

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

А В Т О М Е Т Р И Я

2006, том 42, № 4

УДК 535.8 : 53.088 : 616.711–073.756.8

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ
ПОВЕРХНОСТИ МОДЕЛИ ТУЛОВИЩА ЧЕЛОВЕКА
МЕТОДОМ КОМПЬЮТЕРНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ТОПОГРАФИИ**

В. Н. Сарнадский, С. Я. Вильбергер, А. В. Шевченко

*Новосибирский научно-исследовательский институт травматологии и ортопедии,
Новосибирск*

E-mail: metos@online.nsk.su

Рассматриваются результаты исследования точности восстановления трехмерной поверхности модели туловища человека методом компьютерной оптической топографии в сравнении с методом многосрезовой компьютерной томографии.

Введение. В Новосибирском НИИТО в 1994 г. был разработан метод компьютерной оптической топографии (КОМОТ) рельефа тела человека и на его основе создана первая отечественная медицинская оптико-электронная топографическая система – топограф оптический деформации позвоночника (ТОДП) – для диагностики деформации позвоночника и нарушений осанки у детей и подростков (рис. 1). В 1996 г. эта система после клинических испытаний была допущена Министерством здравоохранения РФ к применению в медицинской практике и в настоящее время широко используется в детской ортопедии (99 установок ТОДП работает в 40 городах России, Украины и Казахстана).

Система ТОДП позволяет бесконтактно определять форму поверхности туловища пациента. Принцип ее действия основан на структурированном освещении [1] и заключается в проецировании оптического изображения вертикальных параллельных полос на обследуемую поверхность и регистрации этих полос ТВ-камерой [2]. Регистрируемые полосы деформируются пропорционально рельефу обследуемой поверхности и несут детальную информацию о форме поверхности в виде дополнительной фазовой модуляции спроецированных полос. По введенному в компьютер изображению таких полос методом трехканальной комплексной фильтрации производится демодуляция фазы [3] и восстанавливается цифровая модель обследуемой поверхности тела пациента в каждой точке исходного снимка. По этой модели и выделенным на ней анатомическим ориентирам костных структур проводится комплексная количественная оценка осанки и состояния позвоночника па-



Рис. 1. Общий вид установки ТОДП

циентов в трех взаимно ортогональных плоскостях: фронтальной, горизонтальной и сагиттальной. На основе топографических данных восстанавливается трехмерная модель линии центров масс тел позвонков, по ней выявляется наличие сколиотических дуг (патологических дуг искривления во фронтальной плоскости) и оценивается угол их кривизны, аналогичный углу Кобба, расчерченному на рентгеновских снимках позвоночника в прямой проекции [4]. В работах [5–7] по сопоставлению топографических и рентгенологических данных была доказана достаточная точность и высокая достоверность топографической оценки сколиотических дуг.

Метод многосрезовой компьютерной томографии (МСКТ), обладающий уникальными возможностями восстановления внешней формы и внутренней структуры трехмерных объектов, был использован как средство верификации точности восстановления формы внешней поверхности туловища пациентов методом КОМОТ.

Целью предлагаемой работы является экспериментальное исследование точности восстановления рельефа поверхности туловища человека методом КОМОТ. Эта цель достигается путем сравнения результатов обследования эталонной поверхности методами КОМОТ и МСКТ.

Описание эксперимента. В качестве эталонной поверхности использовалась модель дорсальной поверхности туловища больного сколиозом III степени с правосторонней дугой искривления в грудном отделе позвоночника. Модель была изготовлена из стеклопластика толщиной 3 мм и жестко закреплена на рентгенопрозрачной плоской плите (рис. 2, а). На поверхности модели наклеены пассивные светоотражающие маркеры, с помощью которых размечаются на коже пациентов анатомические точки-проекции костных структур при стандартном обследовании пациентов на установке ТОДП. При обработке снимков эти маркеры автоматически выделяются, и их координаты определяются с точностью $\pm 0,1$ мм. В данном исследовании светоотражающие маркеры были использованы как реперные точки для привязки информации двух сопоставляемых методов обследования.

