

На правах рукописи



Стучебров Сергей Геннадьевич

**ТОМОГРАФИЧЕСКАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ РЕНТГЕНОВСКИХ
ИЗОБРАЖЕНИЙ С СУБМИЛЛИМЕТРОВЫМ
ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ НА ОСНОВЕ
ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ**

01.04.20 – Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2014

Работа выполнена на кафедре Прикладной физики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,
профессор
Потылицын Александр Петрович

Официальные оппоненты:

Воробьёв Александр Павлович,
Доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение Государственный научный
центр Российской Федерации Институт
физики высоких энергий НИЦ
«Курчатовский институт» г. Протвино,
главный научный сотрудник

Найден Евгений Петрович
Доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Национальный
исследовательский Томский
государственный университет»,
профессор

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное
учреждение «Петербургский институт
ядерной физики им. Б.П. Константинова»

Защита состоится “23” декабря 2014 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.05 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, Томск, пр. Ленина, 2а, ауд. 326.

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте <http://portal.tpu.ru/council/912/worklist>.

Автореферат разослан “22” октября 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
канд. ф.-м. наук, доцент



Кожевников А.В.

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Сегодня рентгеновские томографические методы нашли применение во многих областях науки, медицины и промышленности. Однако разработки последних десятилетий не позволяют добиться качественного скачка в снижении дозовых нагрузок на исследуемые объекты, значения которых часто очень важны, особенно при медицинских диагностических процедурах.

Ряд современных технологий в медицине и промышленности основан на использовании квазимонохроматического рентгеновского излучения, например маммография, ангиография в медицине, фазово-контрастная визуализация в биологии, системы увеличения чувствительности в системах досмотра и безопасности и другие [1, 2]. Кроме того, использование монохроматического рентгеновского источника ведет к существенному снижению дозы при повышении контрастности изображения. К сожалению, дополнительная монохроматизация пучка рентгеновского излучения трубки с помощью кристаллического монохроматора обеспечивает фиксированную энергию линии характеристического излучения (ХРИ) при практически полном подавлении сплошного тормозного спектра. Интенсивность монохроматических линий вне пиков ХРИ весьма слабая и не обеспечивает необходимых для приложений параметров.

Возможным решением проблемы является применение электронных ускорителей в качестве источника рентгеновского и гамма-излучения. Самыми распространенными являются источники синхротронного излучения (СИ). Длина волны СИ зависит от энергии ускоряемых частиц и величины магнитного поля. СИ имеет малую угловую расходимость и высокую интенсивность, недостижимую при использовании иных источников излучения [3]. Такие свойства позволяют получать высокоинтенсивные монохроматичные спектральные линии, с регулируемой длиной волны. С другой стороны, большими недостатками являются громоздкость, высокая стоимость, дороговизна эксплуатации. Кроме того, энергетическая эффективность использования таких установок в качестве источника рентгеновского излучения весьма специфична, поэтому сравнение их с другими источниками некорректно. Чтобы получить синхротронное излучение с энергией в несколько десятков кэВ, энергия электронов в ускорителе должна быть порядка нескольких ГэВ.

Вопросы создания рентгеновского источника с требуемыми параметрами на основе компактных электронных ускорителей усиленно прорабатываются в последние годы [4, 5]. В основе таких источников могут быть линейные ускорители, бетатроны и микротроны. В работах [6, 7] демонстрируются возможности получения регулируемой линии электромагнитного излучения в области до 40 кэВ на электронных ускорителях с энергией частиц до 50 МэВ.

Работа с ускорителями в качестве импульсных источников излучения имеет ряд особенностей. Так как ток в импульсе существенно больше средних значений, используемые детекторы должны быть способны к работе с достаточно высокими мощностями доз. Кроме того высокая частота повторения импульсов и быстрые смены профиля интенсивности пучка добавляют требования к

быстродействию регистрирующей аппаратуры. Плюсом при работе с импульсными источниками является то, что в цикле работы детекторов часть времени необходима для обработки и передачи сигналов, в течение которого излучение не регистрируется. Таким образом, при использовании постоянно действующих источников, возникает излишняя дозовая нагрузка, а при синхронизации импульсного источника с детектирующим оборудованием, бесполезная дозовая нагрузка исключается.

Таким образом, исследования и разработка технологий для создания томографического оборудования на базе импульсных источников, отвечающего современным требованиям и позволяющего снизить дозовые нагрузки на исследуемые объекты являются важными и актуальными.

Цель и задачи работы

Целью работы является исследование возможности применения импульсных источников излучения для получения проекционных и томографических изображений при пониженных дозовых нагрузках и экспериментальная апробация их применения на созданных прототипах рентгеновских установок с субмиллиметровым пространственным разрешением.

В соответствии с общей целью работы в диссертации решаются следующие основные задачи:

1. создание экспериментальных стендов с импульсными источниками в качестве прототипов для апробации метода получения проекционных рентгеновских снимков на основе многоканальных детекторов (полупроводникового и газоразрядного) и исследование их основных характеристик;
2. визуализация рентгеновских изображений с субмиллиметровым разрешением от импульсного рентгеновского источника;
3. разработка алгоритмов для восстановления томографического сечения из синограмм для произвольного угла расходимости пучка излучения;
4. измерение дозовых нагрузок на исследуемые образцы во время получения проекционных снимков и синограмм от импульсного источника.

Научная новизна

1. Созданы прототипы рентгеновских установок для получения цифровых рентгеновских проекционных и томографических изображений с субмиллиметровым разрешением. В качестве детектирующего оборудования использовались полупроводниковый линейный (стриповый) GaAs детектор и многоканальный линейный газоразрядный детектор.
2. Разработан алгоритм получения и обработки синограмм для случаев с параллельным пучком излучения и с расходящимся пучком с произвольным углом расходимости.
3. Разработана методика исследования внутренней структуры биологических объектов с применением импульсных источников.
4. Разработан способ измерений дозовых нагрузок для импульсных источников рентгеновского излучения, реализованный на рентгеновской трубке РАП-160-5 и на бетатроне ОБЬ-4.

Научная и практическая и ценность

В работе создан прототип цифровой рентгеновской установки на импульсном источнике с детектирующим элементом GaAs-512-0.1, на основе арсенида галлия компенсированного хромом (GaAs:Cr), предназначенный для визуализации рентгеновских изображений с субмиллиметровым разрешением.

