

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе  
Федерального государственного автономного  
образовательного учреждения высшего  
образования «Южно-Уральский  
государственный университет (национальный  
исследовательский университет)»



А.В. Коржов

2022 г.

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Лысенко Александра Юрьевича «Реконструкция пространственных распределений источников излучения в однофотонной эмиссионной компьютерной томографии в рассеивающей среде», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 – «Приборы и методы экспериментальной физики»

#### 1. Актуальность темы исследований

Диссертационная работа А.Ю. Лысенко посвящена реконструкции пространственных распределений источников излучения в рассеивающей среде. В работе представлен новый метод реконструкции эмиссионных томограмм на основе точного аналитического решения уравнения переноса излучения в рассеивающей среде со свойством "рассеяние прямо назад" и соответствующее точное решение обратной томографической задачи, а также результаты реконструкции эмиссионных томограмм новым методом и сравнение полученных результатов с традиционным методом реконструкции.

Реконструкция пространственных распределений источников излучения в рассеивающей среде является не решённой к настоящему времени. Это связано с тем, что при реконструкции томограмм важно учитывать процессы взаимодействия излучения с веществом. Среди всех этих процессов наиболее влиятельными являются поглощение и рассеяния излучения. Для учёта влияния рассеяния было разработано экспоненциальное преобразование Радона, в то время как для учёта влияния рассеяния такого математического аппарата не существует. Это связано с тем, что процессы взаимодействия излучения с веществом в эмиссионной вычислительной томографии описываются с помощью уравнения переноса излучения (УПИ). Это уравнение является интегро-дифференциальным и не имеет точного аналитического решения в общем случае. Поэтому существующие методы учёта рассеяния излучения сводятся к приближениям, упрощающим это уравнение.

Простейшим примером такого приближения является представление реальной среды как чисто поглощающей среды. Для такой среды УПИ имеет точное

аналитическое решение в общем случае. Однако в таком приближении полностью игнорируется процесс рассеяния излучения. Частично влияние рассеяния можно учесть, сделав предположение о том, что рассеянные гамма-кванты никогда не попадут на детектор. Именно в таком виде это приближение лежит в основе работы современных однофотонных эмиссионных томографов. Однако, поскольку рассеянные гамма-кванты всё-таки достигают детектора, задача учёта рассеяния излучения остаётся актуальной.

Таким образом, диссертационная работа А.Ю. Лысенко посвящена решению актуальной научной задачи, направленной на реконструкцию пространственных распределений источников излучения в рассеивающей среде.

## **2. Новизна и научная значимость исследования и полученных результатов, выводов и рекомендаций**

Основной задачей диссертационной работы являлась реконструкция пространственных распределений источников излучения в рассеивающей среде.

В работе получены точное решение аналитического уравнения переноса излучения для однородной рассеивающей среды и точное решение обратной томографической задачи. Разработаны алгоритм и программа расчёта показаний детектора в однородной рассеивающей среде с индикатрисой рассеяния "рассеяние прямо назад". Разработаны алгоритм и программа численной реконструкции эмиссионных томограмм в однородной рассеивающей среде.

Установлена зависимость точности реконструкции пространственных распределений источников излучения от физических характеристик рассеивающей среды. Проведено сравнение разработанного метода реконструкции пространственных распределений источников излучения с традиционным методом реконструкции. Исследовано влияние рассеяния на точность реконструкции эмиссионных томограмм предложенным методом для различных рассеивающих сред и геометрических параметров объекта.

Полученные результаты могут быть использованы при исследовании влияния рассеяния излучения на реконструкцию пространственных распределений источников излучения в рассеивающей среде.

## **3. Практическая значимость полученных автором результатов**

Диссертантом было исследовано влияние рассеяния на точность реконструкции в этих средах для различных рассеивающих сред и геометрических параметров объекта. Разработан новый метод реконструкции эмиссионных томограмм на основе точного аналитического решения уравнения переноса излучения в рассеивающей среде со свойством "рассеяние прямо назад" и соответствующего точного решения обратной томографической задачи. С помощью численного эксперимента проведено сравнение разработанного метода реконструкции пространственных распределений источников излучения с традиционным методом реконструкции. Определена зависимость точности реконструкции от отношения коэффициента рассеяния к коэффициенту ослабления

при моделировании проекционных данных на основе аналитических формул. Определена зависимость точности реконструкции от отношения коэффициента рассеяния к коэффициенту ослабления при моделировании проекционных данных с помощью метода Монте-Карло.

