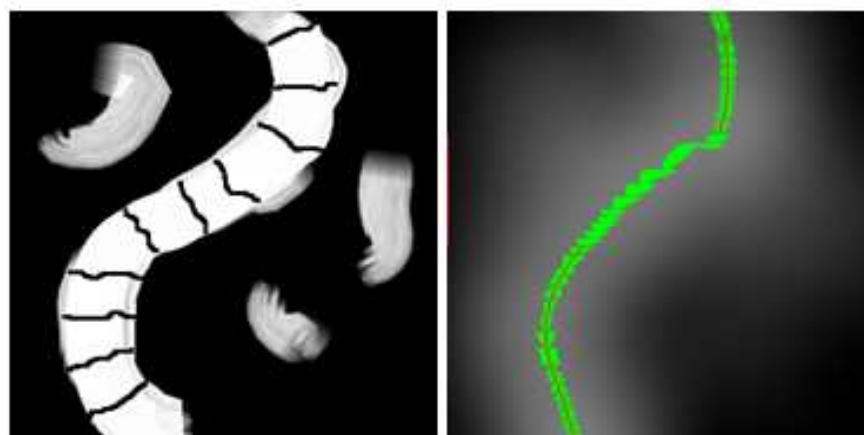
Рис. 3. Этапы предлагаемого подхода

В качестве исходных снимков выступают спондилограммы позвоночника, представленные в растровой электронной форме с использованием сканера или цифровой фотооптической камеры высокого разрешения.

Этап предварительной обработки включает в себя операции по устранению нежелательных областей высокой интенсивности (затемнению отдельных участков), контрастированию, изменению яркостных характеристик, являющиеся необязательными и осуществляемые автоматизировано для улучшения визуального восприятия. Завершающая операция предварительной обработки заключается в представлении исходного снимка в градациях серого (получение полутонового изображения).

На этапе поиска начальной осевой линии проводится сглаживание электронного снимка с применением фильтра Гаусса для уменьшения детализации и подавления шумов. В работе предполагается, что позвоночный столб, как правило, имеет более высокую интенсивность, чем другие костные структуры. На основании этого осуществляется поиск точек максимальной интенсивности по каждой строке изображения и усреднение их позиций (рисунок 4а). Полученные точки проверяются на связность между собой и группируются в набор независимых кривых. Короткие кривые ( $< 10\%$  от высоты изображения) подвергаются удалению как ошибочные (рисунок 4б). На оставшихся кривых с заданным интервалом выделяются

опорные точки, используемые для построения начальной осевой линии (рисунок 5а).



а)

б)

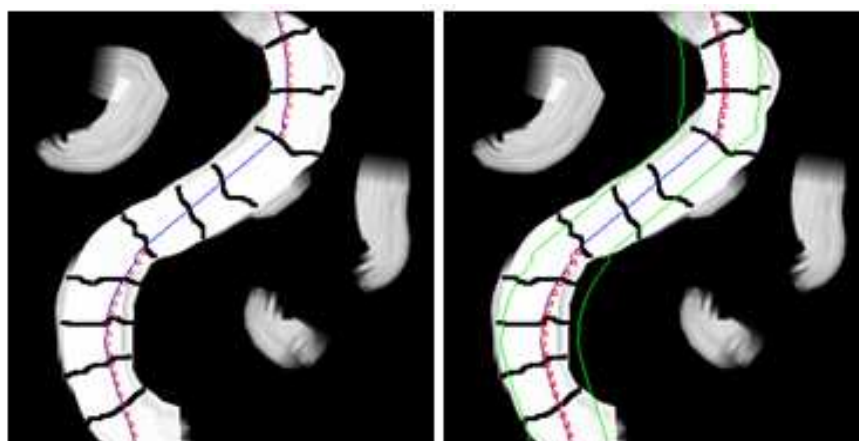
Рис. 4. Тестовые снимки позвоночника

а) Исходный тестовый снимок

б) Максимальные интенсивности и связанные точки

На 4-ом этапе осуществляется поиск начальных границ позвоночного столба. Метод предусматривает итерационное боковое двустороннее смещение полученной осевой линии и подсчет суммарной интенсивности в опорных точках на каждой итерации. При этом форма начальной осевой линии сохраняется. Каждая итерация (в настоящее время количество итераций определяется из соотношения  $\frac{W}{5}$ , где  $W$  – ширина изображения в пикселях) делит изображения на кластеры трех групп (высокоинтенсивные, среднеинтенсивные, малоинтенсивные). Высокоинтенсивные кластеры с наибольшей разностью суммарных интенсивностей с соседними кластерами принимаются за границы позвоночника (рисунок 5б) [6].