В ходе работы создан прототип цифровой рентгеновской установки на базе линейного газоразрядного детектора ПРИЗ-1536, синхронизованного с импульсным источником излучения, предназначенный для получения рентгеновских изображений с субмиллиметровым разрешением образцов размером до 400 мм.

В ходе работы создан алгоритм рентгеновского исследования внутренней структуры биологических объектов на импульсных установках. Показано снижение дозовых нагрузок на образцы при исследованиях на разработанных прототипах.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Установка с импульсным источником на базе многоканального стрипового GaAs детектора, позволяющая получать проекционные и томографические снимки образцов с разрешением до 5 пар линий/мм.
2. Установка с импульсным источником на базе многоканального линейного газоразрядного детектора, позволяющая делать проекционные и томографические снимки образцов с размером до 400 мм с разрешением до 1,4 пар линий/мм.
3. Алгоритм реконструкции томографических изображений из синограмм для случаев с параллельным пучком излучения и с расходящимся пучком с произвольным углом расходимости, который является одной из характеристик электронного ускорителя.
4. Результаты измерений эквивалентных доз, составляющих для установки с полупроводниковым детектором 14 мкЗв при получении проекционных рентгеновских снимков и 2,8 мЗв при получении синограмм, на установке с газоразрядным детектором 15 мкЗв при получении проекционных снимков и 9,5 мЗв при получении синограмм, показывающие их значительное уменьшение по сравнению с дозами, получаемыми от источников постоянного действия.

Достоверность и обоснованность результатов

Достоверность и обоснованность результатов работы обеспечиваются систематическим характером исследований, использованием откалиброванной и поверенной измерительной аппаратуры и дозиметрических систем, использованием различных экспериментальных методик.

Апробация

Результаты диссертации докладывались на следующих российских и международных конференциях:

1. I Региональная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность», Томск, 2011;

2. Всероссийский конкурс научно-исследовательских работ студентов и аспирантов в области физических наук в рамках Всероссийского фестиваля науки, Томск, 2011;
3. VIII Международная конференция студентов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук», Томск, 2011;
4. IX International Symposium Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures (RREPS-11), Egham, Great Britain, 2011;
5. III Международная конференция-школа молодых атомщиков Сибири, Томск, 2012;
6. Международная школа-конференция «Ядерно-физические технологии в клинической и экспериментальной медицине: состояние, проблемы, перспективы», Томск, 2013;
7. X International Symposium Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures (RREPS-13), Erevan, Armenia, 2013;
8. II Международная конференция школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых «Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее», Томск, 2013;
9. IV Международная школа-конференция молодых атомщиков Сибири, Томск, 2013;
10. XVII Международная телекоммуникационная конференция молодых ученых и студентов «Молодежь и наука», Москва, 2013;
11. XI Международная конференция студентов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук», Томск, 2014.
12. VI Международная научно-практическая конференция «Физико-технические проблемы атомной энергетики и промышленности», Томск, 2014

Личный вклад

Личный вклад автора состоит в создании экспериментальных стендов, выборе методик экспериментов, проведении исследований, анализе их результатов и подготовке публикаций. Все представленные в диссертации результаты получены автором лично. Автором самостоятельно выдвинуты все защищаемые научные положения. Вклад соавторов в основные публикации не превышал 40% от общего объема работы.

Публикации

По теме диссертации опубликованы 24 работы, из которых 7 статей в изданиях, включенных в списки ВАК, 4 статьи индексируются базой Web of Science и SciVerse Scopus, а также 11 тезисов докладов на международных конференциях.

В рамках исследований получены три свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ. Получены два акта о внедрении научных исследований.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, семи приложений и списка цитируемой литературы, содержащего 103

библиографические ссылки. Общий объем диссертации составляет 124 страницы и включает 46 рисунков и 7 таблиц.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, проведен краткий обзор литературы на тему исследования. Описана структура диссертации и сформулированы основные задачи, решаемые в ней.

В первой главе описана экспериментальная установка с импульсным источником для получения информации о внутреннем распределении плотности исследуемых объектов на базе многоканального стрипового полупроводникового детектора. Исследовано ее пространственное разрешение. Описаны основные технические проблемы, которые решались во время сборки и отладки установки. Приведены результаты исследований основных параметров созданной установки.

Для создания прототипа с чувствительным элементом, основанным на полупроводниковых детекторах, был выбран линейный тип детекторов на основе арсенида галлия, компенсированного хромом (GaAs:Cr). Линейный тип детектора был выбран по причине экономической целесообразности в сравнении с матричными системами.

На начальном этапе для выработки требований к параметрам стрипового детектора, обеспечивающего требуемое разрешение и быстродействие, в качестве детектирующей части в установке использовался микростриповый полупроводниковый детектор GaAs-640-0.2, разработанный в ГНЦ ИФВЭ в 2006 г. Для обеспечения максимальной эффективности регистрации рентгеновского излучения с энергией до 200 кэВ чувствительные элементы имеют следующие геометрические размеры: ширина 200 мкм, длина 2 мм, толщина 200 мкм. Детекторная сборка состоит из 640 чувствительных элементов общей длиной 128 мм и шириной 200 мкм.

Время экспозиции чувствительных элементов задается частотой внешнего генератора и определяется следующим образом:

$$\tau_{\text{экс}} = \frac{68 \cdot 10}{f_{\text{ген}}}, \quad (1)$$

где $\tau_{\text{экс}}$ – время экспозиции отдельной строки; 68 – количество операций каждого мультиплексора при обработке отдельной строки: из них 64 операции соответствуют количеству детекторов, а 4 цикла необходимы для выполнения внутренних команд; 10 – количество 64-канальных сборок, которых по очереди опрашивают два мультиплексора платы управления; $f_{\text{ген}}$ – частота внешнего генератора. Таким образом, для сбора данных со всех детектирующих элементов (для получения одной строчки) необходимо, чтобы с внешнего генератора на вход блока детектирования пришло 680 сигналов.

Для апробации работы установки с импульсным источником рентгеновского излучения применялся частотно-импульсный рентгеновский аппарат РАП-160-5. Частота импульсов излучения изменяется в зависимости от величины установленного тока и напряжения, и варьирует от 100 до 830 Гц. Время импульса излучения составляет около 140 мкс. Аппарат имеет выход синхронизирующего сигнала. Напряжение на аноде изменяется в диапазоне (40-160) кВ с шагом в 1 кВ; анодный ток в диапазоне (0,4-5,0) мА с шагом 0,1 мА;

максимальная мощность 0,6 кВт; размеры фокусного пятна 1,2х1,2 мм; мощность дозы при 160 кВ и 5 мА на расстоянии 0,5 м от окна 16 Р/мин.