В результате численных экспериментов установлено, что реконструкция с помощью предложенного метода, по сравнению с традиционным методом, имеет меньшую амплитуду артефактов, в особенности на краю изображения вне области распределения источников излучения. В целом разработанный алгоритм реконструкции эмиссионных томограмм в условиях сильного рассеяния излучения по сравнению с традиционным методом улучшает точность реконструкции. Полученные результаты могут быть использованы для усовершенствования существующих алгоритмов реконструкции изображений в ОФЭКТ, а также для разработки новых конструкций эмиссионных томографов.

#### **4. Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций диссертации**

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций диссертации базируются на использовании диссертантом общепринятых физических и математических методов и соответствии литературным данным. Достоверность представленных в работе экспериментальных результатов обеспечена применением открытого программного обеспечения (ядерно-физического комплекса Geant4), разрабатываемого в ЦЕРН более 20 лет и проходящем верифицирование каждые 5 лет.

#### **5. Публикации и апробация работы**

По результатам работы опубликовано 14 статей в журналах, в том числе 6 в журналах, рекомендуемых ВАК РФ, 8 тезисов докладов на международных и российских научно-технических конференциях

#### **6. Оценка содержания работы**

Диссертационная работа представлена на 130 страницах машинописного текста и содержит 49 рисунков. Список литературы включает 100 ссылок. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка сокращений и списка литературы.

Во введении обоснована актуальность работы, сформулирована цель работы, излагаются задачи исследования, перечислены основные положения, выносимые на защиту, отмечена научная новизна, достоверность и научно-практическая значимость полученных результатов, описана апробация результатов исследования.

В первой главе приведён обзор литературы, в котором рассмотрены основные принципы однофотонной эмиссионной вычислительной томографии (ОФЭКТ). Рассмотрены основные этапы проведения томографического

исследования. Показано, что на обоих этапах могут происходить искажения вследствие множества факторов. Приводится описание основных интегральных и итерационных методов реконструкции томограмм в ОФЭКТ. Рассмотрены основные факторы, влияющие на точность реконструкции пространственного распределения источников излучения. Показан вклад рассеяния в искажения реконструированных томограмм. Описано современное состояние учёта влияния рассеяния на точность реконструкции томограмм. Приведены основные существующие методы частичного учёта влияния рассеяния. Однако, эти методы недостаточно точно учитывают влияние рассеяния излучения при реконструкции пространственных распределений источников излучения.

Вторая глава посвящена ОФЭКТ в среде со свойством "рассеяние прямо назад". Рассмотрено стационарное уравнение переноса излучения (УПИ) в односкоростном приближении уравнение переноса излучения, описывающее взаимодействие излучения с веществом в эмиссионной томографии. Приводятся основные способы упрощения этого уравнения для получения приближённых решений. Описан традиционный метод реконструкции томограмм в ОФЭКТ на основе приближения чисто поглощающей среды. Рассмотрена особая индикатриса рассеяния для среды со свойством "рассеяние прямо назад". Приведено точное аналитическое решение УПИ для такой среды. На основе полученного решения приводится решение обратной томографической задачи с использованием экспоненциального преобразования Радона. Описаны методы получения проекционных данных с помощью численного моделирования с помощью аналитических формул и методом Монте-Карло.

В третьей главе описываются результаты численных экспериментов по реконструкции пространственного распределения источников излучения в однородной рассеивающей среде на основе аналитического метода получения проекционных данных. Приводится описание разработанного алгоритма моделирования проекционных данных на основе аналитических формул. Получены зависимости точности реконструкции от габаритов исходного объекта и от отношения коэффициента рассеяния к коэффициенту ослабления для объектов "Диск" и "Фантом Шеппа-Логана". Показано, что с увеличением габаритов объекта и с увеличением отношения коэффициента рассеяния к коэффициенту ослабления наблюдается ухудшение точности реконструкции томограммы по среднеквадратичному критерию отклонения. Установлено преимущество нового метода по сравнению с традиционным методом реконструкции при реконструкции томограмм в среде со свойством "рассеяние прямо назад".