Пятый этап предусматривает возможность использование инструмента «Уровни» с целью изолировать нежелательные элементы низкой интенсивности (уровни - инструмент, дающий возможность скорректировать яркость, контраст и диапазон цвета, задавая положения абсолютно чёрного, абсолютно белого и полутонов на гистограмме)



а)

б)

Рис. 5. Тестовые снимки позвоночника

а) Опорные точки начальной осевой линии

б) Опорные точки начальных границ

Для уточнения границ позвоночного столба на 6-м этапе предлагается использовать алгоритм активных контуров, описанный в работах [9, 12, 14]. Алгоритм активных контуров имеет ряд преимуществ по сравнению с другими методами сегментации:

- при решении задачи используются локальные характеристики изображения, что позволяет получить более точные решения;
- алгоритм позволяет отказаться от использования идеальных моделей краев и границ;
- связность (непрерывность) активного контура не требуется решать задачу объединения отдельных фрагментов границы в непрерывную кривую или объединять области [12].

Суть алгоритма [14] заключается в нахождении оптимума между силами, сдвигаящими и распирающими искомый контур (рисунок 6). Под активным контуром понимается изменяемый контур, который состоит из  $n$  точек:

$$V = \{v_1, \dots, v_n\}; v_i = (x_i, y_i), i = \{1, \dots, n\} \quad (1)$$

Каждая точка контура итеративно подходит к границе объекта, решая задачу минимизации общей энергии. Для каждой точки, близкой к вершине  $v_i$ , считается значение  $E_i$ :

$$E_i = a \cdot E_{in}(v_i) + b \cdot E_{ext}(v_i) \quad (2)$$

где:  $E_{in}(v_i)$  - энергетическая составляющая, зависящая от формы контура  $E_{ext}(v_i)$  - энергетическая составляющая, зависящая от градиента изображения;

$a, b$  - весовые коэффициенты, обеспечивающие вклад каждой из энергий в общее уравнение критерия;

$E_i, E_{in}, E_{ext}$  - квадратные матрицы. Значение в центре каждой из матриц энергии соответствует энергии в точке  $v_i$ . Остальные значения в матрицах энергии соответствуют энергии в каждой точке, находящейся в окружении  $v_i$ .

Каждая вершина  $v_i$  потенциально может перейти в любую точку  $v_i'$ , соответствующей минимальным значением энергии  $E_i$ . Если энергетическая функция настроена корректно, вершины контура  $V$  итеративно перемещаются и останавливаются вблизи границ объекта.

Внутренняя энергия  $E_{in}$  рассчитывается по формуле:

$$a \cdot E_{in}(v_i) = c \cdot E_{con}(v_i) + d \cdot E_{bal}(v_i) \quad (3)$$

где:  $a, c, d$  - весовые коэффициенты;

$E_{con}(v_i)$  - сглаживающая составляющая (стягивает контур и не позволяет отдельным вершинам сильно отделяться от остальных.);

$E_{bal}(v_i)$  - распирающая составляющая контура (заставляет контур деформироваться в одном направлении).

Матрица энергии градиенте вычисляется на основе модуля градиента, определяемого как:

$$|G| = \sqrt{\left(\frac{\partial f(x, y)}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f(x, y)}{\partial y}\right)^2} \quad (4)$$

Направление градиента:

$$\theta = \arctg\left(\frac{\partial f(x, y)}{\partial x} + \frac{\partial f(x, y)}{\partial y}\right) \quad (5)$$

Для нахождения значений частных производных функции яркости используются свёртки изображений с различными масками, которые аппроксимируют различные операторы.

Для обработки тестовых изображений весовые коэффициенты определены экспериментально и равны:  $a = 5, b = 10, c = 1, d = 5$ .