На основе описанных узлов был создан экспериментальный стенд, где все узлы оставались неподвижны, кроме объекта исследования, перемещавшегося перпендикулярно детекторной линии. Каждый снимок являлся отдельной строчкой изображения. Сигналы с устройства передавались на плату обработки персонального компьютера, где переводились в цифровой вид и обрабатывались. В такой схеме скорость перемещения объекта определяет разрешение итогового снимка в направлении перпендикулярном детекторной линии.

Для калибровки получаемых данных был изготовлен калибровочный образец «лестница» из тканезквивалентного материала с шагом толщины 10 мм. Наличие нескольких ступеней позволяет делать калибровку по аппроксимированной линии второго порядка. В рамках работы над описанными задачами синхронизации, фильтрации и калибровки данных, а также визуализации результатов были созданы специальные программные решения, прошедшие государственную регистрацию.

Проведенные далее исследования выявили ряд недостатков детектора GaAs-640-0.2, которые были учтены при подготовке технического задания на изготовление детектора нового поколения. Таким образом, были сформулированы следующие требования к характеристикам и режимам работы нового детектора: Ethernet протокол для соединения с персональным компьютером; возможность синхронизации с импульсным источником излучения по TTL сигналу; разрядность АЦП не менее 8 бит; пакетная передача данных; 1 строчка детекторов; 512 детекторов в строчке; детекторный шаг не более 100 мкм; контрастная чувствительность не более 1,5 %; динамический диапазон не менее 200; максимальная частота генерации строчек не менее 1 кГц; регистрируемая энергия квантов в диапазоне (25-250) кэВ; питание от сети ~220 В, 50 Гц. Для создания новой детектирующей части на основе выработанных рекомендаций было подготовлено техническое задание, по которому в СФТИ при ТПУ (г. Томск) был изготовлен многоканальный стриповый детектор GaAs-512-0.1.

Блок детектирования GaAs-512-0.1 состоит из 512 GaAs-детекторов; детекторный шаг 100 мкм; ширина чувствительной области 51,2 мм; минимальный динамический диапазон 500; максимальная контрастная чувствительность 1%; максимальные геометрические искажения 1,5%; максимальная частота генерации строчек, 7 кГц; максимальная потребляемая мощность 30 Вт. Среди преимуществ детектора GaAs-512-0.1 важно отметить способность работать при комнатных температурах и высокое быстродействие.

Период строк может задаваться по сигналу внутренней синхронизации, частота которого задается оператором, или по внешнему сигналу синхронизации. В приборе предусмотрен выход синхронизирующего сигнала для сопряжения с другими устройствами. На выходе синхронизации формируются импульсы с амплитудой 5 В с задаваемой задержкой и длительностью. На рисунке 1 представлена временная диаграмма работы детектора GaAs-512-0.1.

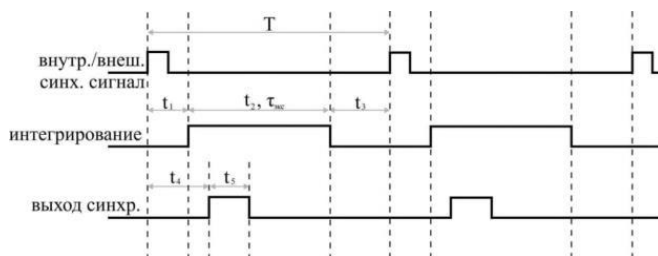


Рисунок 1 – Временные диаграммы работы детектора GaAs-512-0.1

По синхронизирующему сигналу начинается цикл работы устройства. Через временной интервал задержки t_1 , задаваемый оператором, начинается регистрация излучения. Интервал t_1 определяет задержку интегрирования относительно синхроимпульса. Длительность интервала интегрирования t_2 , во время которого происходит накопление заряда на детекторах, также задается оператором. Таким образом, интервал t_2 является временем экспозиции детекторов $\tau_{\text{эк}}$. После набора заряда наступает интервал t_3 , в течение которого происходит преобразование величины этого заряда в цифровой вид. Интервал обработки t_3 является фиксированной величиной и составляет 140 мкс. Период строк T складывается из интервала задержки t_1 , времени интегрирования t_2 и времени обработки данных t_3 . Из этого следует, что минимальный период регистрации строки T не может быть меньше времени обработки данных – 140 мкс, что соответствует частоте 7 кГц.

Характерные частоты генерации импульсов современных микротронов и линейных ускорителей десятки герц. Максимальной частотой среди компактных электронных ускорителей обладает бетатрон, значение которой можно считать 1 кГц (характерная частота на текущий момент 400 Гц). Таким образом, быстродействие используемого детектора позволяет работать с ускорителями в качестве источника рентгеновского излучения.

Разрешение всей установки определялось при помощи получения рентгеновских снимков тест-объекта (измерительной миры), имеющего насечки разных размеров, предназначенного для определения разрешения рентгенографических установок. Насечки с самым мелким размером, различимые на снимке миры, определяют разрешение выбранной геометрии. Различимость элементов изображения определялось при помощи функции *Profiler* программного обеспечения *ISee!*, разработанного в Федеральном институте исследований и контроля материалов Германии (BAM). Полученные значения разрешения вдоль линии перпендикулярной детекторной были равны 2,5 парам линий/мм, вдоль детекторной линии до 5 пар линий/мм.

Во второй главе описана установка на основе многоканального линейного газоразрядного детектора рентгеновского излучения, предназначенная для получения рентгеновских проекционных снимков с использованием импульсных источников. Приведены результаты измерений основных характеристик прототипа. Показаны результаты съемки различных объектов. Описаны способы определения оптимальных геометрических параметров установки.

В качестве детектирующей части в данной установке использовался цифровой линейный многоканальный газоразрядный детектор ПРИЗ-1536,

разработанный в ИЯФ СО РАН (г. Новосибирск). Рентгеновский снимок на установке получается путем последовательного сканирования тонким веерообразным пучком рентгеновского излучения. Для устранения параллаксной ошибки, чувствительные полосы камеры расположены веерообразно и ориентированы на фокус рентгеновской трубки (на расстояние 1350 мм).

