

На правах рукописи



**Татаринов Василий Вадимович**

**ЭЛЕКТРОННО-ЗОНДОВЫЙ МИКРОАНАЛИЗ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ  
ВКЛЮЧЕНИЙ ЗОЛОТА В СУЛЬФИДНЫХ МИНЕРАЛАХ**

02.00.02 «Аналитическая химия»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени

кандидата химических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук (ИГХ СО РАН).

Научный руководитель: **Финкельштейн Александр Львович**, доктор технических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией рентгеновских методов анализа ИГХ СО РАН

Официальные оппоненты: **Степович Михаил Адольфович**, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского» (КГУ им. К.Э. Циолковского), профессор кафедры физики и математики

**Осколок Кирилл Владимирович**, кандидат химических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», доцент кафедры аналитической химии

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГМ СО РАН), г.Новосибирск

Защита диссертации состоится 17 июня 2021 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 002.109.01 в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Ордена Ленина и Ордена Октябрьской Революции Институте геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук (ГЕОХИ РАН) по адресу: 119991, Москва, ул. Косыгина, дом 19.

С диссертацией можно ознакомиться на сайте ГЕОХИ РАН [http://intranet.geokhi.ru/Thesis/2021/Татаринов/Диссертация\\_Татаринов\\_ВВ.pdf](http://intranet.geokhi.ru/Thesis/2021/Татаринов/Диссертация_Татаринов_ВВ.pdf) и в библиотеке Института.

Текст автореферата размещён на сайте ВАК при Минобрнауки России <https://vak.minobrnauki.gov.ru>.

Автореферат разослан \_\_\_\_ апреля 2021 г.

Учёный секретарь диссертационного совета  
кандидат химических наук



Захарченко Е.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Характеристика типоморфных особенностей самородного золота является одним из главных этапов исследований, с которого начинается изучение генезиса золоторудных месторождений. Основными концентраторами Au на месторождениях являются сульфидные минералы. Состав находящегося в минералах самородного золота (пробность, примеси) выступает показателем особенностей их происхождения и рудно-формационной принадлежности. Изучение форм нахождения Au имеет непосредственное отношение к обогащению руд, а именно позволяет оценить количество Au, которое может быть извлечено, и которое останется в виде потери в хвостах. Значительная часть исследований опирается на данные рентгеноспектрального электронно-зондового микроанализа (РСМА) и растровой электронной микроскопии (РЭМ). С помощью этих методов получен большой объём информации об уровнях концентрирования и формах нахождения Au в рудах месторождений разного генезиса и разной рудно-формационной принадлежности.

На многих золоторудных месторождениях часть самородного золота находится в виде тонкодисперсных включений микронных и субмикронных размеров в минеральной матрице. При анализе таких форм золота, находящегося в свободном состоянии и в сростках с минералами, в том случае, когда размер включений меньше, чем размер области генерации характеристического рентгеновского излучения в образце (приблизительно 1–3 мкм), часть электронов зонда, падающих на включение, возбуждает элементы окружающей его матрицы. Это обстоятельство существенно ограничивает достоверное количественное определение химического состава включений из-за необходимости разделения аналитического сигнала элементов включения и элементов матрицы. Для количественного анализа таких включений не могут быть формально применены методы матричной коррекции, развитые для гомогенных образцов, которые используются в программном обеспечении микроанализаторов. Поэтому, разработка методических подходов для определения состава тонкодисперсных включений представляется актуальным направлением исследований.

Для оценки интенсивности аналитического сигнала при РСМА получил распространение метод Монте-Карло, который позволяет проводить моделирование траекторий электронов в веществе для гомогенных образцов. Метод Монте-Карло может быть применён также и для гетерогенных образцов, содержащих включения различных геометрических форм. Для расчёта зависимостей интенсивности сигнала от размера тонких включений необходимо провести адаптацию алгоритмов для конкретных объектов анализа, представляющих интерес при изучении минералов золоторудных месторождений.

**Цель работы** заключалась в разработке способа РСМА, позволяющего оценить содержание основных компонентов (Au, Ag) тонкодисперсных включений, размер которых сопоставим или меньше, чем размер области генерации рентгеновского излучения (менее 1–2 мкм) в образцах сульфидных минералов золоторудных месторождений (арсенопирит, пирит и некоторые другие).

Для достижения цели работы необходимо было решить следующие **задачи**:

- разработать инструменты и алгоритмы для проведения моделирования траекторий электронов в веществе методом Монте-Карло, которые позволят провести оценку влияния химического состава и размера тонкодисперсных включений в гомогенной матрице на интенсивность аналитического сигнала;
- оценить влияние матрицы на результаты РСМА включений путём расчёта характеристик возбуждения рентгеновского излучения под воздействием электронного зонда;
- оценить пространственное разрешение РСМА для элементов, представляющих интерес при изучении минералов золоторудных месторождений;
- для экспериментального подтверждения модельных расчётов подготовить и исследовать методом РСМА искусственный образец пирита с напылёнными слоями золота, имитирующими природные тонкодисперсные включения;
- сопоставить расчётные и экспериментальные данные о влиянии диаметра зонда и размера включений на интенсивность аналитического сигнала;
- оценить возможность повышения точности определения основных элементов тонкодисперсных включений (Au, Ag) в матрице природных минералов Наталкинского золоторудного месторождения (арсенопирит и пирит) с учётом результатов моделирования и экспериментальных данных.

#### **Научная новизна работы**

1. Разработаны модификации квазиодномерной Монте-Карло модели Лава, Кокса и Скотта, позволяющие проводить моделирование процессов взаимодействия электронов с веществом применительно к минералам, содержащим тонкодисперсные включения, при энергии пучка электронного зонда 20 кэВ.

