УДК 616-089.154

СТЕРЕОРЕНТГЕНОГРАФИЯ - ПЕРСПЕКТИВНЫЙ СПОСОБ ИНТРАОПЕРАЦИОННОЙ НАВИГАЦИИ В ХИРУРГИИ ПОЗВОНОЧНИКА

Гуляев Д.А.[1,2,3], Годанюк Д.С.[1,2,3], Кондюков Д.А.[2,3], Иванов Д.С.[1], Бирагов Д.В.[1], Назарук В.П.[4]

[1]СЗФМИЦ им. В.А. Алмазова, Санкт-Петербург, e-mail: spb.gda@yandex.ru;
[2]Клиническая больница № 122 им. Л.Г. Соколова, Санкт-Петербург, e-mail: godanyuk@gmail.com;
[3]Нейрохирургический центр имени проф. Г.С. Тиглиева, Санкт-Петербург, e-mail: kondukov75@mail.ru;
[4]Городская больница № 17, Санкт-Петербург, e-mail: viktor-n63@mail.ru

В исследовании приведены предварительные результаты использования стереорентгенографии в качестве способа интраоперационного контроля и навигации в хирургии позвоночника. В настоящее время для навигации и контроля в спинальной хирургии рутинно используется двухмерная рентгенография. Анализ плоских рентгеновских изображений может быть сопряжен со значительными трудностями в случаях сложной анатомии, в рентген-экранированных зонах и у начинающих хирургов. Способ стереорентгенографии предложен для оценки объемных характеристик структур, имеющих сложную геометрию, и особенно актуален в условиях суммации изображений от нескольких объектов. В предложенном способе используется эффект рентгеновского параллакса, позволяющий после аппаратной компьютерной обработки получить трехмерные изображения. Ранее способ успешно адаптирован для пункционной холангиографии и показал высокую точность и надежность навигации. Целью настоящей работы являлась оценка возможности клинического использования стереорентгеновской навигации для имплантации систем, стабилизирующих позвоночник. Авторами продемонстрирована возможность качественной интраоперационной визуализации основных анатомических ориентиров, используемых при транспедикулярной имплантации без увеличения лучевой нагрузки и длительности операции. Приведены методологические основы и технические приемы, улучшающие качество стереорентгеновских изображений. Предложенный способ может быть использован при выполнении стабилизирующих операций на всех отделах позвоночника, включая рентген-экранированные зоны нижнешейных и верхнегрудных позвонков.

Ключевые слова: рентген-контроль, интраоперационная навигация, стереорентгенография, рентгеновский стереоэффект, хирургия позвоночника, спондилолистез, транспедикулярная фиксация.

STEREORADIOGRAPHY IS A PROMISING WAY OF INTRAOPERATIVE NAVIGATION IN SPINE SURGERY

Guliaev D.A.[1,2,3], Godanjuk D.S.[1,2,3], Kondjukov D.A.[2,3], Ivanov D.S.[1], Biragov D.V.[1], Nazaruk V.P.[4]

[1]V.A. Almazov NMRC, Saint Petersburg, e-mail: spb.gda@yandex.ru;
[2]Clinical Hospital №122 named. L.G. Sokolov, Saint Petersburg, e-mail: godanyuk@gmail.com;
[3]Neurosurgical center named after prof. G.S. Tigliev, Saint Petersburg, e-mail: kondukov75@mail.ru;
[4]City Hospital No. 17, Saint Petersburg, e-mail: viktor-n63@mail.ru

The study presents preliminary results of the use of stereoradiography as a method of intraoperative control and navigation in spine surgery. Currently, two-dimensional radiography is routinely used for navigation and control in spinal surgery. Analysis of flat X-ray images can be associated with significant difficulties in cases of complex anatomy, in X-ray screened areas and in beginning surgeons. The method of stereoradiography is proposed for estimating the volume characteristics of structures having complex geometry and is especially relevant in the context of the summation of images from several objects. The proposed method uses the X-ray parallax effect, which allows three-dimensional images to be obtained after computer-assisted processing. Previously, the method was successfully adapted for puncture cholangiography and showed high accuracy and reliability of navigation. The purpose of this work was to assess the possibility of clinical use of stereoradentgen navigation for the spinal implantation. The authors demonstrated the possibility of qualitative intraoperative visualization of the main anatomical landmarks used for transpedicular implantation without increasing the radiation dose and the duration of the operation. The methodological foundations and techniques improving the quality of stereoradiographic images are presented. The proposed method can be used in performing stabilizing operations on all parts of the spine, including areas of the lower and upper thoracic vertebrae that difficult to vizualize.