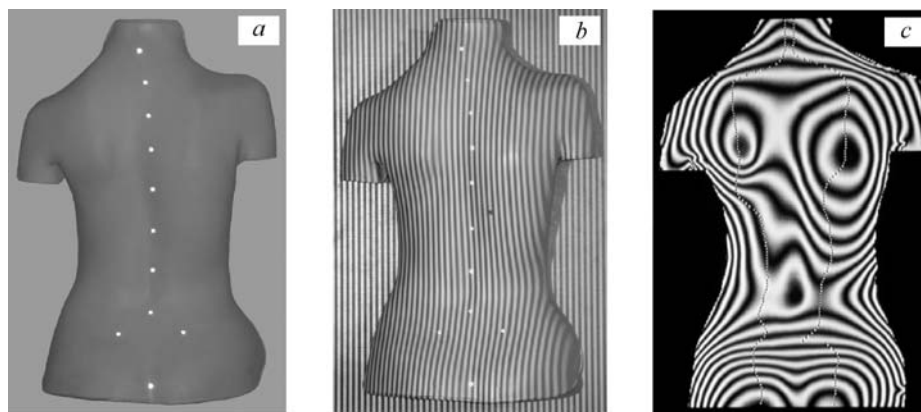


Рис. 2. Модель дорсальной поверхности туловища: общий вид (а), исходный снимок при топографическом обследовании (b), топограмма восстановленной поверхности (с)

Для восстановления поверхности эталонной модели методом КОМОТ использовалась серийная установка ТОДП (ООО «МЕТОС», г. Новосибирск). На рабочей дистанции съемки эталонная модель была размещена на вертикально установленном экране, рабочая поверхность которого выставлена строго перпендикулярно оптической оси ТВ-камеры. Оптическая ось ТВ-камеры, в свою очередь, выставлялась строго горизонтально при юстировке ТОДП. Край плиты с эталонной моделью на экране был установлен вертикально. После этого в соответствии со стандартной технологией обследования на установке ТОДП была произведена съемка эталонной модели и получено исходное топографическое изображение, как показано на рис. 2, *b*. Далее с использованием программного обеспечения ТОДП (интегральный пакет ТОРО V9.1 2005) были получены стандартные топографические результаты, в том числе построены топограмма восстановленной поверхности (рис. 2, *c*) и выходные формы топографического обследования эталонной модели (рис. 3) [6].

На выходной форме латерального анализа (рис. 3, *a*) выведены графические представления восстановленной поверхности, включающие фронтальную проекцию (приведена в левой части рисунка), топограмму (в центре рисунка) и четыре графика (в правой части рисунка), описывающих осевую ротацию и асимметрию формы в горизонтальной плоскости. На фронтальной проекции, построенной для обследуемой модели, помимо внешнего контура туловища, выводятся графические элементы, представляющие основные анатомические ориентиры дорсальной поверхности, в том числе: вертикально ориентированный отрезок, соединяющий вершину межъягодичной складки (см. рис. 2, нижний светоотражающий маркер) с точкой проекции остистого отростка седьмого шейного позвонка С7 на поверхность (см. рис. 2, верхний светоотражающий маркер); линия-проекция вершин остистых отростков позвоночного столба (см. рис. 3, *a*, линия, проходящая справа от отрезка, соединяющего вершину межъягодичной складки с С7); горизонтально ориентированные отрезки при рассмотрении снизу вверх, задающие ориентацию таза, нижних углов лопаток и плечевого пояса. Слева от фронтальной проекции приведена процентная шкала, 0 % которой соответствует