2. Предложены выражения, позволяющие оценить пространственное разрешение (локальность) метода РСМА в зависимости от атомного номера для элементов, представляющих интерес при изучении сульфидных минералов золоторудных месторождений.

3. Разработан способ определения содержания элементов, позволяющий проводить оценку основного состава (Au, Ag) тонкодисперсного золота в гомогенной сульфидной матрице в тех случаях, когда размер включений золота сопоставим или меньше размера области генерации рентгеновского излучения в образце, характеризующей локальность метода РСМА.

4. С помощью разработанного способа определена пробность тонкодисперсного золота в рудах месторождения Наталкинское (Северо-Восток России) и оценена погрешность полученных результатов. При исследовании литохимических потоков рассеяния Дукатской золото-серебряной рудообразующей системы с помощью разработанного способа был определён состав тонкодисперсного электрума в аллювиальных отложениях.

**Практическая значимость.** Использование предложенного способа повышает достоверность определения пробности тонкодисперсного золота в сульфидных минералах методом РСМА и позволяет оценить неопределённость результатов анализа Au и Ag во включениях размером меньше, чем

пространственное разрешение метода РСМА (1–2 мкм и менее). Разработанный способ может быть применён для обработки аналитических данных в лабораториях, которые специализируются на проведении рентгеноспектрального микроанализа сульфидных минералов золоторудных месторождений методами РСМА и РЭМ с использованием как волновых, так и энергодисперсионных спектрометров. Информация о составе тонкодисперсного золота, полученная с помощью разработанного способа, может быть полезна для выявления особенностей генезиса золоторудных месторождений, при проведении оценки перспектив и промышленной значимости рудной минерализации, а также при выборе схемы обогащения руд.

Разработанный способ внедрён в практику лаборатории рентгеновских методов анализа Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН и используется при анализе арсенопирита Наталкинского золоторудного месторождения на микроанализаторе JXA-8200 Superprobe (Jeol Ltd., Япония).

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Модификация квазиодномерной Монте-Карло модели возбуждения рентгеновского излучения при РСМА для оценки влияния на аналитический сигнал размера и состава тонкодисперсных включений самородного золота в сульфидных минералах в двумерном и трёхмерном случае.

2. Выражения, позволяющие оценить пространственное разрешение количественного РСМА при энергии пучка электронного зонда 20 кэВ в зависимости от атомного номера для элементов, определяемых по аналитическим линиям *K*-серии, и некоторых элементов, определяемых по линиям *L*-серии.

3. Способ оценки содержаний основных компонентов (Au, Ag) тонкодисперсных включений самородного золота микронных и субмикронных размеров в гомогенной матрице сульфидных минералов, основанный на экстраполяции зависимости между содержаниями элемента включения и элемента матрицы в область, где содержание элемента матрицы стремится к нулю.

4. Результаты определения содержаний основных компонентов тонкодисперсных включений самородного золота в сульфидных минералах месторождения Наталкинское методом РСМА с использованием предложенного способа.

**Личный вклад автора.** Личный вклад автора в публикациях, касающихся моделирования методом Монте-Карло и РСМА, является определяющим. Экспериментальные результаты, представленные в работе, получены непосредственно автором на микроанализаторе Superprobe JXA-8200. Постановка задачи, разработка программного обеспечения, обсуждение результатов и подготовка материалов для публикации проводились совместно с научным руководителем и соавторами.

**Публикации.** По теме диссертации опубликована 21 работа, из них: 4 статьи в журналах, индексируемых в реферативно-библиографических базах Scopus и Web of Science (входят в Перечень ВАК при Минобрнауки России); 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ; 1 статья в журнале, индексируемом в системе РИНЦ; 15 тезисов докладов в материалах конференций.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертации были представлены на конференциях: XXVIII Российская конференция по электронной микроскопии, Черноголовка, Россия (7–10 сентября 2020 г.); Конференция с международным участием «Электронно-лучевые технологии» КЭЛТ-2019, Черноголовка, Россия (30 сентября – 3 октября 2019 г.); Всероссийская конференция по аналитической спектроскопии с международным участием, Туапсе, Россия (29 сентября – 5 октября 2019 г.); XX международная конференция «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле», Москва, Россия (23–27 сентября 2019 г.); The 5<sup>th</sup> International Conference on X-Ray Analysis, Ulaanbaatar, Mongolia (12–14 сентября 2018 г.); XXVII Российская конференция по электронной микроскопии, Черноголовка, Россия (28–30 августа 2018 г.); Geoanalysis 2018, Sydney, Australia (8–13 июля 2018 г.); European Conference on X-Ray Spectrometry – EXRS-2018, Ljubljana, Slovenia (24–29 июня 2018 г.); Всероссийская конференция молодых учёных «Современные проблемы геохимии – 2018», Иркутск, Россия (29 мая – 2 июня 2018 г.); Юбилейный съезд Российского минералогического общества «200 лет РМО», Санкт-Петербург, Россия (10–13 октября 2017 г.); 2-й Международный форум по электронно-лучевым технологиям для микроэлектроники «Technounity – EBTM 2017», Зеленоград, Москва, Россия (9–12 октября 2017 г.); Третий съезд аналитиков России, Москва, Россия (8–13 октября 2017 г.); Всероссийская конференция с международным участием «Современные направления развития геохимии», Иркутск, Россия (18–23 сентября 2017 г.); XXI Международный научный симпозиум имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр», Томск, Россия (3–7 апреля 2017 г.); XXVI конференция по электронной микроскопии, Зеленоград, Москва (30 мая – 3 июня 2016 г.).

