

На правах рукописи



Дарьин Федор Андреевич

**РАЗВИТИЕ МЕТОДА КОНФОКАЛЬНОЙ
РЕНТГЕНОВСКОЙ МИКРОСКОПИИ
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МИКРОВКЛЮЧЕНИЙ
В РАЗЛИЧНЫЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ МАТРИЦЫ**

1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Новосибирск – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

НАУЧНЫЙ
РУКОВОДИТЕЛЬ – кандидат физико-математических наук
Ракшун Яков Валерьевич

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ

Артюков
Игорь Анатольевич – кандидат физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, высококвалифицированный ведущий научный сотрудник

Ревенко
Анатолий Григорьевич – доктор технических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук, старший научный сотрудник

ВЕДУЩАЯ
ОРГАНИЗАЦИЯ – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт неорганической химии им. А.В. Николаева Сибирского отделения Российской академии наук

Защита диссертации состоится «22» марта 2023 года в «14:00» часов на заседании диссертационного совета 24.1.162.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук и на сайте <https://inp.nsk.su/obrazovanie/dissertatsionnye-sovety#24-1-162-01>.

Автореферат разослан «08» февраля 2023 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук

 Шехтман Лев Исаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Знание элементного состава вещества позволяет решить большинство актуальных задач в геологии, в частности, проводить геохимический поиск месторождений полезных ископаемых, эколого-геологическую оценку уровня загрязнения окружающей среды, рассматривать вопросы реконструкции климата, вопросы образования рудоносных слоев и многое другое. Следует отметить, что зачастую полезная информация извлекается из объектов исследования, имеющих структурирование на микроуровне: это могут быть слои, твердые и газо-жидкостные включения, а также отдельные микрочастицы.

Далеко не все образцы поддаются точному количественному анализу их химического состава, основанному на переводе исследуемого вещества в газовую фазу (например, газо-жидкостные включения), некоторые образцы являются уникальными (космические пылинки) и требуют бережного отношения. Одним из наиболее эффективных и вместе с тем неразрушающих методов исследования элементного состава является рентгенофлуоресцентный анализ (РФА) на пучках синхротронного излучения (СИ). Достоинствами метода РФА являются панорамность, экспрессность, а также достаточно простая пробоподготовка. Применение рентгеновской оптики при исследовании микроструктурированных объектов позволяет получать необходимое пространственное разрешение с сохранением высокой интегральной интенсивности возбуждающего излучения. Использование рентгеновской оптики в конфокальной геометрии позволяет локализовать исследуемую область внутри вещества. Перемещая образец относительно конфокального объема, можно составлять двух- и трехмерные карты распределения элементов на его поверхности и в глубине, что позволяет получить исчерпывающую информацию о микроструктурировании исследуемого объекта. Таким образом, развитие методов конфокальной рентгеновской микроскопии (КРМ) является крайне важным и актуальным для решения различных геологических задач.

Степень разработанности темы исследования

В 1992 г. В. Гибсоном и М. Кумаховым была предложена концепция применения нового типа рентгеновской оптики (поликапиллярной линзы) для рентгенофлуоресцентного анализа в конфокальной схеме. Впоследствии эта концепция была реализована в нескольких международных синхротронных центрах, в том числе, с использованием других типов фокусирующих элементов. Наиболее часто конфокальная схема эксперимента применяется при двух- и трехмерном картировании образцов, при этом применение методики крайне времязатратно.

В России существует два источника СИ ЦКП «СЦСТИ» (ИЯФ СО РАН) и УНУ «КИСИ-Курчатов» (НИЦ «Курчатовский институт»), в которых реализован метод РФА. В частности, созданием и развитием станции «Локальный и сканирующий рентгенофлуоресцентный элементный анализ» накопителя ВЭПП-3 (ИЯФ СО РАН) в разные годы занимались В.Б. Барышев и К.В. Золотарев, проводившие экспериментальные работы, в том числе, и со сфокусированными пучками СИ микронных размеров. Однако, на постоянной основе исследования с использованием таких пучков стали проводиться только после создания модуля КРМ на станции, апробации его на «КИСИ-Курчатов» и разработки новых методик и протокола измерений. Кроме того, новая методика КРМ с расстройкой позволила заметно уменьшить затраты времени в ряде поисковых экспериментов.

