

**ОТЗЫВ**  
**официального оппонента на диссертацию**  
**Портного Александра Юрьевича**

на тему: “Физические процессы формирования сигнала и фона при использовании энергодисперсионных детекторов рентгеновского и гамма излучения”, по специальности: 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики на соискание учёной степени доктора физико-математических наук

**1. Актуальность темы**

Рентгенофлуоресцентная аппаратура является одним из эффективных современных средств для выполнения многоэлементного анализа различных материалов. Её отличают широкий диапазон возможностей: в настоящее время метод, основанный на её применении, используют для качественного и количественного определения содержаний элементов с атомными номерами  $Z \geq 6С$  в монолитных, порошковых и жидких образцах. Современные рентгеновские спектрометры характеризуются высокой прецизионностью измерений при малых затратах времени в расчёте на один образец (10-30 с). Процесс измерения полностью автоматизирован. Возможно определение концентраций от 0.01 ppm до 100 %. Подготовка образцов относительно проста, экспрессна и экономична. Метод рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) занял прочное положение в промышленности и науке как средство исследования химического состава вещества. Однако реализация возможностей метода требует решения сложных задач оптимизации конструкций рентгеновских спектрометров и выбора оптимальных условий измерения аналитических сигналов. Вследствие этого задача разработки моделей для исследования взаимодействия рентгеновского излучения с веществом при формировании аналитического сигнала и фона в рентгенофлуоресцентной аппаратуре, решаемая в диссертационной работе **Портного А.Ю.**, представляется достаточно актуальной.

**2. Достоверность и научная новизна научных положений, выводов и рекомендаций**

Достоверность и научная новизна положений диссертации не вызывает сомнений. Научная общественность знакома с основными положениями диссертации по докладам на Российских и зарубежных конференциях. Основные результаты, полученные диссертантом, опубликованы в авторитетных отечественных и зарубежных научных журналах: “Журнал аналитической химии” (5), “ Научное приборостроение” (4), “Аналитика и контроль” (2), “Известия высших учебных заведений. Физика”, “X-Ray Spectrometry” (4), “Radiation Physics and Chemistry” (2).

В диссертационной работе системно решается ряд важнейших задач, среди которых можно отметить следующие:

- вклад в развитие теоретических основ количественной оценки взаимодействия рентгеновского излучения с атомами образца и детектора, а также взаимодействие электронов, возникающих в детекторе, с элементами детектора;
- представляют интерес сделанные автором оценки спектрального распределения излучения для двух вариантов рентгеновских трубок: с заземленным катодом и с заземленным анодом;
- применение предложенной автором модели позволило рассчитать вероятности регистрации фотона в различных областях функции отклика детектора для Si и Ge детекторов с различной толщиной активного и мёртвого слоёв. Результаты расчётов сопоставлены с имеющимися экспериментальными данными. Удовлетворительное их согласие подтвердило корректность предложенной модели, основанной на применении метода Монте-Карло. Отмечено, что процессы переноса излучения и его поглощения будут существенно ограничивать пространственное разрешение координатно-

чувствительных детекторов. Также промоделированы функции отклика газовых пропорциональных детекторов с различными наполнителями и сцинтиллятора NaI(Tl).

### **3. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций**

Автор достаточно корректно использует известные научные методы для обоснования полученных в диссертации результатов и выводов. Автором изучены и критически анализируются достижения других авторов по вопросам оценки параметров и влияния ряда факторов на характеристики детекторов, используемых в РФА. Как уже отмечалось, список использованной литературы достаточно обширен. Выводы, полученные в работе Портного А.Ю., достоверны и обоснованны, так как опираются на существующую теорию возбуждения рентгеновской флуоресценции, модели расчёта функции отклика детекторов и на анализ обширного экспериментального материала.

### **4. Значимость для науки и практики полученных результатов**

Главное внимание в диссертации уделено развитию теоретических основ количественной оценки взаимодействия рентгеновского излучения с атомами образца и детектора и применению разработанной математической модели для решения практических задач РФА. Необходимо отметить, что применение возможностей теоретических оценок с момента становления Иркутской школы рентгеноспектрального анализа (60-е годы XX века, основатель проф. Н.Ф. Лосев) считалось важнейшим элементом решения конкретных научных и практических проблем рентгеновского флуоресцентного и электронно-зондового микроанализа.

### **5. Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов**

Полученные результаты целесообразно использовать при решении задач, связанных с оптимизацией процесса регистрации рентгеновского и гамма-излучения, а также при конструировании современных полупроводниковых детекторов рентгеновского излучения. Полученные выводы рекомендуется включить в учебные курсы лекций.