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы, содержащего 199 наименований источников. Рукопись включает в себя 61 иллюстрацию и 21 таблицу, изложена на 165 страницах, включая 5 приложений.

**Благодарности.** Автор выражает признательность научному руководителю А.Л. Финкельштейну, а также Р.Г. Кравцовой и Л.А. Павловой, совместная работа и неоценимые консультации с которыми позволили получить результаты, положенные в основу диссертации. Автор благодарит за плодотворные советы и содействие А.С. Кузакова, А.С. Макшакова, О.Ю. Белозеру и всех сотрудников ИГХ СО РАН, принимавших участие в обсуждении полученных результатов.

Материалы диссертации частично получены в рамках выполнения проектов РФФИ № 20-05-00142, № 18-33-00369, № 18-33-20104, № 17-05-00095, № 14-05-00361 и Гранта Президента РФ МК-2645.2019.5 с использованием оборудования ЦКП «Изотопно-геохимических исследований» ИГХ СО РАН.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** обоснована актуальность темы, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, сформулированы основные защищаемые положения.

**В главе 1** приведены краткие сведения о формах нахождения золота в сульфидных минералах золоторудных месторождений, рассмотрены теоретические аспекты рентгеноспектрального электронно-зондового микроанализа (РСМА) применительно к изучению самородного золота, а также алгоритмы и программные инструменты для моделирования траекторий электронов в веществе. Обсуждаются простейшие аналитические выражения для описания процессов взаимодействия электронов с веществом и возбуждаемого ими рентгеновского излучения при РСМА.

За последние десятилетия появились достаточно продвинутые пакеты программ для моделирования электронного транспорта методом Монте-Карло. Однако, в них не предусмотрена возможность имитации процессов взаимодействия электронов с мишенью, представляющей из себя гомогенную матрицу с отдельными включениями, размер которых сопоставим или меньше, чем размер области генерации рентгеновского излучения в образце. Без проведения адаптации программных алгоритмов конкретно для решения проблемы включений в матрицах такое моделирование не представляется возможным.

**Глава 2** посвящена моделированию процессов взаимодействия электронов с веществом методом Монте-Карло. Основная задача моделирования – выявление особенностей генерации рентгеновского излучения при воздействии налетающих электронов зонда на включения самородного золота в гомогенной матрице сульфидного минерала в тех случаях, когда размер включений сопоставим или меньше, чем размер области генерации рентгеновского излучения. Для решения данной задачи была выбрана Монте-Карло модель Лава, Кокса и Скотта<sup>1</sup>, в основу которой положено приближение непрерывного замедления электронов в веществе и эту модель используют для построения функции  $\varphi(\rho z)$  распределения рентгеновского излучения по глубине образца  $z$ .

**В первом разделе** описаны основные алгоритмы, использованные для проведения моделирования методом Монте-Карло. Поскольку выбранная модель является квазиодномерной, то есть учитывает только одну пространственную координату  $z$  в глубину образца, эта модель была дополнена для двумерного (2D) и трёхмерного (3D) случая. При калибровке модели прицельный параметр резерфордского рассеяния ( $\text{ctg}(\vartheta/2) = 2p/b$ ; где  $\vartheta$  – угол рассеяния;  $p$  – прицельный параметр;  $b$  – константа) был оптимизирован таким образом, чтобы обеспечить минимальное отклонение фактора обратного рассеяния, рассчитанного методом Монте-Карло, от аппроксимации Данкамба-Рида.

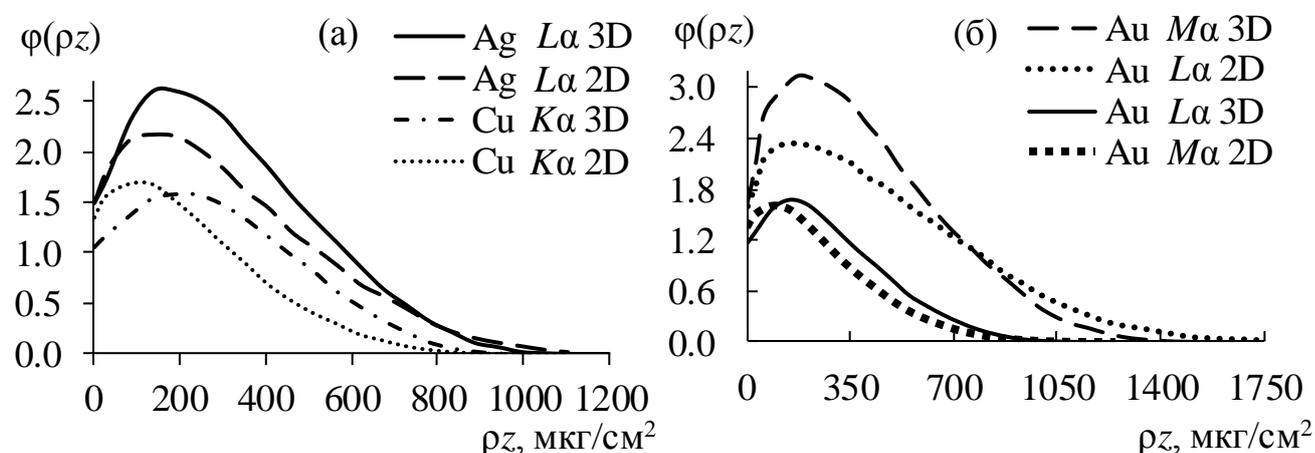
**Во втором разделе** проведено сопоставление 2D- и 3D-моделей возбуждения рентгеновского излучения в образце с начальной энергией электронов  $E_0 = 20$  кэВ при определении Au, Ag, Cu и некоторых других элементов, энергии излучения которых лежат в области более 3 кэВ. Геометрия возбуждения рентгеновского излучения при РСМА и РЭМ имеет аксиальную (цилиндрическую) симметрию. С этой точки зрения достаточно двух координат для описания картины взаимодействия электронов с веществом: радиальной

---

<sup>1</sup> Love G., Cox M.G.C., Scott V.D. J. Phys. D: Appl. Phys., 1977. DOI 10.1088/0022-3727/10/1/002

координаты  $x$  (т.е. расстояния от центра падающего пучка) и координаты глубины в образце  $z$ .