Цели и задачи диссертационной работы

Целью настоящей работы была реализация метода конфокальной рентгеновской микроскопии для исследования различных геологических объектов на экспериментальной станции «Локальный и сканирующий рентгенофлуоресцентный элементный анализ» накопителя ВЭПП-3 Центра коллективного пользования «Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения» (ЦКП СЦСТИ) на базе Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН (ИЯФ СО РАН), а также его развитие и совершенствование, включая внедрение модульного протокола исследований, аттестацию методики выполнения измерений. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи: рассчитать основные параметры поликапиллярных линз, разработать систему юстировки поликапиллярных линз, разработать систему позиционирования образца, собрать модуль КРМ, интегрировать систему управления модуля КРМ в управление станцией, провести исследования модельных объектов для определения основных параметров КРМ.

Научная новизна

Для достижения поставленной цели разработан и создан унифицированный модуль конфокальный рентгеновский микроскоп, который позволил получить сфокусированный пучок на поверхности образца размером порядка 15 мкм, что сравнимо с аналогичными станциями в мировых центрах синхротронного излучения. Однако кардинально новым является подход с использованием конфокальной микроскопии с расстройкой, который позволяет контролируемо варьировать размер фокусного пятна (конфокального объема) на образце и сократить время эксперимента в задачах, не требующих сверхвысокого пространственного разрешения.

Разработана и аттестована новая методика выполнения измерения на унифицированном модуле КРМ «Конфокальная рентгеновская

микроскопия в диапазоне энергий 12-26 кэВ на основе поликапиллярной оптики», свидетельство № 391-RA.RU.311735-2018 от 18.07.2018.

Протокол поиска и исследования микрочастиц позволяет организовать комплексное изучение образца на одной установке.

Теоретическая и практическая значимость

Разработанный КРМ вместе с развиваемыми на нем методиками измерений позволяет исследовать и получать данные мирового уровня, так например: получено, что при исследовании образцов донных осадков возможно определять химический состав образцов внутри годового слоя, обнаруживать следы крупных землетрясений и извержений вулканов. При исследовании образцов рудных месторождений и частиц внеземного вещества возможно обнаруживать и характеризовать крупинки размерами несколько микрон и больше, а также выделять четкие границы минеральных зон. При помощи модуля КРМ возможно картирование поверхности исследуемых образцов, определение геометрических параметров включений, а также исследование их локальной структуры и валентного состояния химических элементов, что, в свою очередь, позволяет определять формы вхождения исследуемых элементов в минерал.

Модульный протокол исследований позволяет адаптировать установку для исследования конкретных образцов несколькими экспериментальными методами (например, микро-РФА и микро-XAFS-спектроскопия). Аттестованная методика выполнения измерений гарантирует получение высокой точности получения результатов (содержание аналитов) при восстановлении концентраций химических элементов в образцах.

КРМ с расстройкой позволяет осуществлять панорамный поиск особенностей в любых (разумного размера) образцах и экономить время, необходимое для проведения эксперимента.

Методология и методы исследования

В работе использованы методы рентгенофлуоресцентного анализа (рутинного и конфокальной рентгеновской микроскопии), электронной и оптической микроскопии, а также XAFS-спектроскопии. 3D модели и конструкторская документация были подготовлены совместно с НКО ИЯФ СО РАН средствами Solid Edge 2020. Регистрация экспериментальных данных была проведена с помощью программно-аппаратных средств, интегрированных в станцию «Локальный и сканирующий рентгенофлуоресцентный элементный анализ» накопителя ВЭПП-3 ИЯФ СО РАН. Регистрация экспериментальных данных на станциях «РКФМ» и «РТ-МТ» синхротрона «КИСИ-Курчатов» в НИЦ «Курчатовский институт» выполнялась с помощью программно-аппаратных средств, предустановленных на управляющий компьютер унифицированного модуля

KPM. Обработка экспериментальных данных проводилась с помощью программных пакетов Axil, PyMca, Origin, Matlab, обработка данных XAFS осуществлялась с помощью программных пакетов FeFFIt и Viper.