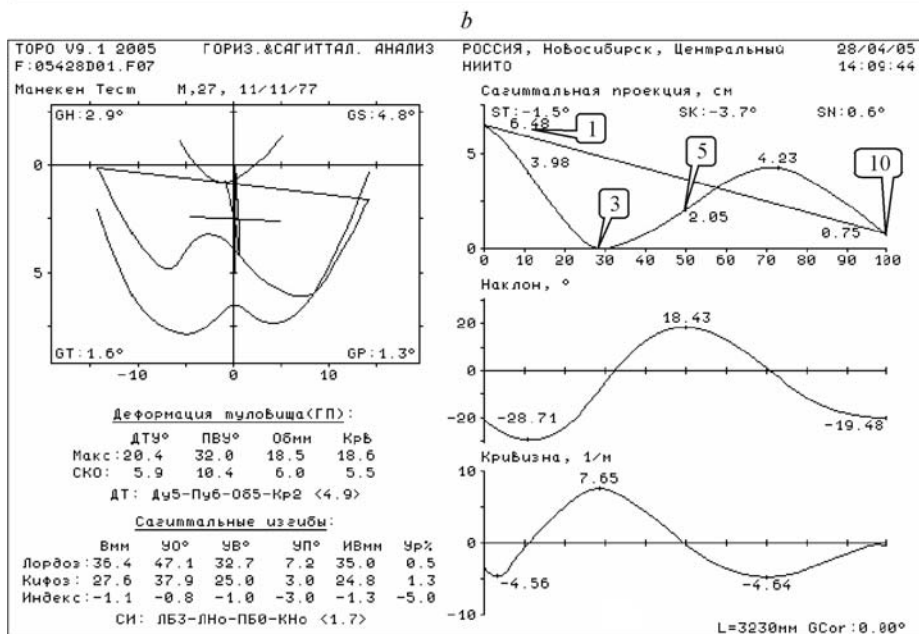
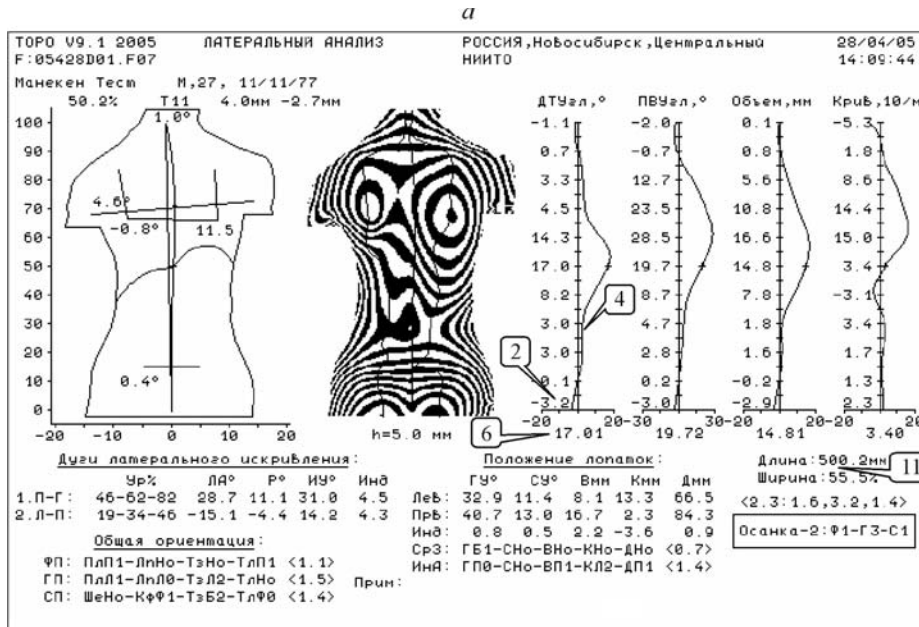


Рис. 3. Результаты топографического обследования модели туловища: выходная форма латерального анализа (a); выходная форма сагиттально-горизонтального анализа (b)

вершине межъягодичной складки и 100 % – уровню проекции остистого отростка шейного позвонка С7. На выходной форме горизонтально-сагиттального анализа (рис. 3, b) выводится горизонтальная проекция обследуемой поверхности (приведена в левой части рисунка), соответствующая виду по-

верхности сверху, а также сагиттальная проекция линии вершин остистых отростков позвоночника (приведена на рисунке справа сверху), соответствующая виду этой линии сбоку. Для сагиттальной проекции, как и для фронтальной, по оси абсцисс используется процентная шкала.

Пластиковая модель поверхности туловища была обследована также на спиральном томографе Siemens Somatom Sensation 4 [8] в ФГУ «Новосибирский НИИ патологии кровообращения им. акад. Е. Н. Мешалкина Росздрава». Обследование проводилось в спиральном режиме сканирования с установкой толщины среза 3 мм и перекрытием 1,5 мм. При обследовании с помощью МСКТ модель помещалась на подвижный стол томографа с ориентацией бокового края плиты параллельно краю стола и, следовательно, вдоль направления линейного перемещения стола. Обзорный снимок модели после сканирования приведен на рис. 4.

По результатам сканирования были выполнены MPR (Multi-Planar Reformation) и MIP (Maximal vs minimal Intesity Projection) трехмерные реконструкции и получены 386 изображений аксиальных сечений модели.