На рисунке 1 приведены функции распределения рентгеновского излучения по глубине образца  $\varphi(\rho z)$ , построенные с помощью 2D- и 3D-моделей, а в таблице 1 соответствующие им поправки на поглощение  $f(\chi)$  в сравнении с данными  $f(\chi)_{\text{Phil}}$ , рассчитанными по формуле Филибера.



**Рисунок 1.** Функции  $\varphi(\rho z)$ , построенные с помощью модифицированных моделей Монте-Карло: (а) для Cu K $\alpha$ , Ag L $\alpha$  и (б) Au L $\alpha$ , Au M $\alpha$

**Таблица 1.** Сравнение поправок на поглощение для 2D- и 3D-моделей

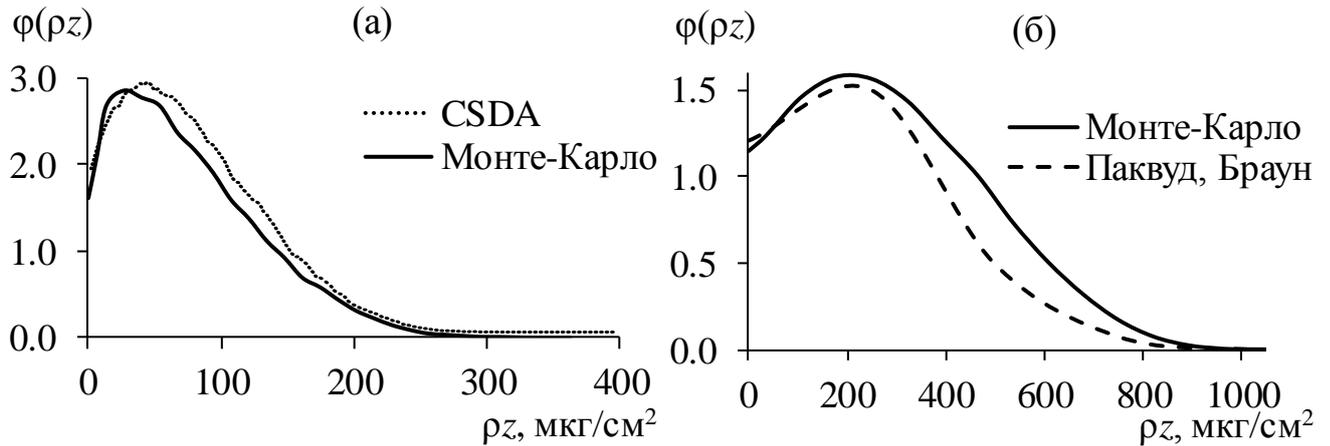
Линия	Энергия, кэВ	$f(\chi)_{\text{Phil}}$	Расчёт $f(\chi)$ методом Монте-Карло		$\Delta f(\chi)$ 2D-3D
			2D	3D	
Cu K $\alpha$	8.048	0.987	0.987	0.985	0.002
Ag L $\alpha$	2.984	0.859	0.823	0.845	0.022
Au L $\alpha$	9.713	0.977	0.963	0.966	0.003
Au M $\alpha$	2.125	0.758	0.627	0.731	0.104

Из таблицы 1 и рисунка 1 видно, что для относительно низкой энергии Au M $\alpha$ -линии расчёты по 2D-модели приводят к занижению фактора поглощения. Однако, интегрирование функций  $\varphi(\rho z)$  для 2D- и 3D-моделей согласно данным в таблице 1 приводит к близким значениям  $f(\chi)$  для энергий вблизи 3 кэВ и более. Для Au M $\alpha$ -линии величина поправки на поглощение значительно больше, чем для других линий. Это согласуется с общей тенденцией увеличения неопределённости поправки на поглощение при уменьшении энергии характеристического излучения.

Результаты расчётов, проведённых с помощью предложенной модификации 3D-модели, сопоставлены с данными В. Вернера (рисунок 2а) в приближении непрерывного замедления (CSDA)<sup>2</sup>, а также гауссианом Р. Паквуда и Дж. Брауна<sup>3</sup> (рисунок 2б). По сравнению с литературными данными функции  $\varphi(\rho z)$ , построенные методом Монте-Карло, имеют незначительное смещение, но по характеру поведения  $\varphi(\rho z)$  в целом согласуются с данными работ<sup>2,3</sup>.