Основные положения, выносимые на защиту

- Унифицированный модуль конфокальной рентгеновской микроскопии позволяет составлять одно-, двух- и трехмерные карты распределения химических элементов в геологических матрицах с микронным разрешением.
- Новый экспериментальный метод исследования – конфокальная рентгеновская микроскопия с расстройкой, позволяет проводить контролируемое изменение геометрических параметров конфокального объема для исследования микрообъектов различного размера с учетом аппаратной функции прибора, тем самым ускоряя эксперимент.
- Методика выполнения измерений «Конфокальная рентгеновская микроскопия в диапазоне энергий 12-26 кэВ на основе поликапиллярной оптики», аттестат № 391-RA.RU.311735-2018 от 18.07.2018.
- Разработанный и апробированный на реальных геологических образцах протокол поиска и исследования микровключений позволяет получать данные о местоположении, размере, элементном составе, фазе и структурных особенностях микрообъектов, находящихся непосредственно в исследуемом образце без его разрушения.

Степень достоверности и апробация результатов

Основные результаты работ, положенных в основу диссертации, докладывались на следующих отечественных и международных научных мероприятиях (школах, конференциях): XX Национальная конференция по использованию СИ (7-10 июля 2014 г., Новосибирск, Россия), The 12th International Conference on Salt Lake Research (14-18 July 2014, Beijing, China), Совещание по использованию рассеяния нейтронов и синхротронного излучения в конденсированных средах (27-31 октября 2014 г., Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Россия), Синхротронные и нейтронные исследования «СИН-нано-2015» и «СИН-нано-2017» (6-11 июля 2015 г., 26 июня – 7 июля 2017 г., Курчатовский Институт, Москва, Россия), International congress of x-ray optic and microanalysis 23 (ICXOM 23) (14-18 September 2015, Brookhaven National Laboratory, New York, USA), XIII и XIV Курчатовская молодежная научная школа (27-30 октября 2015 г. и 8-11 ноября 2016 г., Курчатовский Институт, Москва, Россия), 50-я Школа ПИЯФ по Физике Конденсированного Состояния (14-19 марта 2015 г., Санкт-

Петербург, Зеленогорск, Россия), Synchrotron and Free electron laser Radiation: generation and application «SFR-2016», «SFR-2018» и «SFR-2020» (4-8 July 2016, 25-28 June 2018, 13-16 July 2020, BINP, Novosibirsk), XRF Core Scanning 2017 (20-24 March 2017, National Taiwan University, Taipei, Taiwan), XVII DESY Research Course 2018 (26 February - 1 March 2018, DESY, Hamburg, Germany).

О результатах научно-исследовательских работ по тематике диссертации автор неоднократно докладывал на конкурсах молодых ученых ИЯФ СО РАН на секции «Синхротронное излучение».

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 26 работ в рецензируемых журналах и сборниках трудов конференций. Основные результаты диссертации представлены в девяти публикациях, из них восемь в научных изданиях, рекомендуемых ВАК при Минобрнауки России [1-9].

Личный вклад автора

Автор внес существенный вклад в разработку концепции нового метода исследований – конфокальной микроскопии с расстройкой. Автор осуществлял разработку, участвовал в конструировании и осуществлял сборку модуля конфокальной микроскопии на экспериментальной станции, принимал участие в автоматизации системы управления модуля и ее интеграции в систему управления всей станцией. Кроме того, автор лично выполнял исследования тест-объектов для характеристики созданного модуля.

Для получения достоверных данных автор проводил пробоподготовку объектов исследования, предварительные исследования на электронном и оптическом микроскопах и экспериментальные работы на пучке синхротронного излучения, а также выполнял обработку данных с помощью программных пакетов Axil, PyMca, Origin, Matlab. Для ряда образцов автор участвовал в пробоподборе.

На основании полученных результатов автором была разработана и аттестована новая методика выполнения измерений «Конфокальная рентгеновская микроскопия в диапазоне энергий 12-26 кэВ на основе поликапиллярной оптики», кроме того, автор внес существенный вклад в разработку модульного протокола выполнения измерений, который позволяет адаптировать установку для проведения комплексных исследований несколькими методиками.

Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Подготовка полученных результатов к публикации была проведена совместно с соавторами. Все представленные в диссертации результаты получены лично автором либо при его участии.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем работы 141 страница, из них 111 страниц текста, включая 73 рисунка и 6 таблиц. Библиография включает 101 наименование на 16 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, приводится краткое описание преимуществ метода РФА СИ и конфокальной рентгеновской микроскопии, определена цель, сформулированы задачи работы, аргументирована новизна, показана практическая значимость работы и представлены научные положения, выносимые на защиту.