Шаг чувствительных полосок детектора ПРИЗ-1536 определяет разрешение вдоль детектора, а разрешение по направлению сканирования определяет выбранный оператором шаг смещения детектора. Количество чувствительных элементов детектора 1536; шаг чувствительных элементов 0,261 мм; ширина чувствительной области 400 мм; расстояние фокус-приемник 1350 мм; время интегрирования сигнала меняется в диапазоне (2,5-5,0) мс; разрядность АЦП 14 бит; средняя чувствительность не менее 8 отсчетов АЦП на 1 мкР; контрастная чувствительность не менее 1,5%; динамический диапазон не менее 1600; геометрические искажения не более 3%.

На рисунке 2 представлена временная диаграмма цикла работы детектора ПРИЗ-1536.

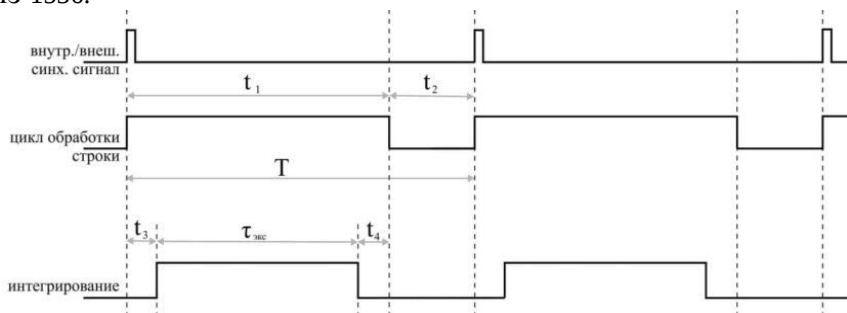


Рисунок 2 – Временная диаграмма работы детектора ПРИЗ-1536

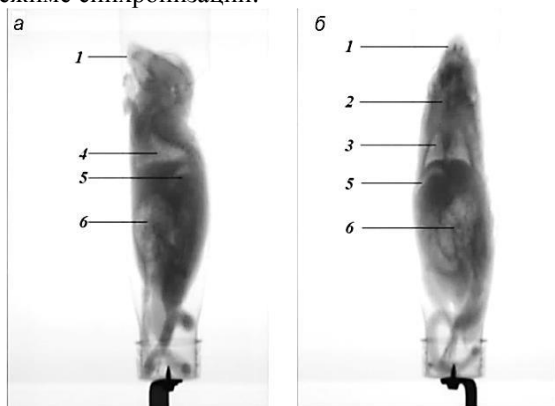
При появлении синхронизирующего сигнала в детекторе начинается процедура обработки строки t_1 длительностью 4,5 мс. Одновременно с этим с задержкой t_3 , не превышающей 30 мкс, устройство переходит в режим регистрации излучения, который заканчивается за время t_4 , равное 20 мкс, до окончания цикла обработки накопленных данных. Из выше сказанного следует, что время интегрирования $\tau_{\text{инт}} \approx 4,45$ мс. После обработки данных детектору необходимо время t_2 , равное 0,5 мс, для перехода в режим полной готовности к новому циклу регистрации строки. Таким образом, минимальный период регистрации строчек T равен сумме t_1 и t_2 , что составляет 5 мс, и определяет максимальную частоту работы детектора 200 Гц. Детектор способен работать в режиме внутренней синхронизации (частота генерации строчек будет максимально возможная и равная 200 Гц), а также в режиме внешней синхронизации, с частотой не более 200 Гц. Такое быстроедействие детектора соответствует режимам работы линейных импульсных ускорителей и микротронов, а так же значительной части современных бетатронов, что позволяет использовать детектор в системах с компактными электронными ускорителями в качестве источника излучения.

Для апробации работы установки с импульсными источниками излучения в данной установке был выбран тот же рентгеновский аппарат РАП-160-5.

Геометрия установки была выбрана с учетом уже готовой системы позиционирования детектора. Неподвижный точечный источник генерирует импульсное рентгеновское излучение в направлении детектора. Детектор перемещается по дуге окружности с радиусом кривизны 1350 мм, рабочий ход детектора по дуге 400 мм. Фокусное пятно источника располагается в центре кривизны линии перемещения детектора. Между детектором и источником устанавливается неподвижный исследуемый объект.

Для нахождения оптимального положения исследуемого объекта на разных расстояниях от источника излучения делались рентгеновские снимки тест-объекта (измерительной миры). Снимки делались при параллельной и перпендикулярной ориентации насечек миры по отношению к детекторной линии. Наибольшее значение разрешения вдоль линии детекторов составило 1,4 пар линий/мм и измерено при 100 см между исследуемым объектом и источником. Разрешение вдоль линии перпендикулярной детекторной на этом расстоянии 0,7 пар линий/мм. Оптимальным расстоянием является 35 см, при котором разрешения в обоих направлениях равны 1,2 пар линий/мм. При такой геометрии размер объекта, полностью уместяющегося на одном снимке, ограничен десятью сантиметрами.

На рисунке 3 представлены примеры результатов съемки биологических объектов – лабораторных крыс, сделанные на расстоянии 100 см от фокусного пятна трубки в режиме синхронизации.



1 – резцы, 2 – трахея, 3 – сердце, 4 – легкие, 5 – диафрагма, 6 – тонкая кишка; а) – профиль, б) – фас

Рисунок 3– Рентгеновские снимки лабораторной крысы

Полученные снимки пригодны для анализа внутренних органов грызуна. На снимках отчетливо определяются верхняя и нижняя челюсть, глазное яблоко, фаланги, пястные кости, ткани ушей, позвонки, сердце, ребра, диафрагма, шерсть и так далее.

Результаты работы подтверждают, что использование газоразрядных детекторов при исследовании внутренней структуры крупных объектов с использованием импульсных источников, позволяет получить снимки достаточно высокого качества, что, с учетом разницы стоимости детекторных систем,

является более целесообразным для данных задач, чем использование полупроводниковых систем.

В **третьей главе** описывается применение вышеописанных установок для получения синограмм, из которых далее восстанавливаются томографические срезы. Синограмма – это графическое представление поочередного сложения проекций одного слоя объекта, полученных под разными углами. В главе также описан выбор томографических методов. Приведены результаты томографического восстановления распределения плотности внутренней структуры отдельных слоев исследуемых объектов. Обсуждаются полученные результаты и перспективы их применения.