Четвёртая глава посвящена численным экспериментам по реконструкции пространственного распределения источников излучения в однородной рассеивающей среде на основе проекционных данных, полученных с помощью метода Монте-Карло. Приводится описание ядерно-физической системы Geant4 для моделирования траекторий каждого гамма-кванта методом Монте-Карло. На её основе проведено исследование зависимости точности реконструкции томограмм

от вещества рассеивающей среды и сравнение влияния рассеяния на точность реконструкции томограммы для простого объекта "Диск" и сложного объекта "Фантом Шеппа-Логана". Установлено, что с ростом коэффициента ослабления влияние рассеяния на точность реконструкции томограмм увеличивается, а также то, что влияние рассеяния на точность реконструкции томограмм для объекта с простой пространственной структурой сильнее, чем для объекта со сложной пространственной структурой. Доказано преимущество нового метода по сравнению с традиционным методом реконструкции при реконструкции томограмм в реальной среде – преимущество нового метода выражается не только в меньшей интенсивности артефактов внутри объекта, особенно в случае резких переходов между границами областей с существенно разными значениями пространственного распределения источников излучения, но и в меньшем значении критерия среднеквадратичного отклонения.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

При обсуждении диссертационной работы были сформулированы следующие замечания.

1. Отсутствует критерий выбора фильтра при осуществлении реконструкции методом обратных фильтрованных проекций.

2. В работе рассмотрены рассеивающие гомогенные среды, состоящие из воды или одного химического элемента, в то время как реальная среда (например, биологическая) является гетерогенной и состоит из нескольких химических элементов.

Несмотря на сделанные замечания, диссертация А.Ю. Лысенко заслуживает положительной оценки.

### **Заключение**

Тема и содержание диссертационной работы соответствуют специальности 1.3.2 – «Приборы и методы экспериментальной физики». Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне, написана достаточно ясно и правильно оформлена.

Диссертация является законченной работой, в которой на основании проведённых автором исследований изложены результаты решения научной проблемы по реконструкции пространственных распределений источников излучения в рассеивающей среде, имеющей важное значение для медицинской диагностики и терапии в отечественном здравоохранении.

Диссертационная работа является актуальной, обладает научной новизной и практической значимостью. Научные положения, выводы и рекомендации диссертации являются достоверными и обоснованными.

Основные результаты работы опубликованы и прошли апробацию на международных и российских конференциях.

Диссертация Лысенко Александра Юрьевича «Реконструкция пространственных распределений источников излучения в однофотонной эмиссионной компьютерной томографии в рассеивающей среде» отвечает требованиям п.п. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК при Минобрнауки России, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а также соответствует паспорту специальности 1.3.2 – «Приборы и методы экспериментальной физики».

Таким образом, Лысенко Александр Юрьевич заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 – «Приборы и методы экспериментальной физики».

Диссертационная работа и автореферат Лысенко А.Ю. рассмотрены на заседании кафедры техники, технологий и строительства федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» (протокол № 311-16/06 от 28 февраля 2022 года).

Виноградов Константин Михайлович  
заведующей кафедрой «Техника, технологии и строительство»  
кандидат технических наук, доцент,  
тел. +7 (351) 267-97-76  
e-mail: [vinogradovkm@susu.ru](mailto:vinogradovkm@susu.ru)  
454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76

Симонов Евгений Николаевич  
старший научный сотрудник  
профессор кафедры «Техника, технологии и строительство»  
доктор технических наук,  
тел. +7 (351) 267-97-76  
e-mail: [simonoven@susu.ru](mailto:simonoven@susu.ru)  
454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76

*Южно-Уральский государственный университет  
454080, Челябинская область, г. Челябинск  
проспект В.И. Ленина, д.76  
e-mail: [info@susu.ru](mailto:info@susu.ru) , тел. +7 (351) 267-99-00*