Первая глава является литературным обзором современного состояния проблемы. Кратко рассматриваются альтернативные методы локального анализа элементного состава геологических образцов и применение метода РФА СИ в мировых синхротронных центрах, проведено сравнение методов. Особое внимание уделено реализации конфокальных методов на рентгеновских трубках и экспериментальных станциях зарубежных источников СИ. В обзоре рассмотрены основные фокусирующие рентгенооптические элементы, принципы их работы, проведено сравнение параметров.

Вторая глава посвящена разработке и созданию модуля конфокальной рентгеновской микроскопии для станции «Локальный и сканирующий рентгенофлуоресцентный элементный анализ» накопителя ВЭПП-3. Рассчитаны спектральные характеристики пучка излучения, заданы требования к модулю КРМ: габаритные размеры, юстировочные параметры для оптики, параметры перемещения и ориентации образца, рабочий спектральный диапазон. В качестве фокусирующего рентгеновское излучение и собирающего флуоресцентное излучение рентгенооптических элементов выбрана пара поликапиллярных линз.

Совместно с Технологическим институтом Карлсруэ (Karlsruher Institut für Technologie (KIT)), Германия, были подобраны одинаковые поликапиллярные линзы, удовлетворяющие искомым требованиям.

Исходя из этих требований к юстировке и перемещениям было выбрано механическое решение на основе пяти координатного столика для фокусирующей и собирающей линз. Для автоматизированного перемещения использованы пьезоактуаторы, обеспечивающие необходимую точность перемещения. Для перемещения и ориентации образца также было выбрано решение на основе механики Newport. Разработанная схема позволяет реализовать методы микро-XAFS, а также РФА-томографии и микродифракции. 3D-модель модуля КРМ (рисунок 1) разработана совместно с НКО ИЯФ СО РАН.

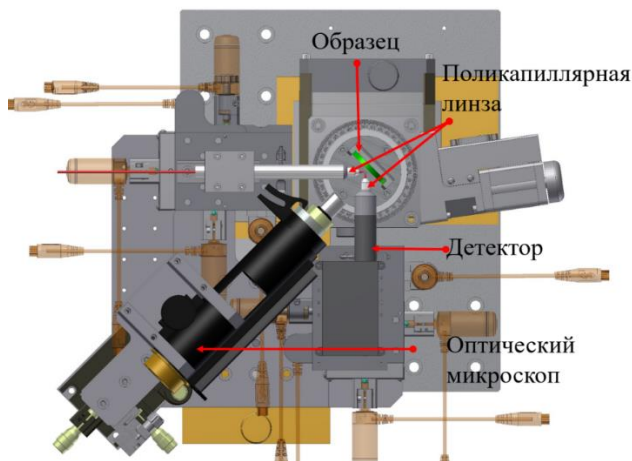


Рисунок 1 – Модель КРМ в сборе (вид сверху)

КРМ был собран и установлен на станции «Локальный и сканирующий рентгенофлуоресцентный элементный анализ». Оптическая схема станции с установленным КРМ приведена на рисунке 2.

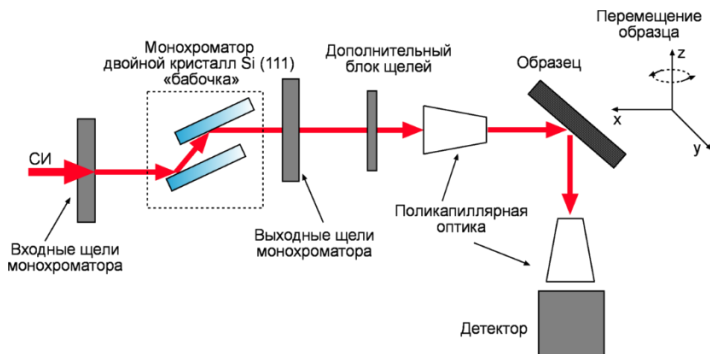


Рисунок 2 – Оптическая схема станции «Локальный и сканирующий рентгенофлуоресцентный элементный анализ» с КРМ

Система управления модулем КРМ интегрирована в систему управления экспериментальной станции и позволяет проводить исследования в автоматизированном режиме.

На станции возможна реализация нескольких режимов проведения экспериментов, с использованием набора щелей и оптических элементов.

Для модуля КРМ определена аппаратная функция прибора. Аппаратная функция (АФ) прибора описывает распределение интенсивности излучения в пространстве. АФ позволяет с высокой точностью определить размер фокусного пятна и оценить исследуемый объем материала. Знание АФ позволяет контролируемо изменять размер фокусного пятна (конфокального объема) путем перестройки положения линзы (рисунок 3).