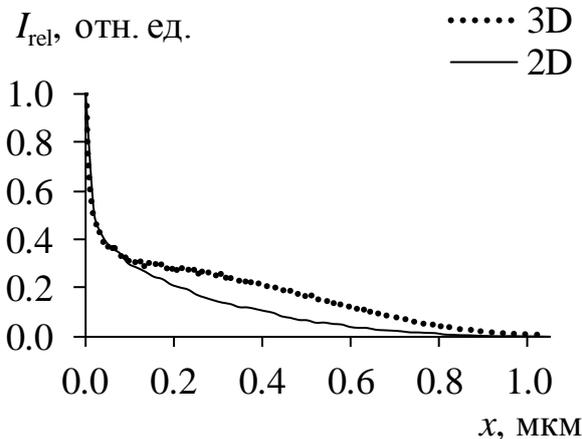
<sup>2</sup> Werner W.S.M. Surf. Interface Anal., 2001. DOI 10.1002/sia.973

<sup>3</sup> Packwood R.H., Brown J.D. X-Ray Spectrom., 1981. DOI 10.1002/xrs.1300100311

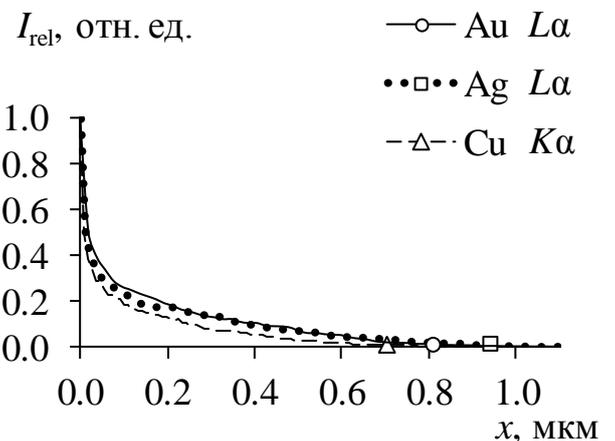


**Рисунок 2.** Сопоставление  $\varphi(\rho z)$ , построенных методом Монте-Карло, с другими данными: (а) CSDA для Si  $K\alpha$  ( $E_0=10$  кэВ); (б) гауссиан для Cu  $K\alpha$  ( $E_0=20$  кэВ)

**В третьем разделе** приведены результаты оценки пространственного разрешения (локальности) РСМА при  $E_0=20$  кэВ, построены функции латерального и радиального распределения рентгеновского излучения в образце. Латеральное распределение по оси  $x$  в двумерном случае должно отличаться от радиального распределения в трёхмерном случае, поскольку для трёхмерного случая распределение на плоскости  $x$ - $z$  является лишь проекцией радиального распределения на эту плоскость. На рисунке 3 приведены зависимости относительной интенсивности рентгеновского излучения  $I_{rel}$  для Au  $L\alpha$ -линии, полученные при моделировании методом Монте-Карло с точечным зондом (электроны пучка падают в одну точку на поверхности образца), от расстояния  $x$  до точки относительно центра падающего пучка электронов.



**Рисунок 3.** Радиальное и латеральное распределение для Au  $L\alpha$ -линии



**Рисунок 4.** Латеральные распределения для линий чистых веществ Cu, Ag и Au

Латеральное и радиальное распределение на рисунке 3 сходятся к нулевому значению интенсивности при близких значениях  $x$ , следовательно, оба распределения приводят к сопоставимым оценкам разрешения электронного зонда.

Для оценки пространственного разрешения проводили расчёт размера области, содержащей 99 % генерируемого излучения. На рисунке 4 приведены латеральные распределения для Au  $L\alpha$ -, Ag  $L\alpha$ -, и Cu  $K\alpha$ -линий. Выделенные

точки на графиках соответствуют границе области латерального распределения  $x_{99}$ , на которую приходится 99 % интенсивности рентгеновского излучения. Поскольку распределения на рисунке 4 были построены от центра падающего пучка электронов, а в отрицательной области значений  $x$  график имеет симметричный вид, разрешение количественного анализа может быть определено как  $2x_{99}$ .

Используя данные латеральных распределений, рассчитанных методом Монте-Карло для точечного зонда, было получено аппроксимирующее выражение, позволяющее оценить разрешение РСМА для элементов с атомным номером  $Z$  от 11 до 34, которые, как правило, определяют при проведении РСМА по аналитическим линиям  $K$ -серии:

$$(d_x)_K = 0.0394 \cdot Z^{0.5} (E_0^{1.5} - E_q^{1.5}); \quad (1)$$

где  $E_0$  – начальная энергия электронов;  $E_q$  – энергия ионизации  $q$ -уровня.

Для линий  $L$ -серии расчёты латеральных распределений проводили в диапазонах  $Z$  от 44 до 50 и от 74 до 82, в которых расположены элементы, представляющие интерес при изучении золоторудных месторождений. Аппроксимирующее выражение имеет следующий вид (коэффициент детерминации 0.998):

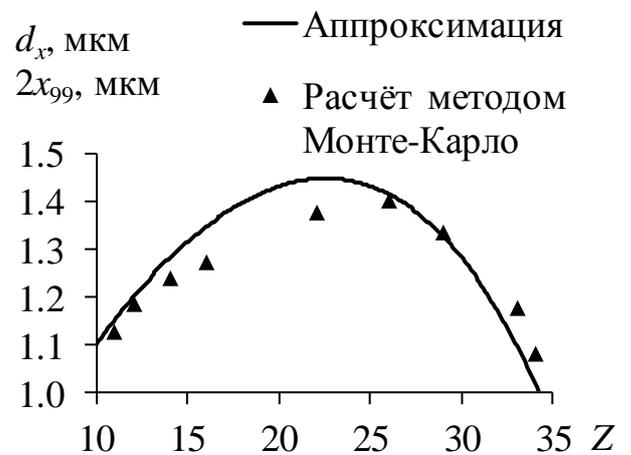
$$(d_x)_L = 0.00159 \cdot Z^{0.7} (E_0^{1.5} - E_q^{1.5}). \quad (2)$$

На рисунке 5 приведён график зависимости  $2x_{99}$  от  $Z$  для элементов, которые определяют по линиям  $K$ -серии. Кривая соответствует формуле (1), а точки на графике соответствуют расчётам методом Монте-Карло (коэффициент детерминации 0.998).