Keywords: X-ray control, intraoperative navigation, stereoradiography, X-ray stereoeffect, spine surgery, spondylolisthesis, pedicle screw fixation.

Получение рентгеновских изображений для интраоперационной навигации и контроля в настоящее время широко используется в хирургии позвоночника [1]. Преимуществами рентгеновского способа навигации является его доступность, привычность и удобство использования [2]. Современная аппаратура позволяет удовлетворительно визуализировать анатомические ориентиры грудного и поясничного отделов позвоночника, используемые при имплантации стабилизирующих транспедикулярных конструкций. В то же время использование рентгеновских изображений для интраоперационного контроля имеет ограничения, обусловленные сложностью анатомии и экранированием соседними анатомическими зонами, что особенно актуально для нижнешейного и верхнегрудного отделов позвоночника [3-5]. Значительные затруднения могут возникнуть в оценке объемных характеристик позвонков на плоских рентгеновских изображениях, особенно у начинающих хирургов, и при наличии деформаций позвоночника [5]. Для улучшения результатов хирургического лечения заболеваний позвоночника в настоящее время предложены и широко используются методы интраоперационной компьютерной навигации [1; 2; 6-8]. Однако, несмотря на высокую точность имплантации в условиях измененной и сложной анатомии, этим способам присущи недостатки, обусловленные длительностью и трудоемкостью предоперационного планирования, возможными ошибками совмещения с индивидуальной анатомией пациента, зависимость от сложной и дорогостоящей аппаратуры [9-12].

Ранее для чрескожной чреспеченочной холангиографии был апробирован метод стереорентгеновской визуализации и навигации [13]. Данный метод позволяет получить объемное рентгеновское изображение на стандартной рентено-телевизионной установке следующим образом. Регистрируется первое рентгеновское изображение (базовый снимок) объекта исследования, второй снимок выполняется при незначительном смещении рентгеновского излучателя (повороте дуги аркоскопа на 4-5 градусов). Программным путем рентгеновские изображения обрабатываются и отображаются на специальном стереомониторе, стереоочках-дисплеях или, в простейшем случае, в виде двух анаглифных изображений (красного и синего цвета), наблюдаемых через анаглифные очки [14; 15]. Процедура автоматической регистрации и визуализации стереорентгеновского изображения занимает не более 0,5 сек.

В данной статье представлены предварительные результаты клинической апробации метода стереорентгеновской интраоперационной навигации для хирургии позвоночника.

Цели и задачи. Целью данного исследования являлась оценка возможности клинического использования стереорентгеновской интраоперационной навигации в хирургии позвоночника. Нами были поставлены следующие задачи:

1. Определить оптимальные условия реализации метода стереорентгеновской

навигации для различных отделов позвоночника.

2. Сравнить условия визуализации основных рентгенологических ориентиров, лучевую нагрузку и длительность исследования при стандартной и стереорентгеновской навигации.

3. Оценить возможность выполнения транспедикулярной имплантации с использованием стереорентгеновской навигации.

Материалы и методы. Исследование состояло из анатомического и клинического этапов. На анатомических препаратах шейных и грудных позвонков при помощи игл смоделированы трассы транспедикулярных винтов, оценена возможность визуализации основных рентгенологических ориентиров, используемых для проведения транспедикулярных винтов. На трупном материале выполнено транспедикулярное проведение винтов в шейные, грудные и поясничные позвонки. Изучены условия визуализации медиальной и латеральной стенки педикулы, верхней и нижней замыкательных пластинок, передней поверхности тела позвонка, возможность оценки объемных пространственных соотношений анатомических ориентиров. Оценивались качество и информативность стереорентгеновских изображений, полученных при различных величинах продольного и поперечного смещения рентгеновского излучателя, а также при изменении расстояния от него до объекта исследования.