Для созданного модуля КРМ разработана и аттестована методика выполнения измерений «Конфокальная рентгеновская микроскопия в диапазоне энергий 12-26 кэВ на основе поликапиллярной оптики». Модуль КРМ также апробирован на источнике синхротронного излучения УНУ «КИСИ-Курчатов» в НИЦ «Курчатовский институт» на станциях «РКФМ» и «РТ-МТ».

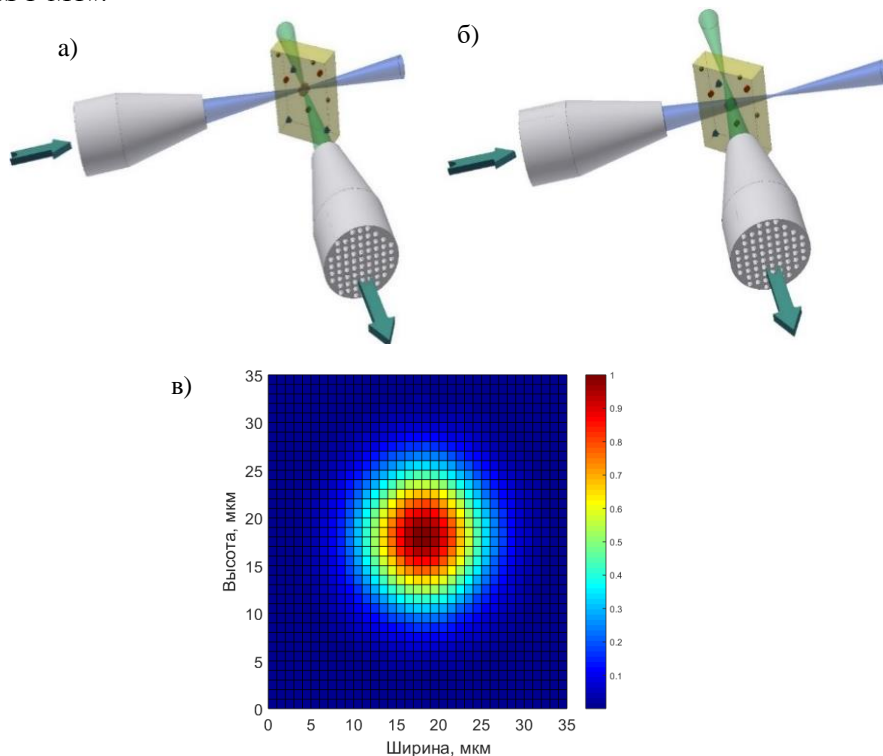


Рисунок 3 – Иллюстрация работы конфокального микроскопа:
 а) 3D модель пересечения фокусов поликапиллярных линз; б) 3D модель пересечения каустик излучения фокусирующей и приемного конуса коллимирующей поликапиллярных линз в схеме с расстройкой;
 в) результаты аппроксимации гауссовой зависимостью пространственного распределения сигнала флуоресценции W , регистрируемого при двумерном поперечном сканировании W -ой проволоки диаметром 10 мкм

Проведено исследование тест-объекта для определения основных параметров КРМ и продемонстрирована возможность получения микро-XAFS спектров для проведения комплексного анализа исследуемых веществ несколькими экспериментальными методами (рисунок 4).

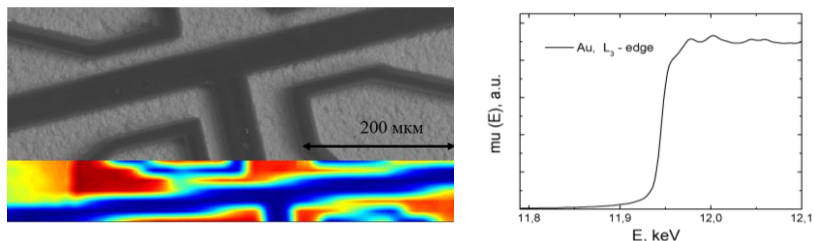


Рисунок 4 – Результаты исследования тест-объекта: электронная фотография фрагмента тест-объекта (слева), содержащего топологический рисунок (вверху), изображение центральной части тест-объекта, полученное методом сканирующего РФА в конфокальной схеме; спектр поглощения Au (справа)

В третьей главе описан комплексный подход по поиску, локализации и исследованию микрочастиц в различных геологических матрицах. Разработанный протокол исследований позволяет получать наиболее полную информацию об образце с использованием одного прибора. Описана новая методика конфокальной микроскопии с расстройкой, при которой область исследования образца формируется контролируемо в пределах каустик излучения на основе полученных знаний об АФ линз. Полная блок-схема протокола приведена на рисунке 5.