Томографические методы чаще всего основаны на восстановлении структуры слоя из синограммы при помощи обратного преобразования Радона (или его модификации), которое позволяет восстанавливать функцию по ее проекциям. Для функции двух переменных преобразования Радона можно описать следующим образом. Если $f(x,y)$ является функцией двух действительных переменных, определенной на всей плоскости и достаточно быстро убывающая на бесконечности, то ее преобразованием по Радону будет функция:

$$R(s, \alpha) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(s \cos \alpha - z \sin \alpha, s \sin \alpha + z \cos \alpha) dz. \quad (2)$$

Преобразование имеет следующий геометрический смысл: $R(s, \alpha)$ является интегралом от функции $f(x,y)$, взятый вдоль прямой AA' , перпендикулярной вектору $\vec{n} = (\cos \alpha, \sin \alpha)$ и проходящей на расстоянии s от начала координат, измеренном вдоль вектора $\vec{n}$.

При измерении линейным детектором степени поглощения параллельного пучка рентгеновских лучей каким-либо объектом, согласно закону Бугера-Ламберта-Бера, интенсивность излучения, зарегистрированная отдельным детекторным элементом пропорциональна величине

$$I_i \sim \exp\left(-\int_{AA'} dz \rho(x, y)\right), \quad (3)$$

где I_i – интенсивность излучения, зарегистрированная i -тым детекторным элементом, находящимся на прямой AA' ; $\rho(x,y)$ – оптическая плотность исследуемого объекта; z – координата на прямой AA' .

На рисунке 4 схематично изображен метод получения линейных проекций и принцип сложения из них синограмм.

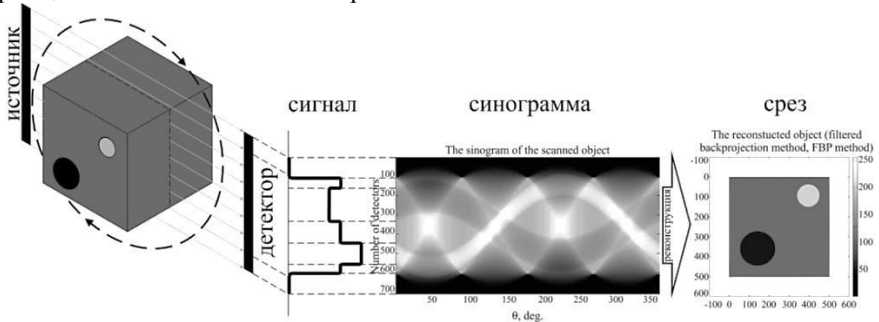


Рисунок 4 – Схематичное представление принципа получения синограмм

Излучение, проходя через объект, частично в нем поглощается и регистрируется детектором. Информация об интенсивности излучения

преобразуется в графический вид – в полоску шириной в один пиксель, где градация яркости пикселя соответствует уровню зарегистрированного сигнала, а положение пикселя соответствует положению детектирующего элемента. После этого объект поворачивается на заданный угол, и процедура повторяется. Последовательное сложение строчек, полученных при разных положениях образца, в двухмерное изображение образует синограмму. Описанный метод предполагает применение параллельного пучка излучения. На практике чаще приходится сталкиваться с расходящимися пучками. В этих случаях в алгоритм восстановления необходимо вносить изменения, учитывающие такую геометрию.

Оба прототипа были модифицированы для возможности получения синограмм. При этом в обеих установках источник, исследуемый объект и детектор находятся на одной линии. Подвижным является только образец, который вращается на 360° по оси, перпендикулярной детекторной линии.

Для восстановления томографического сечения из синограмм для случая параллельного пучка использовалась вычислительная среда *MATLAB*, в которой обратное преобразование Радона реализовано в виде функции *iradon*, входящая в пакет расширений *Image Processing Toolbox*. Для восстановления из синограмм для случая веерного пучка в системе *MATLAB* имеется оператор *ifanbeam*, однако он имеет ряд больших ограничений, что делает невозможным применение данной функции в поставленных целях. Было принято решение использовать в случае расходящегося пучка программное обеспечение *NRecon*, разработанное компанией Bruker микро-СТ, позволяющее проводить реконструкцию из набора теневых проекций при произвольном угле расхождения. Для адаптации синограмм в наборы теневых проекций каждая строка синограммы, представляющая собой теневой снимок высотой 1 пиксель, многократно дублировалась, и из этих дублей складывалось двухмерное изображение, имитирующее полноценный проекционный снимок.

Для определения оптимального шага углового смещения нужно рассчитать оптимальное количество проекций, необходимых для полного восстановления объема. Расчеты осуществляются по следующей формуле:

$$N_o = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_{sov}}{V_{res}}, \quad (4)$$

где N_o – оптимальное количество проекций; r_{sov} – радиус цилиндрического объема, в который вписан вращающийся образец; V_{res} – эффективный размер вокселя (минимального элемента цифрового объемного изображения, названного по аналогии с плоскими пикселями). Важно отметить, что V_{res} является объемным разрешением итогового воксельного изображения (объемного растрового изображения, состоящего из элементарных объемов – вокселей) и находится из следующего отношения:

$$V_{res} = \frac{P_{det}}{M}, \quad (5)$$

где P_{det} – детекторный шаг устройства регистрации; M – коэффициент геометрического увеличения. В случаях работы с одним слоем (одной синограммой), V_{res} является пространственным разрешением реконструированного изображения. Коэффициент геометрического увеличения M определяется по следующей формуле:

$$M = \frac{L_{sdd}}{L_{sod}}, \quad (6)$$

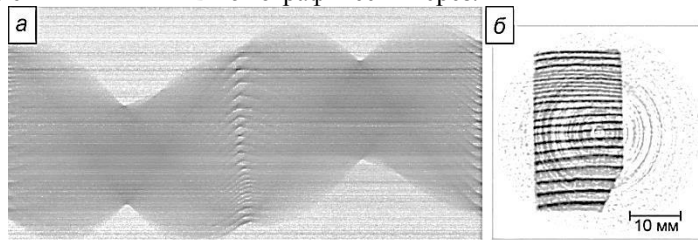
где L_{sdd} – расстояние между источником и детектором; L_{sod} – расстояние между источником и объектом исследования. После нахождения оптимального количества проекций значение оптимального шага углового смещения $\Delta\varphi$ (в градусах) рассчитывается по следующей формуле:

$$\Delta\varphi = \frac{360}{N_o}, \quad (7)$$

В установке с полупроводниковой детектирующей частью при получении синограмм расстояние между детектором и источником составляет 120 см. Объект исследования располагается на расстоянии 110 см от источника. Угол расходимости пучка рентгеновского излучения, попадающего в чувствительную область детектора, равен $2,4^\circ$. В силу небольших геометрических размеров детектора GaAs-512-0.1, расстояний между основными узлами установки и размера фокусного пятна источника, в данной установке принимается допущение, что пучок рентгеновского излучения параллельный.