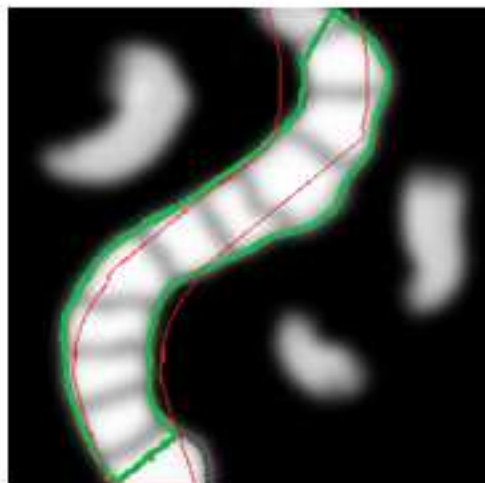
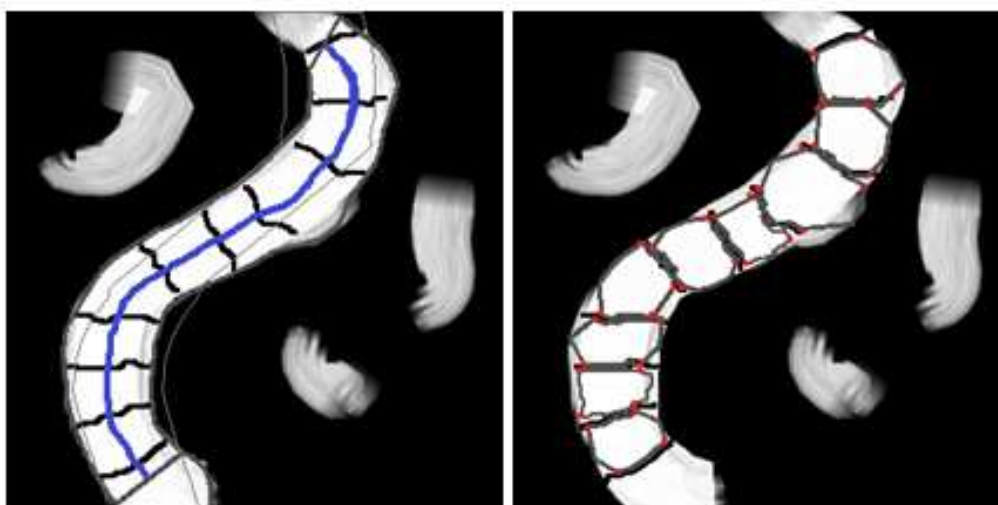


Рис. 6. Уточнение границ позвоночника алгоритмом АК

На 7-м этапе начальная осевая линия позвоночника адаптируется с учетом полученных границ путем усреднения их позиций (рисунок 7а). Полученная осевая линия может использоваться для оценки сколиотических изменений.



а)

б)

Рис. 7. Осевая линия и выделение позвонков

а) Адаптивная осевая линия

б) Разбиение на позвонки, получение опорных вершинных точек

Для разделения позвоночника в позвонках в работе предлагается использовать алгоритм активных контуров, либо прогрессивный подход к выбору порога [6].

Завершающий этап предлагаемого подхода - получение 4-х опорных вершинных точек для каждого позвонка (рисунок 7б).

Результаты применения предлагаемого подхода к реальным спондилограммам позвоночника представлены на рисунках 8-9.