Результаты эксперимента. Задачей исследования была оценка точности и достоверности топографических данных с точки зрения наиболее значимых для медицинской диагностики показателей, прежде всего, осевой ротации туловища и выраженности физиологических изгибов позвоночника в сагиттальной плоскости. Для поверхности, восстановленной с помощью

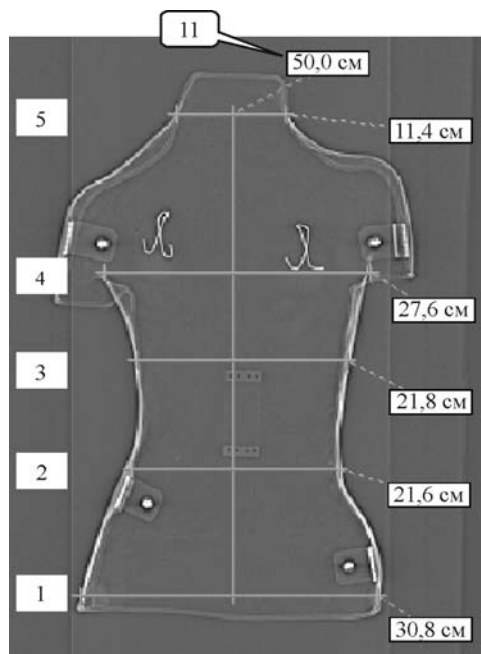


Рис. 4. МСКТ-снимок модели туловища: 1 – уровень вершины межъягодичной складки (центр нижнего маркера, 0 % шкалы, на рис. 3, а слева); 2 – уровень вершины поясничного лордоза (28,3 % шкалы); 3 – уровень точки перегиба на границе поясничного лордоза – грудного кифоза (50 % шкалы); 4 – уровень нижних углов лопаток (69 % шкалы); 5 – уровень проекции остистого отростка шейного позвонка С7 (центр верхнего маркера, 100 % шкалы)