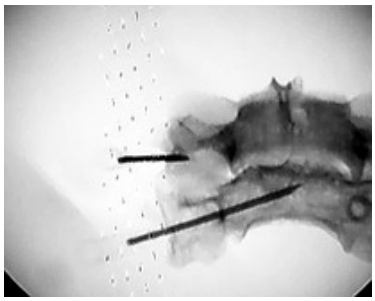
Клиническая апробация метода стереорентгеннавигации выполнена в ходе хирургического лечения 5 пациентов, оперированных по поводу дегенеративного спондилолистеза с нестабильностью поясничного отдела позвоночника. Средний возраст пациентов составил 63 года, в исследование включены 3 женщины и 2 мужчины, без грубой соматической патологии. Модель пациента выбрана с учетом относительно крупных размеров поясничных позвонков и низкой зависимости техники имплантации от навигационных систем. Всем пациентам выполнены декомпрессивно-стабилизирующие операции в объеме флавэктомии, фораминотомии, транспедикулярной фиксации и межтеловой стабилизации (TLIF). В ходе операции последовательно выполнялись стандартный рентгеновский контроль как этап получения стереоизображений, а также стереонавигация. Общий вид рабочего места хирурга при выполнении исследования продемонстрирован на рисунке 1.

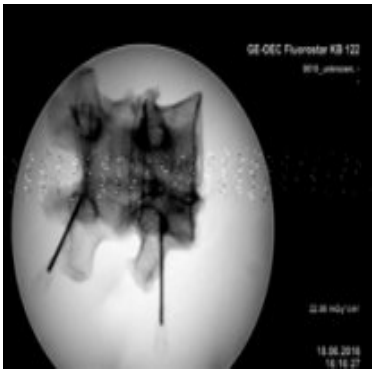
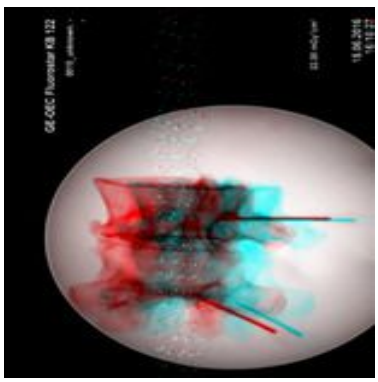
а б

Рис. 1. Общий вид компоновки аппаратуры и организация рабочего места хирурга при проведении исследований: а - общий вид аппаратуры в операционной; б – проведение исследования в ходе операции

Результаты исследования и их обсуждение. На основе проведенных анатомических и клинических исследований метода стереорентгеновской интраоперационной навигации можно представить следующие предварительные результаты.

С помощью предложенного авторами метода получены стереорентгеновские изображения, позволяющие удовлетворительно визуализировать ключевые анатомические ориентиры позвонков на анатомических препаратах и на трупном материале. В отличие от стандартных рентгеновских снимков, требующих выполнения прямых и боковых проекций, использование стереоэффекта позволило удовлетворительно оценить пространственные соотношения элементов позвонков по однопроекционным изображениям (рис. 2).