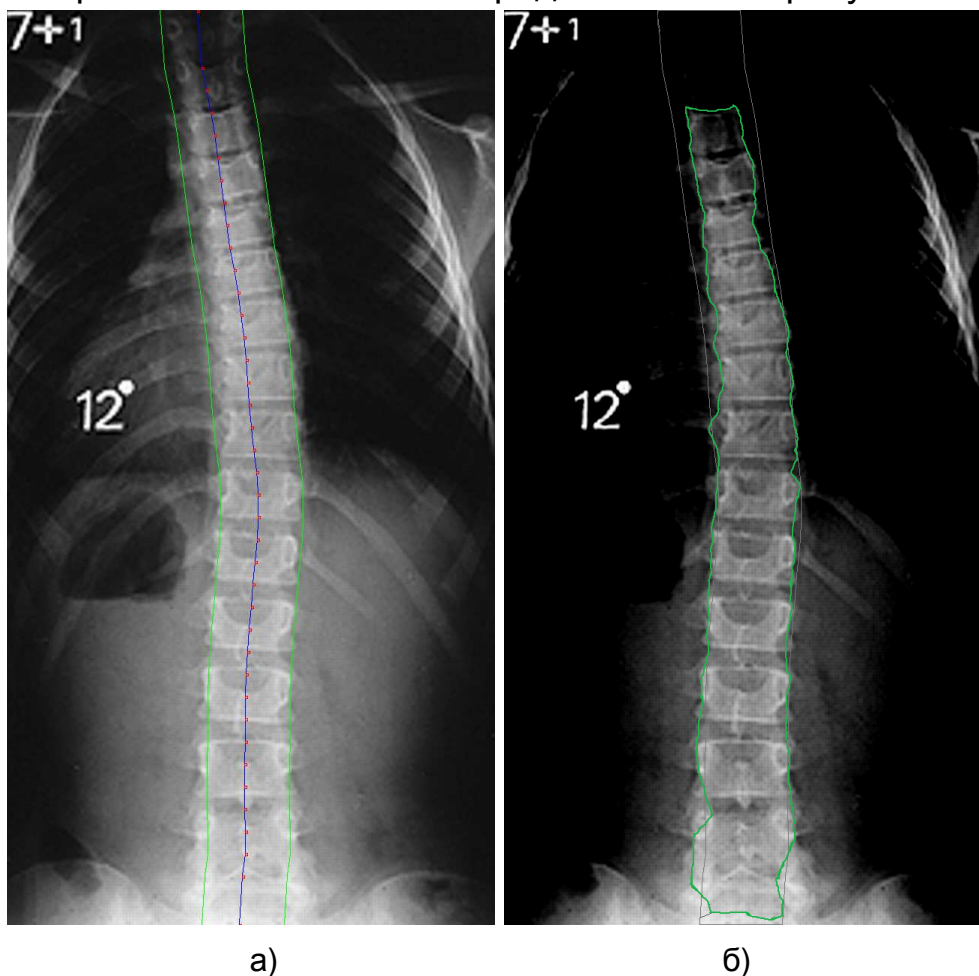


Рис. 8. Обработка реальных спондилограмм

- а) Опорные точки начальной осевой линии и начальных границ
- б) Границы позвоночного столба после применения алгоритма АК

В ходе проведенной работы выполнен анализ особенностей программных систем оценки показателей деформации, проведен обзор существующих и предложен новый алгоритм компьютерной обработки рентгенограмм для автоматического выделения позвоночника и выявления патологий.

Главные преимущества предлагаемой методики:

- необязательное участие эксперта на этапе предварительной обработки;
- базой поиска является сам исходный снимок и контур, а не некая абстрактная модель, что существенно повышает точность;
- возможность анализировать позвоночный столб как целое, состоящее из набора связанных элементов (позвонков), что дает воз-

возможность использования любого из медицинских методов оценки искривления для дальнейшей диагностики;

- способность анализировать значительные искривления за счет использования алгоритма АК и адаптивной осевой линии позвоночника.

Описание снимков костных систем, даже в цифровом варианте, часто остаётся трудоёмким процессом, включающим большой объём рутинных действий и вычислений. Предлагаемый метод автоматизации для случая спондилограмм является только первым шагом в сторону повышения удобства и качества рентгенографических исследований. Развитие работы видится в переходе к расчету искривления, определению класса сколиотических изменений, а также к прогнозированию действий оперативного или другого лечения.

### Литература

1. *Ferguson A.B.* Roentgen Diagnosis of Extremities and Spine // Radiology. 1945. С. 261-275.
2. *Cobb R.J.* Outline for study of scoliosis // Instructional Course Lectures. 1948. С. 261-275.
3. *Риц И.А.* Методика и техника рентгенологического исследования больных сколиозом: Методические рекомендации. - Новосибирск, 1974.
4. *Чаклин В.Д., Абальмасова Е.А.* Сколиоз и кифозы. - М.: Медицина, 1973.
5. *Гладков А.В.* Полуавтоматический анализ параметров позвоночника с помощью комплекса КАРС // Поликлиника: профессиональный журнал для руководителей и врачей всех специальностей ЛПУ России. 2008. С. 40-43.
6. *Moura D.* Automatic vertebra detection in x-ray images // ComplImage. 2006.;
7. *Ghosh S.* Automatic lumbar vertebra segmentation from clinical CT for wedge compression fracture diagnosis // Medical Imaging. 2011.
8. *Alomari R.S. Corso J.J.* Labeling of lumbar discs using both pixel- and object-level features with a two-level probabilistic model // IEEE Transactions on Medical Imaging.
9. *Kass M., Witkin A.* Snakes: Active Contour Models // International Journal of Computer Vision. 1987. С. 321-331.
10. *Орлов А.А.* Метод анализа линейчатых структур на цифровых дефектоскопических изображениях // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». 2008. Т. 1. С. 376-380.
11. *Орлов А.А.* Компьютерный рентгенографический анализ качества сварных соединений и выделение линейчатых объектов в них // Автоматизация и современные технологии. 2009. №6. С. 3-6.
12. *Мурашов Д.М.* Метод автоматизированной сегментации изображений цитологических препаратов на основе модели активного контура // ТРУДЫ МФТИ. 2009. №1. С. 80-89.
13. *Орлов А.А., Провоторов А.В., Астафьев А.В.* Системный анализ методов маркировки промышленных изделий // Алгоритмы, методы и системы обработки данных. 2010. №15. С. 131-135.

14. *Петров В.О., Привалов О.О.* Модификация алгоритма активных контуров для решения задачи интерактивной сегментации растровых изображений дефектов металлических отливок // *Современные проблемы науки и образования*. 2008. №6. С. 14-19.

15. *Орлов А.А.* Сравнительный анализ методов выделения линейчатой структуры на полутоновых изображениях // *Труды международного симпозиума «Надежность и качество»*. 2009. Т. 2. С. 391-394.

E-MAIL: EMAIL.ILYAORLOV@GMAIL.COM