Рисунок 5 – Блок-схема модульного протокола исследования

Разработанный протокол позволяет значительно ускорить проведение экспериментов, направленных на поиск частиц и локализацию областей, представляющих интерес для исследований.

В четвертой главе представлены результаты апробации КРМ и модульного протокола исследований на реальных геологических образцах. Продемонстрированы результаты исследования донных осадков в целях реконструкции климата, поиска микрочастиц МПГ в рудных матрицах (на примере исследования образцов из месторождения Бушвельд и Норильского), исследованы уникальные объекты – микрочастицы метеоритов (Челябинский и Сихотэ-Алиньский метеориты (рисунок 6) картирование проводилось с шагом 50 мкм, размер пучка на образце 30 мкм, энергия 15 кэВ).

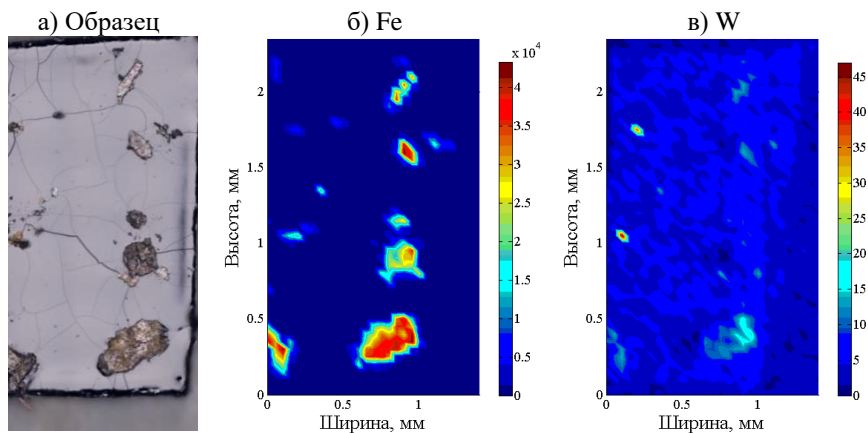


Рисунок 6 – Результаты картирования элементов Сихотэ-Алиньского метеорита: а) область исследования; б) распределение Fe; в) распределение W

Детально исследована область с высоким содержанием W, шаг сканирования составил 5 мкм, размер пятна излучения на образце 15 мкм, энергия 15 кэВ. Построенные карты распределения элементов приведены на рисунке 7.

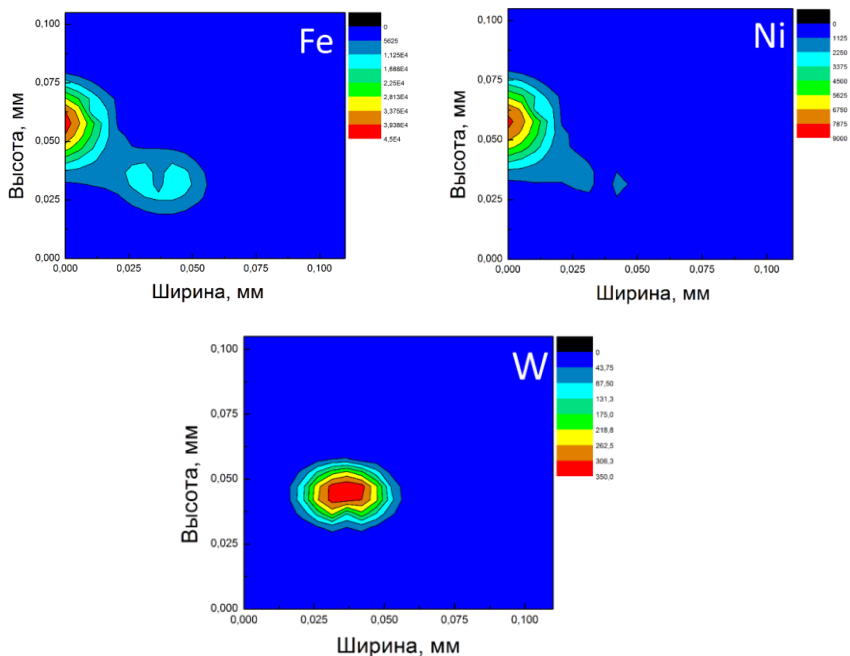


Рисунок 7 – Результаты детального картирования элементов Сихотэ-Алинского метеорита по химическим элементам Fe, Ni, W