а  б

в  г 

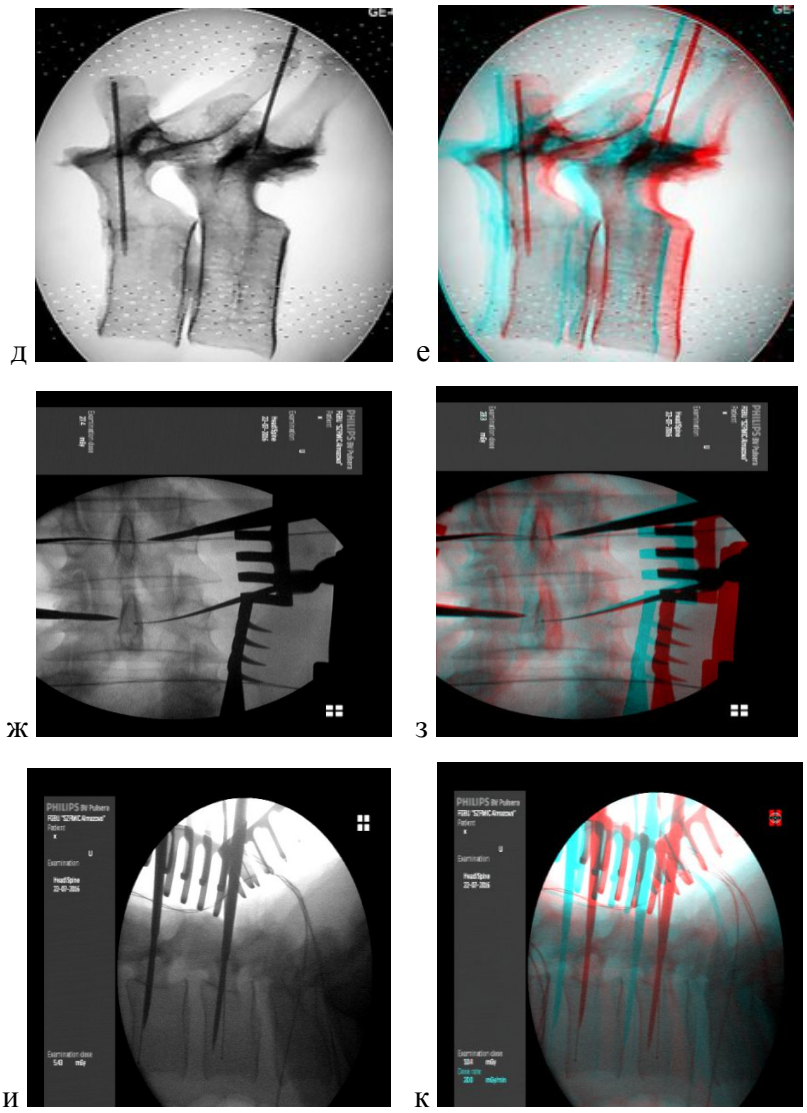


Рис. 2. Сравнение условий визуализации ключевых анатомических образований на одноплоскостных стандартных и стереорентгеновских изображениях. Смоделированы трассы транспедикулярных винтов на анатомических препаратах шейных (а, б), грудных (в, г, д, е) и поясничных позвонков (ж, з, и, к). Стандартные однопроекционные рентгеновские снимки показаны слева, стереорентгеновские анаглифные изображения - справа

В ходе исследования, на основе экспертных оценок хирургов, определены оптимальные условия для визуализации анатомических ориентиров при использовании стереорентгеновских изображений по сравнению со стандартными однопроекционными рентгеновскими изображениями. Экспертная оценка эффективности визуализации по критерию «да–нет» (в таблице: ±) при различных условиях (для различных разделов позвоночника) приведена в таблице.

Оценка условий визуализации анатомических ориентиров
на стандартных и стереорентгеновских изображениях

Анатомический ориентир	Стандартные рентгеновские снимки		Стереорентгеновские изображения	
	Прямая проекция	Боковая проекция	Прямая проекция	Боковая проекция
Медиальная стенка ножки	+	-	+	+ -
Нижняя стенка ножки	+	+	+	+
Верхняя замыкательная пластинка	+	+	+	+
Нижняя замыкательная пластинка	+	+	+	+
Задняя поверхность тела позвонка	-	+ -	+ -	+
Передняя поверхность тела позвонка	-	+	+	+

Определены рекомендуемые диапазоны расстояний от объекта исследований до рентгеновского излучателя и оптимальных смещений рентгеновского излучателя (углов поворота дуги аркоскопа), позволяющих получить качественные стереоизображения. Расстояние от рентгеновского излучателя до исследуемого объекта должно быть не менее 35-40 см. Оптимальное смещение рентгеновского излучателя при выполнении второго снимка составляет примерно 5-10 см. При этом угол поворота дуги аркоскопа относительно объекта исследования должен быть в пределах от 5 до 15 градусов. Стереоэффект нивелировался при меньших значениях расстояния до объекта и смещениях рентгеновского излучателя из-за уменьшения глубины наблюдаемого стереорентгеновского изображения. При больших величинах смещения рентгеновского излучателя зрительная система человека не позволяет объединить два изображения в одно стереоскопическое. Стереовизуализация корня дужки была возможна для шейных и поясничных позвонков при смещении рентгеновского излучателя в аксиальной плоскости, для грудных позвонков наиболее оптимально смещение рентгеновского излучателя в сагиттальной (рис. 2, 3).

Маркировка зоны исследования рентген-контрастными элементами, расположенными кпереди и кзади от объекта, позволяет облегчить восприятие глубины изображения на стереоизображениях. В качестве маркеров могут быть использованы как специально изготовленные рентген-контрастные сетки, так и ранорасширители, провода или электроды (рис. 3).