В таблице 2 приведены значения пространственного разрешения, рассчитанные методом Монте-Карло при  $E_0=20$  кэВ по соответствующей границе  $2x_{99}$ , а также значения  $d_x$ , вычисленные по формулам (1) и (2) для некоторых элементов, представляющих интерес при изучении тонкодисперсных включений

**Таблица 2.** Пространственное разрешение

$Z$	Линия	$E_q$ , кэВ	$2x_{99}$ , мкм	$(d_x)_{K,L}$ , мкм	$\Delta d_x$ , мкм
29	Cu $K\alpha$	8.979	1.34	1.33	0.01
34	Se $K\alpha$	12.658	1.08	1.02	0.06
44	Ru $L\alpha$	2.838	1.96	1.91	0.05
45	Rh $L\alpha$	3.004	1.94	1.93	0.01
46	Pd $L\alpha$	3.173	1.92	1.95	0.03
47	Ag $L\alpha$	3.351	1.89	1.95	0.06
76	Os $L\alpha$	10.871	1.81	1.77	0.04
77	Ir $L\alpha$	11.215	1.72	1.73	0.01
78	Pt $L\alpha$	11.564	1.80	1.69	0.11
79	Au $L\alpha$	11.919	1.74	1.64	0.10
80	Hg $L\alpha$	12.284	1.41	1.55	0.14
82	Pb $L\alpha$	13.035	1.52	1.48	0.04



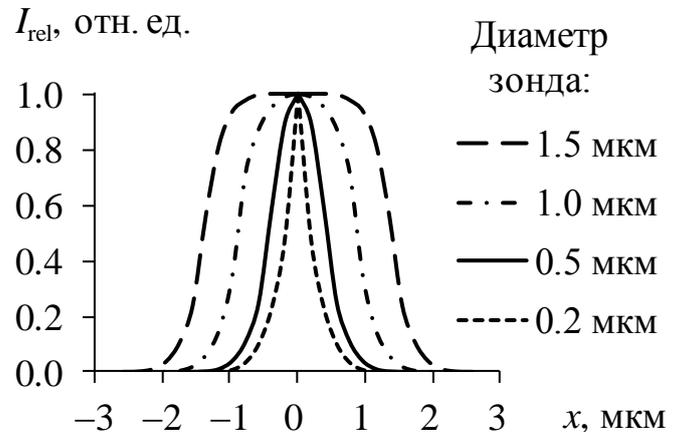
**Рисунок 5.** Зависимость разрешения РСМА от атомного номера элемента для аналитических линий  $K$ -серии

самородного золота, серебра и элементов платиновой группы в минералах золоторудных месторождений. Отклонение расчётов Монте-Карло от аппроксимаций (1) и (2) для элементов, представленных в таблице 2, в большинстве случаев не превышает 0.1 мкм, а для трёх случаев 0.11–0.14 мкм.

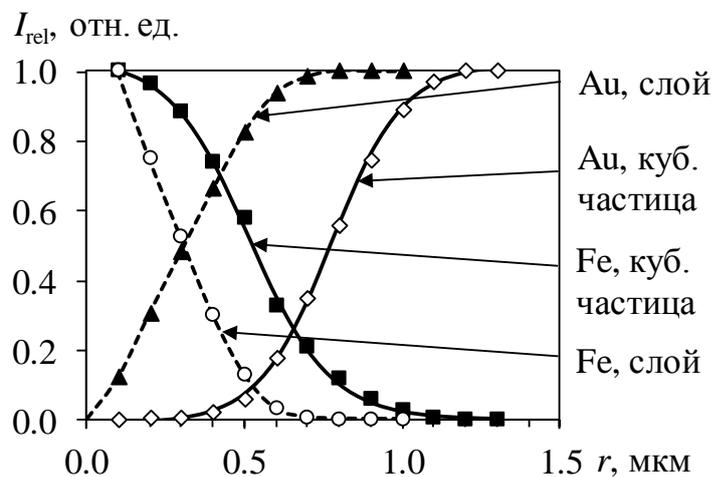
На рисунке 6 представлены расчётные латеральные распределения при различных диаметрах электронного зонда в форме пятна для Au  $L\alpha$ -линии при  $E_0=20$  кэВ. Из рисунка 6 видно, что пространственное разрешение по сравнению с точечным зондом возрастает на диаметр зонда. Таким образом, для оценки локальности количественного РСМА к значению  $2x_{99}$  необходимо прибавить диаметр зонда. Полученное значение позволяет оценить минимальный размер тонкодисперсных включений, при котором они могут быть проанализированы без «захвата» элементов матрицы.

**В главе 3** представлены результаты разработки способа оценки содержаний основных компонентов (Au, Ag) тонкодисперсных включений золота в сульфидных минералах.

**Раздел 1** посвящён оценке влияния размера включений и диаметра зонда на интенсивность аналитического сигнала. На рисунке 7 приведены рассчитанные методом Монте-Карло зависимости относительной интенсивности  $I_{rel}$  рентгеновского излучения Au  $L\alpha$ - и Fe  $K\alpha$ -линий от размера включения золота  $r$  в матрице минерала пирита. Расчёты выполняли с использованием модели кубической частицы и длинного тонкого слоя (модель пластинки в трещине или каверне) перпендикулярного плоской поверхности образца при диаметре зонда 0.5 мкм. Для интегрирования по площади пятна электронного пучка на поверхности образца выбрана сетка, содержащая 100 (10×10) точек. В каждой точке проводили расчёт 200 траекторий и, таким образом, общее число траекторий достигало 20 000. Здесь и далее в описании главы 3 интенсивности на рисунках нормированы на интенсивность массивного образца золота для Au  $L\alpha$ -линии и массивного образца пирита для Fe  $K\alpha$ -линии. Точки на рисунке соответствуют результатам расчётов. Сплошные