В установке с газоразрядным детектором при получении синограмм расстояние детектор-источник равно 135 см. Исследуемые объекты расположены на расстоянии 120 см от источника. Угол расходимости пучка излучения, попадающего в чувствительную часть детектора $17,9^\circ$. Таким образом, используемые в этом прототипе, методы восстановления должны быть подобраны с учетом расходимости пучка.

На рисунке 5 представлена синограмма соснового бруска и восстановленный в *MATLAB* томографический срез.

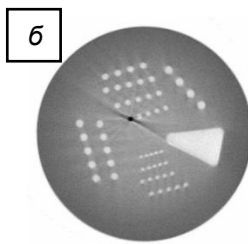
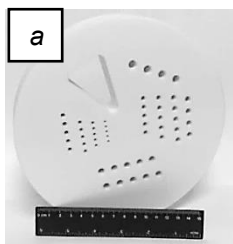


а) – синограмма; б) – срез реконструированный в системе *MATLAB*

Рисунок 5 – Рентгеновские изображения бруска сосны *Pinus sylvestris*

Пространственное разрешение полученных томографических изображений определялось по формулам 5 и 6 и равно 5,4 пар линий/мм (92 мкм), однако, при измерении тест-объектом мирой, пространственное разрешение составило 5 пар линий/мм. Разница объясняется рассеиванием излучения и большим размером фокусного пятна источника. Как известно, деревья имеют невысокую плотность, и разброс в профиле плотности годовичных колец невелик. Тем не менее, реконструированные слои бруска сосны демонстрируют возможность различать годовые кольца растения.

Для установки с газоразрядным детектором в качестве исследуемого образца был выбран модуль комбинированного фантома AAPM CT Performance Phantom Model 610, изготовленный из тканезквивалентного материала. Тест-объект представляет собой диск с диаметром 203,2 мм, с отверстиями различных диаметров (см. рисунок 6).



а) – фотография; б) – томограмма, восстановленная в программе *NRecon*
Рисунок 6 – Модуль фантома AAPM CT Performance Phantom Model 610

Восстановленная томограмма демонстрирует достаточную контрастность изображения и минимальное, до величины пикселя, смещение границ. Расчетное пространственное разрешение составляет 2,3 пар линий/мм (222 мкм). Расчетное пространственное разрешение составило 2,1 пар линий/мм.

В четвертой главе описан способ измерения дозовых нагрузок от импульсного источника рентгеновского излучения при исследованиях на созданных установках. Приводятся результаты расчетов эквивалентных доз, поглощенных объектами при получении проекционных и томографических снимков. Приводятся результаты исследований пространственных дозовых характеристик бетатрона ОББ-4 и анализируется его пригодность для использования в качестве источника излучения на созданных прототипах.

В процессе поиска способа определения мощности дозы выбор был сделан в пользу накопительных дозиметров. Для проведения экспериментов использовались твердотельные термолюминесцентные дозиметры ДТЛ-02, предназначенные для регистрации индивидуального эквивалента дозы фотонного излучения на глубине 1000 мг/см² в диапазоне энергий от 15 кэВ до 10 МэВ. Диапазон измерения эквивалента дозы фотонного излучения от 20 мкЗв до 10 Зв. Дозиметрический комплекс откалиброван и поверен соответствующими службами.

Дозиметры располагались на той же высоте и расстоянии от рентгеновского аппарата РАП-160-5 и подвергались облучению в тех же режимах работы источника, при которых делались проекционные снимки и синограммы. Расчет эквивалентной дозы проводился по следующей формуле:

$$E_{\text{обр}} = t_{\text{обр}} \cdot \frac{E_{\text{доз}}}{t_{\text{доз}}} \cdot k, \quad (8)$$

где $E_{\text{обр}}$ – эквивалентная доза полученная образцом; $t_{\text{обр}}$ – время облучения образца при получении снимка; $E_{\text{доз}}$ – значение дозы, полученной дозиметром; $t_{\text{доз}}$ – время облучения дозиметра; k – коэффициент, равный отношению количества полезных строчек к количеству отброшенных (часть строчек в силу несовершенства механики установки имела дублирующую информацию и перед реконструкцией отбрасывалась).

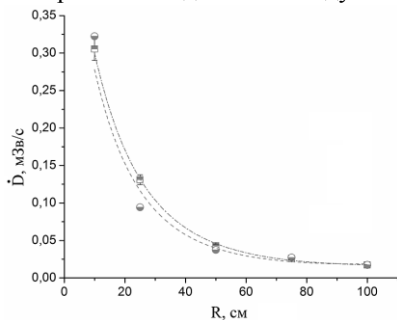
В установке с полупроводниковым детектором для проекционных рентгеновских снимков параметры установки определили эквивалентную дозу равную 14 мкЗв. При получении синограмм доза составила 2,8 мЗв. Разница эквивалентных доз при проекционных снимках и томографических обусловлена тем, что при получении проекционного снимка каждый слой образца облучается

единожды, а при получении синогограммы делается серия снимков одного и того же слоя. При получении проекционных снимков на установке с газоразрядным детектором расчетная эквивалентная доза составила 15 мкЗв. В процессе съемки синогограмм расчетная эквивалентная дозовая нагрузка составила 9,5 мЗв. Эти результаты существенно ниже общепринятых значений эквивалентных доз, получаемых пациентами при стандартных медицинских обследованиях. Так при пленочных методах медицинской визуализации дозовые нагрузки имеют следующие значения: для флюорографии нормой является доза равная 0,8 мЗв, для рентгенографии 0,4 мЗв, для рентгеноскопии 10 мЗв. Для цифровых методов общепринятые средние значения дозовых нагрузок следующие: флюорография – 0,6 мЗв; рентгенография – 0,15 мЗв; рентгеноскопия – 3,5 мЗв. Дозы при компьютерной томографии обычно составляют около 50 мЗв при обследованиях головного мозга и шеи; 20 мЗв при обследованиях таза, грудной и брюшной полости.