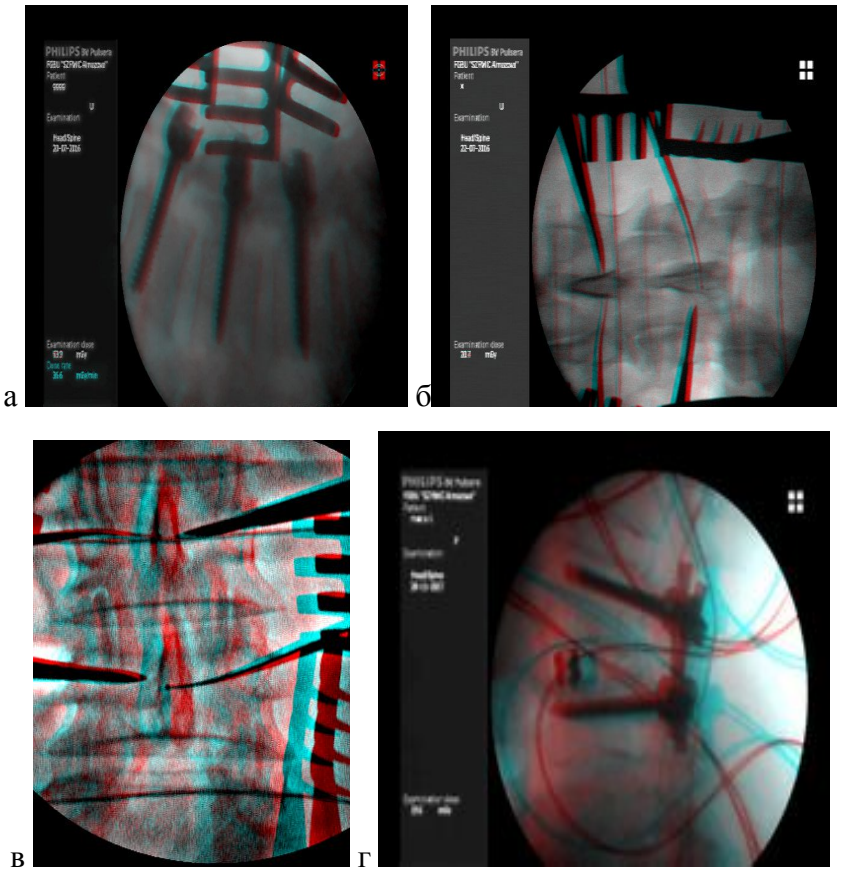


Рис. 3. Маркировка зоны исследования различными элементами:
а, б - маркировка ранорасширителями; в, г - маркировка расширителями и рентген-контрастными метками (проводами)

Стандартный интраоперационный рентгеновский контроль предусматривает выполнение прямой и боковой рентгенограммы с регистрацией не менее чем двух снимков (для прямой проекции 0,8 + 1,0 мЗв, для боковой проекции =1,8 мЗв). При выполнении стереорентгеновской навигации изображение формируется из двух последовательных снимков в одной проекции (для прямой проекции 0,8 х2 =1,6 мЗв и 1,0х2 =2 мЗв для боковой проекции). Таким образом, лучевая нагрузка при стереорентгеновской навигации не отличается от таковой при получении стандартных снимков в прямой и боковой проекциях и в среднем составляет 1,8 мЗв. Использование стереорентгеновской навигации позволило оценить объемные соотношения элементов позвонка, выполнить имплантацию винтов по одному исследованию, что таким образом может сократить общую лучевую нагрузку за счет сокращения необходимого для выполнения имплантации количества рентгеновских снимков.

Длительность стандартной процедуры рентгеновского контроля складывается из времени, необходимого на выполнение двух снимков и перевода С-дуги из фронтального в боковое положение и обратно; время выполнения стандартной процедуры составило от 40 до 80 секунд. Процесс получения стереорентгеновского изображения состоит из двух

последовательно выполняемых снимков и не требует значительного перемещения рентгеновской трубки. Вместе со временем компьютерной обработки изображений процедура стереорентгеновского контроля занимала от 20 до 40 секунд, т.е. примерно в два раза меньше.

Заключение. Полученные результаты показали возможность выполнения транспедикулярной имплантации с использованием стереорентгеновской навигации. Использование стереоснимков, полученных в одной проекции, позволяет удовлетворительно визуализировать все анатомические ориентиры с возможностью оценки их объемных соотношений, включая рентген-экранированные зоны нижнешейных и верхнегрудных позвонков.