### **6. Содержание диссертации, ее завершенность**

Диссертация состоит из Введения, 5 глав, Заключения и списка литературы (464 наименования), содержит 292 стр. текста, 6 таблиц и иллюстрирована 78 рисунками. Главное внимание в диссертации отведено созданию научно-обоснованной методологии исследования процессов взаимодействия рентгеновского излучения с атомами образца и детектора и применению её для исследования фундаментальных ограничений на возможности снижения интенсивности отдельных составляющих фона при регистрации рентгеновских спектров полупроводниковыми детекторами, что необходимо для улучшения предела обнаружения и повышения точности измерений аналитического сигнала при малых содержаниях определяемых элементов.

Первая глава диссертации (самая объёмная, 89 стр.) посвящена литературному обзору применения традиционного РФА. Подробно рассмотрены процессы взаимодействия рентгеновского излучения с веществом для спектрометра с традиционной геометрией, процессы взаимодействия рассеянного на атомах образца и флуоресцентного излучения атомов образца с атомами рабочего вещества детектора. Автором проанализировано взаимодействие электронов, возникающих в детекторе, с элементами детектора и обобщены сведения о формировании сигнала и фона в РФА. Поскольку формирование сигнала и фона в рентгеновских флуоресцентных спектрометрах существенно зависит практически от всех элементов спектрометрического тракта, рассматриваются все основные этапы преобразования излучения в электрический сигнал с

последующей его регистрацией. Диссертант справедливо отмечает недостаточную изученность процессов, приводящих к формированию фона в энергодисперсионных спектрометрах. Всё это позволило сформулировать основные задачи, решаемые в диссертационном исследовании.

Вторая глава (50 стр.) включает комплексный анализ особенностей функции отклика детектора, возникающих как при переносе и поглощении рентгеновского излучения в детекторе, так и при переносе вторичных электронов, возникающих в детекторе, так как данные особенности определяют предельные характеристики реальных детекторов излучения. Обсуждены принятые в предложенной модели приближения и соответственно границы применения модели при решении конкретных задач.

В третьей главе (47 стр.) детально рассматривается модель последовательного формирования сигнала и фона с учётом геометрических особенностей системы источник излучения – образец – детектор. Выполнен расчёт спектра, возникающего в образце при монохроматическом первичном излучении, и сделано сравнение его с экспериментальными данными для случая использования изотопных источников рентгеновского излучения  $^{109}\text{Cd}$  и  $^{241}\text{Am}$ . Аналогичные оценки сделаны для варианта возбуждения флуоресценции излучением рентгеновских трубок и использовании для регистрации аналитического сигнала Si(Li) детектора.

В четвёртой главе (14 стр.) рассмотрена математическая модель двухслойных детекторов и спектрометров на их основе. Обсуждены преимущества комбинированного полупроводникового детектора рентгеновского излучения по сравнению с традиционными однослойными. С помощью математической модели для спектрометра с использованием комбинированного детектора и радиоизотопного источника возбуждения флуоресценции показано, что подобный детектор будет обеспечивать наилучшее соотношение сигнал/фон по сравнению с традиционными Ge и Si детекторами.

В заключительной пятой главе (20 стр.) рассматриваются возможности применения цифровой фильтрации амплитудных спектров в кристалл-дифракционных рентгеновских спектрометрах при наличии предварительной информации о функции отклика детектора.

Представленный в диссертации обширный материал успешного применения на практике физической модели взаимодействия рентгеновского излучения с атомами образца и детектора, разработанной А.Ю. Портным, свидетельствует о завершённости разрабатываемой им темы.

## **7. Достоинства и недостатки в содержании и оформлении**

Достоинством диссертационной работы является полнота проведённого исследования, охватывающего большинство проблем, возникающих при описании взаимодействия рентгеновского излучения с веществом при формировании аналитического сигнала и фона в рентгенофлуоресцентной аппаратуре. При этом учитывался мировой опыт исследования процессов взаимодействия рентгеновского излучения с атомами образца и детектора.

Отличное владение Портным А.Ю. своим методом позволило решать важнейшие в конструировании детекторов задачи – установление вклада отдельных составляющих функции отклика детектора. Данный подход носит общенаучный характер и был применен, кроме энергодисперсионного РФА и при выборе оптимальных условий регистрации сигнала и фона для кристалл-дифракционных рентгеновских спектрометров в длинноволновой области спектра. К оформлению диссертации претензий нет. Она написана доходчиво и аккуратно оформлена.