В качестве источника излучения в работе использовался портативный бетатрон ОББ-4. Максимальная энергия электронов составляет 4.0 МэВ. Бетатрон ОББ-4 сконструирован как импульсный источник тормозного излучения с использованием вольфрамовой мишени толщиной 0,6 мм. На первом экспериментальном этапе для первичной оценки значений мощностей доз были использованы термолюминесцентные дозиметры ДТЛ-02. Измерения проводились тремя разными детекторами на равных расстояниях от источника излучения, после чего высчитывалось среднее значение.

На следующем этапе была использована цилиндрическая ионизационная камера типа 30013, разработанная для проведения абсолютной дозиметрии фотонных и электронных пучков, с универсальным клиническим дозиметром UNIDOS E. Камера предназначена для регистрации фотонного излучения в диапазоне энергий от 30 кэВ до 50 МэВ.

На рисунке 7 приведены зависимости мощности дозы импульсного излучения от расстояния между источником и дозиметром напротив выходного окна. Расстояние между бетатроном и детектором варьировалось от 10 до 100 см, с шагом (15-25) см. Все измерения проводились в воздушной среде.



■ – результаты, полученные с использованием ДТЛ-02; ● – результаты, полученные с использованием камеры 30013

Рисунок 7 – Распределение мощности дозы тормозного излучения бетатрона ОББ-4

Из рисунка видно, что результаты определения мощностей доз, полученные с использованием разных дозиметров ДТЛ-02 и камеры 30013, находятся в хорошем согласии. Видно, что полученные зависимости хорошо аппроксимируются экспоненциальными кривыми, что согласуется с теорией.

Не смотря на то, что интенсивность излучения бетатрона ОБЬ-4 в рентгеновском диапазоне ниже, чем у рентгеновской трубки, бетатрон ОБЬ-4 обеспечивает достаточную интенсивность для визуализации изображений координаточувствительными детекторами.

В приложениях 1-3 представлены копии полученных при выполнении работы свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ. В приложениях 4 и 5 приведены блок-схемы зарегистрированного в рамках выполнения работы программного обеспечения. В приложениях 6 и 7 представлены копии актов о внедрении результатов научных исследований соискателя. В заключении излагаются основные результаты диссертации.

Основные результаты работы

1. Разработаны и созданы установки на базе импульсного рентгеновского источника с применением в качестве детектирующих элементов стрипового твердотельного детектора GaAs-512-0.1 и линейного газоразрядного детектора ПРИЗ-1536, которые выполнены на отечественной приборной базе и предназначены для визуализации рентгеновских изображений (проекционных и томографических) с субмиллиметровым разрешением.
2. Установка с полупроводниковым детектором обеспечивает при получении проекционных снимков пространственное разрешение 2,5 пары линий/мм вдоль детекторной линии и до 5 пар линий/мм вдоль линии перпендикулярной детекторной. Пространственное разрешение томографических изображений, получаемых при помощи установки, 5 пар линий/мм.
3. Установка на базе газоразрядного детектора при получении проекционных снимков обеспечивает пространственное разрешение до 1,2 пар линий/мм вдоль детекторной линии и до 1,4 пар линий/мм вдоль линии перпендикулярной детекторной. Пространственное разрешение томографических изображений 2,1 пар линий/мм.
4. Разработано программное обеспечение для съема и обработки информации с многоканальных детекторов, прошедшее государственную регистрацию решающее задачу синхронизации, фильтрации и калибровки данных; визуализации результатов рентгеновской съемки с графическим пользовательским интерфейсом.
5. Разработаны алгоритмы получения и обработки синопграмм для случаев с параллельным пучком излучения и с расходящимся пучком с произвольным углом расходимости и показана применимость разработанной аппаратуры для получения томограмм объектов с низкой разницей плотности внутренней структуры.
6. Разработана методика исследования внутренней структуры биологических объектов с импульсными источниками и проведено измерение дозовых

нагрузок, получаемых на созданных установках, которые существенно ниже общепринятых значений эквивалентных доз, получаемых пациентами при стандартных медицинских обследованиях.

Список публикаций по теме диссертации

Статьи

1. **Stuchebrov S.** Digital X-Ray Apparatus Based on the Scanning R-ray Gas-discharge Detector for Studying of Interior Structure of Biological Objects / Stuchebrov S. , Verigin D. , Lukyanenko Y. , Siniagina M. , Wagner A. // Advanced Materials Research. – 2014. – Т. 880. – С. 168-173.
2. **Stuchebrov S.** Estimation of Radiation Doses in X-Ray Visualization of Biological Objects / Stuchebrov S. , Batranin A. , Verigin D. , Lukyanenko Y. , Siniagina M. , Wagner A. // Advanced Materials Research. – 2014. – Т. 880. – С. 53-56.
3. **Stuchebrov S. G.** Acoustic "pumping effect" for quartz monochromators / Gogolev A. S. , Stuchebrov S. G. , Vagner A. R. , Cherepennikov Y. M. , Potylitsyn A. P. // Journal of Physics: Conference Series. – 2012. – Т. 357. – №. 1. – С. 012031.
4. **Stuchebrov S. G.** Setups for tomographic imaging with submillimeter spatial resolution / Stuchebrov S. G. , Batranin A. V. , Verigin D. A. , Vagner A. R. // Journal of Physics: Conference Series. - 2014 - Vol. 517 - №. 1, Article number 012046. - p. 1-5
5. **Стучебров С. Г.** Установки-прототипы для томографической визуализации с субмиллиметровым пространственным разрешением / Стучебров С. Г. , Батранин А. В. , Лукьяненко Е. В. , Синягина М. А. // Известия вузов. Физика. - 2014 - Т. 57 - №. 2/2. - С. 78-82.
6. **Стучебров С. Г.** Цифровая рентгеновская установка на базе сканирующего рентгеновского газоразрядного детектора для изучения внутренней структуры биологических объектов / Стучебров С. Г. , Вагнер А. Р. , Черепенников Ю. М. , Дусаев Р. Р. // Известия вузов. Физика. – 2013. – Т. 56. – №. 4/2. – С. 287-291.
7. **Стучебров С. Г.** Сравнение параметров цифровых систем рентгенографической диагностики / Стучебров С. Г. , Вагнер А. Р. , Дусаев Р. Р. // Известия вузов. Физика. – 2011 – Т. 54. – №. 11/2. – С. 300-305.
8. **Стучебров С. Г.** Оценка дозовых нагрузок при рентгеновской визуализации биологических объектов / Стучебров С. Г. , Вагнер А. Р. , Сухих Е. С. // Известия вузов. Физика. – 2013. – Т. 56. – №. 11/3. – С. 269-272.
9. **Стучебров С. Г.** Методы и средства диагностики пучков ионизирующего излучения / Милойчикова И. А. , Стучебров С. Г. , Вагнер А. Р. // Известия вузов. Физика. – 2013. – Т. 56. – №. 4/2. – С. 186-196.
10. **Стучебров С. Г.** Калибровка плёночного дозиметра Gafchromic EBT3 в рентгеновском диапазоне энергий (40–300 кэВ) / Сухих Е. С. ,

Стучебров С. Г. // Известия вузов. Физика. – 2013. – Т. 56. – №. 11/3. – С. 273-279.