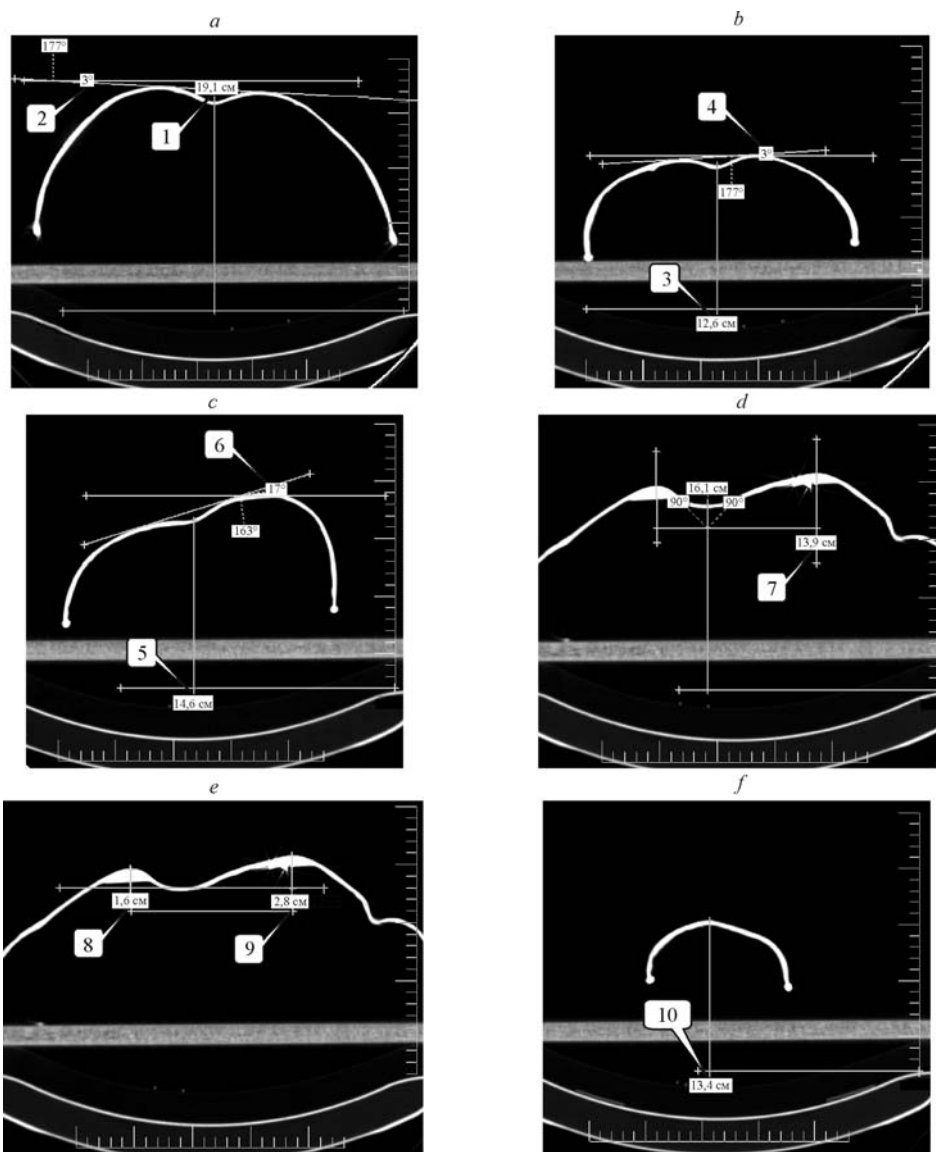


Рис. 5. Горизонтальные сечения поверхности модели: *a* – уровень вершины межъягодичной складки (0 % шкалы); *b* – уровень вершины поясничного лордоза (28,3 % шкалы); *c* – уровень точки перегиба на границе лордоз–кифоз (50 % шкалы); *d* – уровень нижних углов лопаток (69 % шкалы); *e* – уровень нижних углов лопаток (69 % шкалы); *f* – уровень проекции остистого отростка шейного позвонка С7 (100 % шкалы)

МСКТ, осуществлялась привязка к процентной шкале, используемой для представления топографических данных. Начало шкалы (см. рис. 4, сечение 1) выбрано на вершине межъягодичной складки модели, а конец шкалы (см. рис. 4, сечение 5) – в точке, соответствующей проекции остистого отростка шейного позвонка С7. Эти сечения были найдены при анализе МСКТ-профилей по положению соответствующих светоотражающих маркеров благо-

№ п/п	Наименование параметра	Результаты обследования		Разность сопоставляемых параметров
		методом КОМОТ	методом МСКТ	
1	Высота рельефа поверхности на уровне вершины межъягодичной складки (0 % шкалы), см	6,48 (см. рис. 3, <i>b</i>)	6,5 ¹ (19,1) (см. рис. 5, <i>a</i>)	-0,02
2	Угол горизонтального поворота поверхности на уровне вершины межъягодичной складки (0 % шкалы), град	-3,2 (см. рис. 3, <i>a</i>)	-3,0 (см. рис. 5, <i>a</i>)	-0,2
3	Высота рельефа на уровне вершины поясничного лордоза (28,3 % шкалы), см	0 (см. рис. 3, <i>b</i>)	0 ¹ (12,6) (см. рис. 5, <i>b</i>)	0
4	Угол горизонтального поворота поверхности на уровне вершины поясничного лордоза (28,3 % шкалы), град	3,01 (см. рис. 3, <i>a</i>)	3,0 (см. рис. 5, <i>b</i>)	0,01
5	Высота рельефа на уровне точки перегиба на границе лордоз–кифоз (50 % шкалы), см	2,05 (см. рис. 3, <i>b</i>)	2,0 ¹ (14,6) (см. рис. 5, <i>b</i>)	0,05
6	Угол горизонтального поворота поверхности на уровне точки перегиба на границе лордоз–кифоз (50 % шкалы), град	17,01 (см. рис. 3, <i>a</i>)	17,0 (см. рис. 5, <i>b</i>)	0,01
7	Расстояние между экстремальными точками горизонтального сечения на уровне нижних углов лопаток (69 % шкалы), см	13,86 ²	13,9 (см. рис. 5, <i>d</i>)	-0,06
8	Высота экстремума рельефа для левой лопатки (69 % шкалы), см	1,58 ²	1,6 (см. рис. 5, <i>e</i>)	-0,02
9	Высота экстремума рельефа для правой лопатки (69 % шкалы), см	2,83 ²	2,8 (см. рис. 5, <i>e</i>)	0,03
10	Высота рельефа на уровне проекции остистого отростка шейного позвонка С7 (100 % шкалы), см	0,75 (см. рис. 3, <i>b</i>)	0,8 ¹ (13,4) (см. рис. 5, <i>f</i>)	-0,05
11	Длина туловища от уровня вершины межъягодичной складки (0 % шкалы) до уровня проекции остистого отростка шейного позвонка С7 (100 % шкалы), см	50,02 (см. рис. 3, <i>a</i>)	50,0 (см. рис. 4)	0,02

Пр и м е ч а н и е. 1 – значения параметров получены путем вычитания высоты для вершины поясничного лордоза (см. рис. 5, *b*, 12,6 см) из значений высот, указанных на рис. 5 и в таблице в скобках; 2 – значения параметров получены при интерактивном анализе топографических данных.