По диссертации можно сделать несколько замечаний, не влияющих на общую

высокую оценку диссертации:

1. В разделе **“Обозначения, принятые в диссертации”** на стр. 15 - число Авогадро упомянуто дважды, а некоторые другие обозначения повторно расшифровываются в тексте (атомный номер, атомный вес).
2. Стр. 24, 26 и далее – вместо “трубки” надо бы “рентгеновские трубки”.
3. Стр. 28 - “увеличение в 2-3 раза интенсивности длинноволновой составляющей рентгеновского излучения относительно излучения трубок с боковым окном (которое не может быть объяснено только увеличением поглощения излучения в аноде трубки)” - увеличение в 2-3 раза интенсивности – это объяснялось бы не увеличением поглощения, а его уменьшением.
4. Стр. 33 - “поскольку при наличии некоторого непрерывного фона в области линии будет уменьшаться ее интенсивность без изменения контрастности.” – вероятно, правильно было бы «без улучшения контрастности».
5. На стр. 49 и 59 автор не совсем корректно применяет термин «метод». ИСАХ РАН рекомендует следующие словосочетания: объект – анализируют; компоненты, элементы (аналиты) – обнаруживают, идентифицируют, определяют.
6. Стр. 62 – «Для подобных газовых детекторов обычно используется термин «пропорциональный счетчик», для полупроводникового детектора – «энергодисперсионный». – последний термин вызывает возражение.
7. Стр. 98 – «интенсивность рентгеноспектральной линии» – нет такого деления: «рентгеноспектральные» или «рентгеноструктурные» линии.
8. Стр. 125 - вероятность регистраций фотона – фотон регистрируется только раз!
9. Стр. 129-132 - вероятности регистрации фотона в различных частях функции отклика детектора – терминология – точнее было бы «вероятности регистрации фотона в зависимости от его энергии».
10. На стр. 161 и 165 неудачны выражения: - «Энергетический спектр фотонов, попадающих в детектор, будет равен» и «Энергетическое распределение электронов по энергии будет равно» и далее приводятся формулы.
11. Стр. 170 Рис. 3.5.б) тормозное излучение фото (непрерывная линия), Оже (точечная линия) и комптоновских (прерывистая линия) электронов. – на этом рисунке нет точечной линии. Аналогичное относится к рисункам на стр. 180, 182, 186.
12. Стр. 176 – «современных спектрометрах ARL» – таковых нет в настоящее время!
13. Стр. 217 – «спектр молибденового образца, снятый с пропорционального детектора - точнее было бы «спектр молибденового образца, измеренный пропорциональным детектором».
14. Стр. 218 - хорошо согласуется с ранее полученными данными других работ, например [245 - 247, 257]. Здесь должно бы указать и более ранние работы 242, 244 и др.
15. Стр. 226 - вместо «приведены на рис. 4.5» надо «приведены на рис. 5.5».
16. Неточности в терминологии: - стр. 175 – «длина волны спектральной интенсивности» и «энергия, достаточная для создания спектральной интенсивности с длиной волны» и стр. 226 «анализируемой линии» точнее «исследуемой линии».
17. В списке литературы для ссылок 188 и 189 не указан год издания.

## 8. Заключение

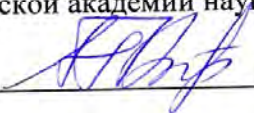
В диссертации Портного А.Ю. приведены результаты, позволяющие квалифицировать её как разработку научно-обоснованной методологии исследования процессов взаимодействия рентгеновского излучения с атомами образца и детектора. Работа соответствует паспорту специальности 01.04.01 Приборы и методы

экспериментальной физики (п.4 и 8 Области исследований). Содержание автореферата раскрывает сущность диссертации и соответствует её основным положениям.

Работа базируется на достаточном числе примеров. В заключении работы сделаны чёткие выводы.

Таким образом, диссертация Портного Александра Юрьевича на соискание учёной степени доктора физико-математических наук является законченной научно-квалификационной работой, выполненной автором самостоятельно на высоком научном уровне, в которой на основании выполненных исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение, имеющее большое практическое значение для развития рентгеновского приборостроения, работа полностью удовлетворяет требованиям и критериям п. 9 Положения ВАК РФ «О порядке присуждения ученых степеней» (Утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (редакция от 28.08.2017)), предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, заслуживает присуждения искомой учёной степени.

**Официальный оппонент**, – доктор технических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник ЦКП «Геодинамика и геохронология» Института земной коры Сибирского отделения Российской академии наук

 Ревенко Анатолий Григорьевич

**Почтовый адрес:** 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128

Институт земной коры СО РАН

Телефон: (3952) 426156, моб. 89148777107

E-mail: xray@crust.irk.ru

25 сентября 2018 г.



(подпись)

Подпись <i>Ревенко АТ</i>	заверяю
Ведущий инспектор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института земной коры Сибирского отделения Российской академии наук	
<i>ds</i>	<i>09</i> 2018 г.