Для частицы с повышенным содержанием вольфрама проведены микро-XANES исследования (рисунок 8). Анализ данных XANES (положение края, форма спектра, амплитуда и положение белой линии, особенности околораевой области) частичек метеорита и реперных образцов в сравнении с литературными данными позволил сделать следующие выводы о доле содержания металлического вольфрама и наиболее вероятной смеси фаз неметаллической части частицы.

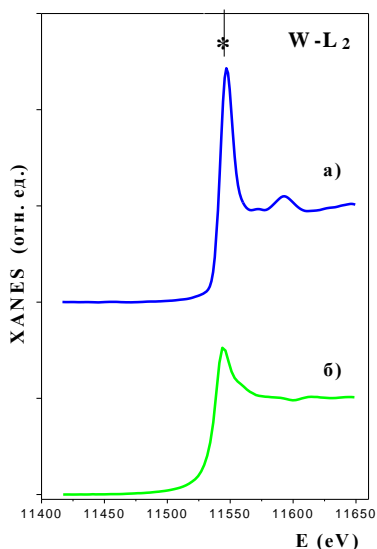


Рисунок 8 – Нормированные спектры XANES (W-L₂ край):
а) образец частицы метеорита; б) W – фольга, реперный образец

В заключении представлены основные результаты работы и даны рекомендации дальнейшей разработки темы.

В приложении А приведено свидетельство об аттестации методики измерений «Конфокальная рентгеновская микроскопия в диапазоне энергий 12-26 кэВ на основе поликапиллярной оптики», аттестат № 391-RA.RU.311735-2018 от 18.07.2018.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация посвящена разработке и созданию унифицированного модуля конфокальной рентгеновской микроскопии на основе поликапиллярной рентгеновской оптики и реализации метода конфокальной рентгеновской микроскопии для исследования различных геологических объектов на экспериментальной станции «Локальный и сканирующий рентгенофлуоресцентный элементный анализ» накопителя ВЭПП-3 Центра коллективного пользования «Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения» («СЦСТИ») ИЯФ СО РАН, а также его развитию и совершенствованию, включая создание новой методики конфокальной рентгеновской микроскопии с расстройкой, внедрение модульного протокола исследований, аттестацию методики выполнения измерений.

Основные результаты диссертационной работы

1. Разработан и создан унифицированный модуль Конфокальный рентгеновский микроскоп. Модуль апробирован в двух синхротронных центрах (ЦКП «СЦСТИ» ИЯФ СО РАН и «КИСИ-Курчатов» в НИЦ «Курчатовский институт»), на трех различных станциях. С использованием тест-объектов определены основные рабочие параметры КРМ.

2. Реализован новый экспериментальный метод конфокальной рентгеновской микроскопии с расстройкой. Основным его преимуществом является возможность ускоренного 2D и 3D сканирования с целью локализации более мелких частиц, а также быстрого составления карт распределения элементов в случаях, когда не требуется предельное пространственное разрешение. При этом, зная аппаратную функцию КРМ, можно выбрать любой удобный размер конфокального объема.

3. Экспериментально продемонстрированы возможности конфокального рентгеновского микроскопа в μ -XAFS исследованиях.

4. На основании полученных результатов разработана и аттестована методика выполнения измерений «Конфокальная рентгеновская микроскопия в диапазоне энергий 12-26 кэВ на основе поликапиллярной оптики» № 391-RA.RU.311735-2018 от 18.07.2018.

5. Разработан и опробован модульный протокол поиска, локализации и исследования микрочастиц в различных геологических образцах. Протокол апробирован на донных осадках, рудных породах и образцах взеземного вещества.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

1. Search for aerosol microparticles in dated layers of bottom sediments using synchrotron radiation / A. V. Darin, F. A. Darin, Ya. V. Rakshun [et al.]. – Текст : электронный // *Geodynamics and Tectonophysics*. – 2022. – Vol. 13, nr 2. – P. 0581. – URL: <https://doi.org/10.5800/gt-2022-13-2-0581>. – Дата публикации: 15.03.2022.