11. **Стучебров С. Г.** Рассеяние рентгеновского излучения в деформированных кристаллах / Гоголев А. С. , Черепенников Ю. М. , Стучебров С. Г. , Вагнер А. Р. // Известия вузов. Физика. – 2011. – Т. 54. – №. 11/2. – С. 262-266.

Тезисы конференций

1. **Stuchebrov S. G.** Setups for tomographic imaging with submillimetric spatial resolution / Stuchebrov S. G. , Batranin A. V. , Vagner A. R. // Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures (RREPS-13): Book of Abstracts of X International Symposium, Erevan, September 23-27, 2013. - Tomsk: TPU Publishing House, 2013 - p. 133
2. **Stuchebrov S. G.** Acoustic “pumping effect” for quartz monochromators / Gogolev A. S. , Stuchebrov S. G. , Vagner A. R. , Cherepennikov Y. M. , Potylitsyn A. P. // Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures (RREPS-11): Book of Abstracts of IX International Symposium, Egham, September 12-16, 2011. –Tomsk: TPU Press. – 2011. – С. 108.
3. **Стучебров С. Г.** Методика определения дозовых нагрузок при выходе рентгеновского источника на рабочий режим [Электронный ресурс] / Милойчикова И. А. , Стучебров С. Г. , Черепнев М. С. // Перспективы развития фундаментальных наук: сборник научных трудов XI Международной конференция студентов и молодых ученых, Томск, 22-25 Апреля 2014. - Томск: ТПУ, 2014 - С. 147-149.
4. **Стучебров С. Г.** Устройство синхронизации цифровой рентгеновской системы / Звягинцев О. А. , Стучебров С. Г. , Дусаев Р. Р. // III Международная конференция-школа молодых атомщиков Сибири: Сборник тезисов докладов, Томск, 28-30 Ноября 2012. – Томск: ТПУ. – 2012. – С. 115.
5. **Стучебров С. Г.** Методы и средства диагностики пучков ионизирующего излучения / Милойчикова И. А. , Стучебров С. Г. , Вагнер А. Р. // III Международная конференция-школа молодых атомщиков Сибири: Сборник тезисов докладов, Томск, 28-30 Ноября 2012. – Томск: ТПУ. – 2012. – С. 107.
6. **Стучебров С. Г.** Использование цифровой рентгеновской установки на базе линейного газоразрядного детектора для изучения внутренней структуры биологических объектов / Стучебров С. Г. , Вагнер А. Р. , Милойчикова И. А. // III Международная конференция-школа молодых атомщиков Сибири: Сборник тезисов докладов, Томск, 28-30 Ноября 2012. – Томск: ТПУ. – 2012. – С. 103-104.
7. **Стучебров С. Г.** Определение параметров детектора рентгеновского излучения GaAs-512-0.1 / Синягина М. А. , Лукьяненко Е. В. , Стучебров С. Г. // Ядерно-физические технологии в клинической и экспериментальной медицине: состояние, проблемы, перспективы: материалы международной школы–конференции, Томск, 3-7 Июня 2013. – Томск: КопиТал. – 2013. – С. 34-35.

8. **Стучебров С. Г.** Определение поглощенной дозы рентгеновского излучения источника РАП 160-5 / Лукьяненко Е. В. , Синягина М. А. , Сухих Е. С. , Стучебров С. Г. // Ядерно-физические технологии в клинической и экспериментальной медицине: состояние, проблемы, перспективы: материалы международной школы–конференции, Томск, 3-7 Июня 2013. – Томск: КопиТал. – 2013. – С. 26-28.
9. **Stuchebrov S. G.** Setups for tomographic imaging with submillimetric spatial resolution / Stuchebrov S. G. , Batranin A. V. , Vagner A. R. // Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures (RREPS-13): Book of Abstracts of X International Symposium, Erevan, September 23-27, 2013. – Tomsk: TPU Publishing House. – 2013. –С. 133
10. **Стучебров С. Г.** Практические аспекты применения рентгеновской томографии в неразрушающем контроле / Ивашков Д. В. , Батранин А. В. , Стучебров С. Г. // Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее: сборник научных трудов II Международной конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых: в 4 т., Томск, 8-12 Октября 2013. – Томск: ТПУ. – 2013. – Т. 1. – С. 72-76.
11. **Стучебров С. Г.** Дозовые нагрузки при томографических и проекционных визуализациях на установках с субмиллиметровым пространственным разрешением / Стучебров С. Г. , Батранин А. В. , Вагнер А. Р. // IV Международная школа-конференция молодых атомщиков Сибири: сборник тезисов докладов, Томск, 23-25 Октября 2013. – Томск: ТПУ. – 2013. – С. 48.

Цитированная литература

1. Блинов Н. Н., Мазуров А. И. Современная роль рентгеновской техники в медицинской интроскопии // Увидеть невидимое: Сборник научных трудов – СПб.: «Книжный Дом», 2008. – С. 50.
2. Thibault P. et al. High-resolution scanning x-ray diffraction microscopy //Science. – 2008. – Т. 321. – №. 5887. – С. 379-382.
3. Забаев В.Н. Применение ускорителей в науке и промышленности: учебное пособие –Томск: Изд-во ТПУ, 2008.–195 с.
4. Nakajima K. Compact X-ray sources: Towards a table-top free-electron laser //Nature physics. – 2008. – Т. 4. – №. 2. – С. 92-93.
5. Hampai D. et al. Desktop X-ray tomography for low contrast samples // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2013. – Vol. 309. – P. 264–267
6. Wagner W. et al. An intense channeling radiation source //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2008. – Т. 266. – №. 2. – С. 327-334.
7. Azadegan B., Wagner W., Pawelke J. Dependence of the linewidth of planar electron channeling radiation on the thickness of the diamond crystal //Physical Review B. – 2006. – Т. 74. – №. 4. – С. 045209.