

«Утверждаю»

директор Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки  
Института геохимии им. А.П. Виноградова  
Сибирского отделения  
Российской академии наук

член-корр. РАН

В.С. Шацкий

«3» декабря 2016 г.

### Отзыв ведущей организации

на диссертационную работу Горбунова Михаила Сергеевича «Физические основы процессов возникновения фона при возбуждении рентгеновской флуоресценции», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Спектрометрия рентгеновского излучения широко используется для анализа вещества в разнообразных областях научных исследований и процессах производства. Необходимым элементом аппаратуры для рентгеноспектрального анализа вещества является система регистрации, включающая кристаллы монохроматоры в спектрометрах с дисперсией по длинам волн и/или сцинтилляционные, газонаполненные и полупроводниковые детекторы рентгеновского излучения. Несмотря на то, что физические процессы формирования полезного и фоновое сигнала в упомянутой аппаратуре в общих чертах достаточно хорошо изучены, эти процессы являются предметом постоянного внимания исследователей в связи с постоянным совершенствованием аппаратуры, которое приводит к усилению значимости факторов, ранее не учитываемых при обработке сигнала. В особенности это касается прогресса в создании полупроводниковых детекторов, все более широко используемых в рентгеноспектральной аппаратуре, позволяющих регистрировать рентгеновское излучение в широком диапазоне энергий от первых сотен эВ до сотен кэВ и более. Поэтому цель исследований автора диссертации, направленная на разработку модели формирования сигнала в рентгеноспектральной аппаратуре и поиск возможности улучшения соотношения полезного и фоновое сигнала, представляется актуальной.

Диссертационная работа составляет 125 страниц и состоит из введения, литературного обзора, трех глав, освещающих оригинальные результаты автора, заключения и списка литературы.

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулирована научная новизна, практическая значимость исследований и положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** приведен обзор литературы, относящейся к области исследований автора диссертации. Приведены литературные данные, относящиеся к моделям формирования полезного и фоновое сигнала в рентгеноспектральной аппаратуре. Описаны основные процессы взаимодействия рентгеновского излучения и электронов с веществом, приводящие к возбуждению характеристического и тормозного излучения, как в анализируемом образце, так и

в элементах детектирующей системы. Из обзора следует постановка цели и формулировка основных задач исследования.

*В качестве замечания к первой главе можно отметить некоторые неточности и погрешности стиля. Например.*

Стр. 19. «вероятность преобразования первичного фотона с энергией  $E_0$  в  $E$  .....».

Стр. 24. «Современные данные расчета массовых коэффициентов .....» приведены в работе [61].» В работе [61] приведены аппроксимации для численного расчета и эти данные не самые современные (2003 г).

Стр. 27. Формула. «где  $X = 1.166E/J$ ». Правильно -  $X = 1.166E_q/J$ .

Стр. 40. Потеряно окончание к подписи под рисунком 1.12.

И некоторые др.

**Во второй главе** приведено описание деталей разработанной модели возбуждения тормозного излучения фото-, Оже- и комптоновских электронов в образце и экспериментальное исследование факторов, определяющих фоновое излучение в кристалл-дифракционных флуоресцентных спектрометрах. Внимание автора сосредоточено на изучении фона в длинноволновой области (10-11 Å). Основной элемент научной новизны и важный вывод этой главы заключается в том, что тормозное излучение электронов, образующихся в образце, может вносить определяющий вклад в формирование фона в длинноволновой области.

Вторая глава также не свободна от погрешностей в тексте.

Стр. 50, Формула 2.12, пропущен минус.

Стр. 53. Рис. 2.3. В описании к рисунку - «натриевого образца». В подписи к рис. - «Са образца». В качестве основного замечания к главе второй следует отметить, что экспериментальные данные в таблицах даны без доверительных интервалов. Поэтому иногда трудно судить о степени согласия (или не согласия) расчетных и экспериментальных данных.

**Глава третья** посвящена математической модели регистрации рентгеновского излучения в рабочем объеме полупроводникового детектора. Предлагаемая модель основана на статистическом численном моделировании взаимодействия частиц (фотонов и электронов) в веществе детектора. Расчеты с помощью предлагаемой модели вполне удовлетворительно согласуются с литературными расчетными и экспериментальными данными. Интересным представляется предлагаемая автором схема двухслойного кремний-германиевого полупроводникового детектора. В настоящее время неясно, может ли такой детектор быть реализован. Однако предположение автора о перспективности такого детектора, несомненно, заслуживает внимания.

**В главе четвертой** с помощью метода статистического моделирования проведены расчеты влияния геометрических условий энергодисперсионного рентгеновского спектрометра с кольцевым источником возбуждения с учетом многократного рассеяния излучения в образце и детекторе. Сопоставление с экспериментальными данными показало удовлетворительное согласие. Разработанная модель имеет практическое значение, поскольку спектрометры с такой геометрией широко используются.

В целом, достоверность и обоснованность полученных результатов и защищаемых положений работы не вызывает сомнения и обеспечивается использованием современных математических методов моделирования физических процессов и явлений, сравнением с литературными и собственными экспериментальными данными.

Упомянутые выше замечания не являются принципиальными и не влияют на общее хорошее впечатление от работы. Диссертационная работа представляет собой законченное исследование и свидетельствует о достаточной квалификации автора.

Результаты исследований апробированы на международных и российских конференциях, опубликованы в рецензируемых отечественных и зарубежных периодических журналах. В том числе три статьи в престижном международном журнале по рентгеновской спектроскопии «X-ray Spectrometry».

Содержание автореферата соответствует содержанию диссертационной работы.

Выполненные автором диссертации исследования, несомненно, вносят заметный вклад в понимание процессов и явлений, происходящих в веществе при регистрации рентгеновского излучения в рентгеновской спектроскопии. Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

В целом, представленная работа удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор М. С. Горбунов заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук.

Отзыв рассмотрен и рекомендован к утверждению на семинаре лаборатории спектральных методов анализа Института геохимии СО РАН.

Зав. лабораторией спектральных методов анализа

Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН,

доктор технических наук



Александр Львович Финкельштейн

Специальность 02.00.02 – аналитическая химия.

Почтовый адрес: 664033, Иркутск, ул. Фаворского 1А.

Тел. раб. +7(3952) 429579.

*Email: [finkel@igc.irk.ru](mailto:finkel@igc.irk.ru).*

На обработку персональных данных согласен.