2. On the Search and Localization of Platinum-Group Microelements in Samples of the Chromite Horizon in the Bushveld Complex / F. A. Darin, D. S. Sorokoletov, Ya. V. Rakshun, [et al.]. – Текст : электронный // *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. – 2018. – Vol. 12, nr 1. – P. 123–127. – URL: <https://doi.org/10.1134/S1027451018010263> – Дата публикации: 02.04.2018.

3. Разработка методик микро-РФА на пучках синхротронного излучения из накопителя ВЭПП-3 и их применение для исследования распределения элементов в природных образцах / Ф. А. Дарьин, Я. В. Ракшун, Д. С. Сороколетов [и др.]. – Текст : электронный // *Ядерная физика и инжиниринг*. – 2017. – Т. 8, № 1. – С. 86–90. – URL: <https://doi.org/10.1134/S2079562917010067> (дата обращения: 26.05.2022).

4. Micro-XANES (W-L₂) Study of the Sikhote-Alin Meteorite / F. Darin, D. Sorokoletov, I. Rakshun [et al.]. – Текст : электронный // AIP Conference Proceedings : Proceedings of International Conference on Synchrotron and Free Electron Laser Radiation: Generation and Application (Novosibirsk, 13–16 July 2020). – Melville, NY, USA, 2020. – Vol. 2299. – P. 080005. – URL: <https://doi.org/10.1063/5.0030495>. – Дата публикации: 17.11.2020.

5. Search for and analysis of composition and structure of submicron-size particles in geological and environmental samples / F. Darin, V. Kriventsov, D. Sorokoletov [et al.]. – Текст : электронный // AIP Conference Proceedings : Proceedings of International Conference on Synchrotron and Free Electron Laser Radiation: Generation and Application (Novosibirsk, 13–16 July 2020). – Melville, NY, USA, 2020. – Vol. 2299. – P. 070001. – URL: <https://doi.org/10.1063/5.0030411>. – Дата публикации: 17.11.2020.

6. Distribution of Germanium and Other Elements in Samples of the Chelyabinsk Meteorite, Determined via Scanning Synchrotron Radiation X-ray Fluorescence Microanalysis // F. A. Darin, Ya. V. Rakshun, D. S. Sorokoletov [et al.]. – Текст : электронный // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2019. – Vol. 83, nr 11. – P. 1433–1436. – URL: <https://link.springer.com/article/10.3103/S1062873819110078>. – Дата публикации: 04.12.2019.

7. Searching for Annually Stratified Bottom Sediments in Altai Mountain Lakes by Means of XRF Microanalysis Using Synchrotron Radiation // A. V. Darin, I. A. Kalugin, V. V. Babich [et al.]. – Текст : электронный // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2019. – Vol. 83, nr 2. – P. 194–197. – URL: <https://link.springer.com/article/10.3103/S1062873819020102>. – Дата публикации: 07.05.2019.

8. Seasonal geochemical signals in varves of the lake Donguz-orun bottom sediments from scanning x-ray fluorescence with the use of microcapillary X-ray optics // A. V. Darin, Ya. V. Rakshun, D. S. Sorokoletov [et al.]. – Текст : электронный // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2015. – Vol. 79, nr 1. – P. 122–125. – URL: <https://link.springer.com/article/10.3103/S1062873815010104>. – Дата публикации: 31.01.2015.

9. Скорости осадконакопления и выделение границ годовых слоев годично-стратифицированных отложений приледникового озера Кучерлинское (Алтай) по данным сканирующего микро-рентгенофлуоресцентного анализа на синхротронном излучении / Ф. А. Дарьин, О. Н. Соломина, А. М. Грачев [и др.]. – Текст : электронный // Проблемы региональной экологии. – 2018. – № 3. – С. 70–76. – URL: <https://doi.org/10.24411/1728-323X-2018-13070>. – Дата публикации: 19.09.2018.

Дарьин Федор Андреевич

**Развитие метода конфокальной рентгеновской
микроскопии для исследования микровключений
в различные геологические матрицы**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Сдано в набор 23.12.2022.
Подписано в печать 27.12.2022.
Формат 60×90 1/16 Объем 1.0 печ.л., 0.9 уч.-изд.л.
Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 12

Обработано на IBM PC и отпечатано на ротапинтере ИЯФ СО РАН
630090, Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11