**Рисунок 6.** Латеральные распределения для электронного зонда в форме пятна

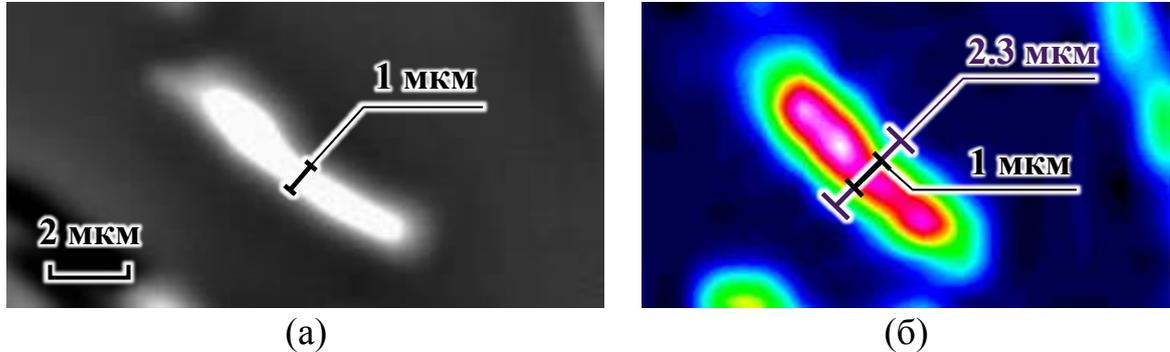


**Рисунок 7.** Зависимости интенсивности рентгеновского излучения от размера включения самородного золота в пирите

линии сплошные. Точки на рисунке соответствуют результатам расчётов. Сплошные

линии – аппроксимации гладкой кривой функции гиперболического тангенса. Видно, что характер зависимости относительной интенсивности от размера включения для кубической частицы и слоя существенно отличается.

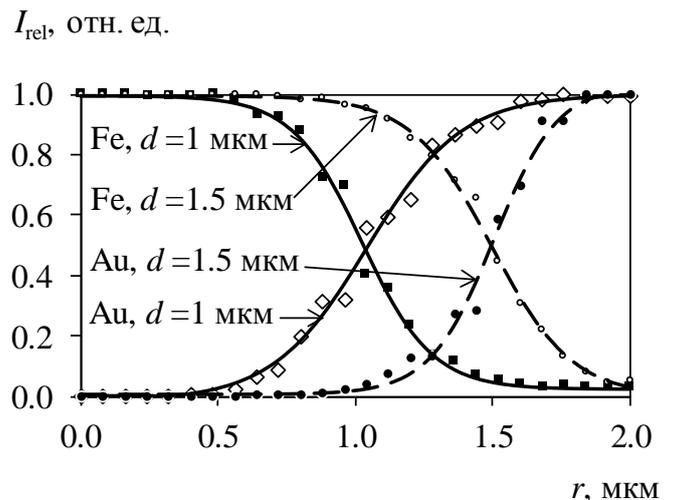
Для оценки диаметра электронного зонда сравнивали изображения включения золота в арсенопирите, полученные в обратно рассеянных электронах (BSE) и рентгеновских лучах Au  $L\alpha$ -линии (рисунок 8).



**Рисунок 8.** Включение золота в арсенопирите: (а) изображение в режиме BSE; (б) карта в рентгеновских лучах Au  $L\alpha$ -линии (градации цвета от белого до голубого соответствуют интенсивности от максимальной до минимальной)

Разница в ширине контуров включения золота на этих изображениях позволяет эмпирически оценить размер области генерации рентгеновского излучения золота в данной матрице. Разница между эмпирически определённым размером области генерации рентгеновского излучения и размером области генерации для точечного зонда, рассчитанным с помощью модели Монте-Карло, позволяет судить о диаметре электронного зонда. Найденный таким образом диаметр зонда для интервалов, помеченных на рисунке 8, приблизительно равен 0.7 мкм. Однако, область неопределённости диаметра зонда, найденная для различных участков микровключения, составляет 0.7–1.5 мкм.

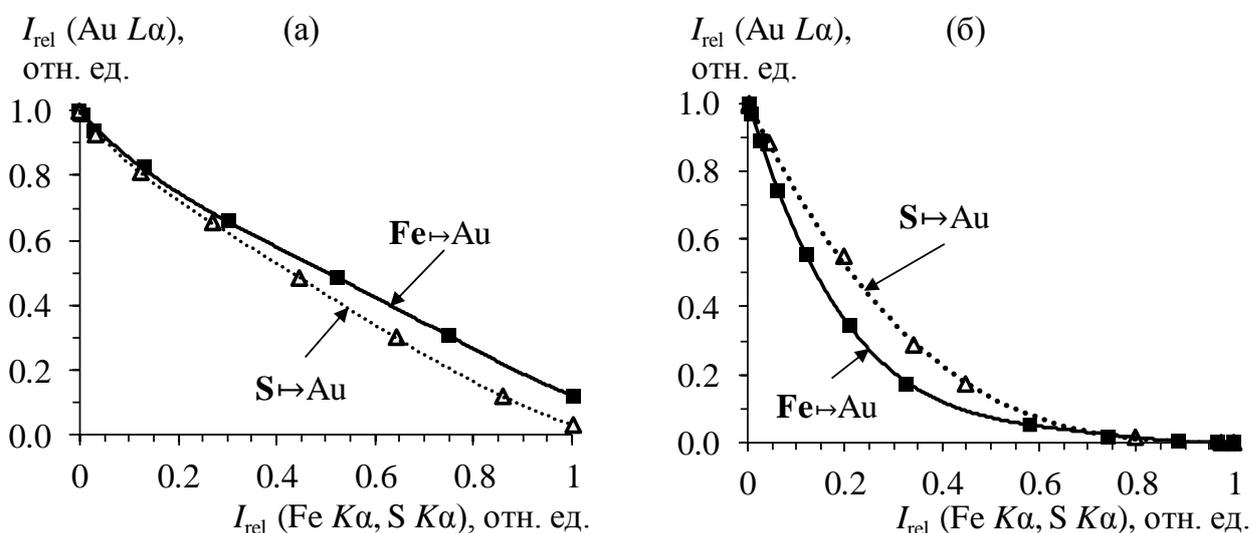
На рисунке 9 приведены рассчитанные методом Монте-Карло зависимости относительной интенсивности рентгеновского излучения Au  $L\alpha$ - и Fe  $K\alpha$ -линии от размера включения золота в матрице минерала арсенопирита при двух значениях диаметра зонда 1 мкм и 1.5 мкм. Видно, что величины интенсивностей излучения элементов в области размеров включения, соответствующей точкам перегиба кривых, существенно различается при разных диаметрах зонда как для включения, так и для матрицы. Это означает, что неопределённость позиционирования зонда может приводить к кратному изменению интенсивности излучения, что и наблюдается на практике.