даря их рентгеноконтрастности. Для анализа также выбраны три внутренних сечения: 2, 3 и 4 (см. рис. 4). Сечения 1–5 были интерактивно расчерчены с целью определения показателей, сопоставимых с аналогичными топографическими. Указанные сечения с полученными значениями анализируемых параметров приведены на рис. 5, *a–f*. Высота профилей горизонтальных сечений задана на рисунке относительно начала оси ординат приведенной справа шкалы. Для анализа томографических данных было использовано программное обеспечение eFilm Lite Version 1.9.4, позволяющее измерять угловые и линейные размеры интерактивно, задавая координаты измеряемых точек с помощью манипулятора «мышь» на основе визуальной оценки граничных точек. При этом точность количественных оценок не превышала значений $\pm 0,5$ мм и $\pm 0,5^\circ$. Однако такая точность вполне приемлема для задач топографической диагностики.

Значения сопоставляемых параметров поверхности модели туловища, восстановленной с помощью двух методов обследования, приведены в таблице. Анализируемые параметры пронумерованы соответственно в таблице и показаны на рис. 3 для данных, полученных по методу КОМОТ, и на рис. 4 и рис. 5 для данных, полученных по методу МСКТ.

Из таблицы видно, что расхождение результатов восстановления поверхности модели туловища человека методами КОМОТ и МСКТ находится в пределах точности интерактивного расчерчивания профилей МСКТ посредством программного обеспечения eFilm Lite Version 1.9.4 и не превышает $\pm 0,5$ мм (оценка продольно-поперечных размеров и глубины рельефа модели) и $\pm 0,5^\circ$ (оценка углов поворота поверхности в горизонтальной плоскости). Однако такая точность вполне достаточна для задач медицинской диагностики методом КОМОТ, так как основным источником погрешности (существенно превышающей указанный уровень) при обследовании человека является вариабельность и нестабильность позы пациента от обследования к обследованию.

Заключение. Проведено восстановление трехмерной поверхности пластиковой модели туловища больного сколиозом III степени с правосторонней дугой искривления в грудном отделе позвоночника двумя сопоставляемыми методами: компьютерной оптической топографией и многосрезовой компьютерной томографией с использованием серийных медицинских диагностических установок ТОДП и Sensation 4. Расхождение в оценке клинически наиболее значимых параметров, полученное по восстановленной двумя методами трехмерной поверхности, не превысило $\pm 0,5$ мм и $\pm 0,5^\circ$, что вполне достаточно для задач медицинской диагностики по топографическим данным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pfeifer T. Production Metrology. München – Wien – Oldenbourg, 2002.
2. Евразийский пат. 000111. Способ компьютерной оптической топографии формы тела человека и устройство для его осуществления /В. Н. Сарнадский, М. А. Садовой, Н. Г. Фомичев. Заявл. 26.08.96; Оpubл. 15.06.98 .
3. Сарнадский В. Н. Метод трехканальной цифровой комплексной фильтрации для обработки фазомодулированных изображений // Автометрия. 1999. № 5. С. 62.

4. **Cobb J. R.** Outline for the study of scoliosis // AAOS Instructional Course Lectures. Vol. 5. /Ed. J. W. Edwards. 1948. P. 261.
5. **Сарнадский В. Н., Фомичев Н. Г.** Мониторинг деформации позвоночника методом компьютерной оптической топографии // Изв. Таганрог. техн. ун-та. 2000. 4, № 18. С. 69.
6. **Сарнадский В. Н., Фомичев Н. Г.** Мониторинг деформации позвоночника методом компьютерной оптической топографии. Пособие для врачей МЗ РФ. Новосибирск: НИИТО, 2001.
7. **Sarnadskiy V. N., Fomichev N. G., Mikhailovsky M. V.** Use of Functional Tests to Increase the Efficiency of Scoliosis Screening Diagnosis by COMOT Method // Research into Spinal Deformities 4 /Ed. Th. B. Grivas. Amsterdam: IOS Press, 2002. Vol. 91. P. 204.
8. **Siemens** System Owner Manual Somatom Sensation 4. Siemens AG 2002.

Поступила в редакцию 5 мая 2005 г.