В ходе исследования экспериментально определены условия применения предложенного метода для различных уровней позвоночника. При выполнении стереорентгеновской навигации целесообразно использование прямых снимков, направление смещения трубки выбирать соответственно плоскости наклона корня дужки относительно тела позвонка.

Сравнение лучевой нагрузки и длительности исследования при стандартной и стереорентгеновской навигации выявило возможность сокращения количества контрольных снимков и общего времени операции, особенно в условиях измененной и сложной анатомии.

Предложенный метод интраоперационной навигации может быть использован при выполнении стабилизирующих операций на всех отделах позвоночника. Для оценки перспектив клинического применения предложенного метода в хирургии позвоночника требуется проведение дальнейших исследований.

Список литературы

1. Houten J.K., Nasser R., Baxi N. Clinical assessment of percutaneous lumbar pedicle screw placement using the O-arm multidimensional surgical imaging system // Neurosurgery, 2012, vol. 70[4], pp. 990–995.
2. Phila P. Intraoperative spinal navigation // Spine, 2003, vol. 1; 28[15 Suppl], pp. 54-61.
3. Holly L.T., Foley K.T. Shoulder traction device for enhanced conventional fluoroscopy during cervical spine operations // Neurol. Med.Chir., 2013, vol. 53[2], p. 82.
4. Marangoz A., Cokluk C., Kuruoglu E. et al. A novel device to simplify intraoperative radiographic visualization of the cervical spine by producing transient caudal shoulder displacement: a 2-center case series of 80 patients // Neurosurg Spine, 2013, vol. 19[6], pp. 697-700.

5. Witiw C.D., Citow J.S., Ginsberg H.J. et al. Retrospective computed tomography scan analysis of percutaneously inserted pedicle screws for posterior transpedicular stabilization of the thoracic and lumbar spine: accuracy and complication rates // Spine, 2012, vol. 20; 37[12], p. 1092.
6. Bourgeois A.C., Faulkner A.R., Pasciak A.S., Bradley Y.C. The evolution of image-guided lumbosacral spine surgery // Ann. Transl. Med., 2015, vol. 3[5], p. 69.
7. Raley D.A., Mobbs R.J. Evaluation of Screw Placement Accuracy in Circumferential Lumbar Arthrodesis Using Robotic Assistance and Intraoperative Flat-Panel Computed Tomography Author links open overlay panel // World Neurosurgery, 2017, vol. 105, pp. 86-94.
8. Van de Kelft E., Costa F., Van der Planken D., Schils F. A prospective multicenter registry on the accuracy of pedicle screw placement in the thoracic, lumbar, and sacral levels with the use of the O-arm imaging system and stealthstation navigation // Spine, 2012, vol. 37[25], pp. 1580–1587.
9. Kim T.T., Drazin D., Shweikeh F. et al. Clinical and radiographic outcomes of minimally invasive percutaneous pedicle screw placement with intraoperative CT (O-arm) image guidance navigation // Neurosurgical Focus, 2014, vol. 36, no. 3.
10. Drazin D., Kim T.T., Polly Jr. D.W., Johnson J.P. Introduction: intraoperative spinal imaging and navigation. Neurosurgical Focus, 2014, vol. 36, no. 3.
11. Park P., Foley K.T., Cowan J.A., Marca F.L. Minimally invasive pedicle screw fixation utilizing O-arm fluoroscopy with computer-assisted navigation: Feasibility, technique, and preliminary results // Surgical Neurology International, 2010, vol. 1, p. 44.
12. Isik C., Kose K.C., Inanmaz M.E. et al. The mechanisms of medial pedicle wall violation: insertion method is as important as correct cannulation of the pedicle // Advances in Orthopedics, 2014, vol. 5.
13. Нечаев А.И., Назарук В.П. Способ получения трехмерных рентгеновских изображений: Патент РФ № 2298887 от 12.04.2004 г.
14. Чрескожно-чреспеченочная холангиография: учебно-методическое пособие / В.П. Назарук, А.Б. Мелконян. – СПб.: Изд-во ЦНИОКИ ЦПИ, 2004. - 44 с.
15. Нечаев А.И. Метод регистрации и визуализации трехмерных рентгеновских изображений в режиме реального времени для задач неразрушающего контроля и медицинской диагностики / А.И. Нечаев, В.П. Назарук, С.Э. Чернакова // Информационные технологии. - 2005. - № 11. - С. 11-21.