**Рисунок 9.** Расчётные зависимости интенсивности рентгеновского излучения от размера включения

В разделе 2 проведено построение зависимостей между интенсивностями аналитического сигнала элемента включения и элемента матрицы. Далее подобные зависимости будут упоминаться в рамках настоящей работы как «тренды», поскольку они отражают тенденцию изменения интенсивности сигнала одного элемента при изменении интенсивности сигнала другого элемента в анализируемом объёме вещества.

На рисунке 10 приведены тренды Fe→Au – зависимости между интенсивностями сигнала Au  $L\alpha$  и Fe  $K\alpha$  для расчётов, соответствующих данным на рисунке 7 для кубической частицы (рисунок 10а) и слоя золота (рисунок 10б). Несмотря на различие в величинах интенсивностей излучения элемента включения и элемента матрицы (рисунок 7), тренды на рисунке 10 близки и сходятся при стремлении содержания элемента матрицы к нулю. В расчётах не учитывали флуоресценцию, возбуждённую рентгеновским излучением в образце, доля которой может составлять первые проценты, но не может существенно влиять на общий характер зависимости интенсивности от размера включения.



**Рисунок 10.** Расчётные относительные интенсивности излучения элемента включения (Au) в сравнении с интенсивностью излучения элементов матрицы пирита (Fe и S) при диаметре зонда 0.5 мкм: (а) для частицы кубической формы; (б) для слоя золота. Для обоих трендов коэффициент детерминации равен 0.99

Характер зависимости относительной интенсивности  $I_{rel}$  элемента включения от  $I_{rel}$  элементов матрицы для слоя и частицы отличается (рисунок 10), однако, экстраполяция трендов в область нулевых значений  $I_{rel}$  элемента матрицы приводит к одинаковому значению  $I_{rel}$  элемента микровключения, равному 1. Это обстоятельство далее будет использовано для разработки способа оценки состава тонкодисперсного золота в минералах.

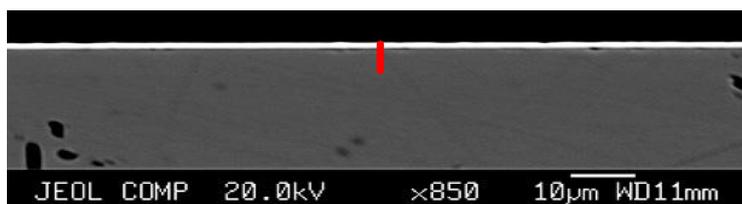
В разделе 3 описаны процедуры расчёта погрешностей при РСМА тонкодисперсного золота с использованием трендов содержаний. Приведена подборка формул для оценки стандартного отклонения линейной регрессии, описывающей тренды, а также для оценки стандартного отклонения при использовании процедуры «нормировки», которая часто применяется в практике

РСМА. При проведении процедуры «нормировки» элементы матрицы исключают из результатов РСМА и содержания элементов включения приводят к 100 % (далее упоминается как «нормировка»). Описаны выражения для расчёта содержаний компонентов включений и оценки погрешности их определения.

**В разделе 4** описано проведение эксперимента с целью проверки поведения трендов содержаний – зависимостей между содержаниями элементов включения и элементов матрицы. Был приготовлен образец пирита с напылёнными в вакууме слоями золота. На полированные поверхности двух минералов пирита нанесли слои чистого золота толщиной 0.5–1.5 мкм, затем поверхности прижали друг к другу и запаковали в брикет с эпоксидной смолой.

Внешнюю поверхность скреплённых кусков пирита отполировали и напылили углеродом. На рисунке 11 приведено изображение в режиме BSE приготовленного образца пирита с напылённым слоем золота. Полученный образец подобен природному самородному золоту в трещинах и кавернах на границах сульфидных минералов.

В таблице 3 приведены данные по серии измерений содержания Fe и Au вдоль красной линии на рисунке 11 (перпендикулярно слою золота). Измерения проводили на микроанализаторе Superprobe JXA-8200 (Jeol) при ускоряющем напряжении 20 кВ и токе зонда 20 нА. Время измерения пика линии 30 с, а фона 15 с. Расчёт содержаний проводили с помощью метода ZAF-коррекции. Экстраполяция содержания золота по тренду Fe→Au, построенному по данным таблицы 3, в область нулевых содержаний Fe приводит к содержанию Au  $98.1 \pm 2.1$  мас. %, которое близко к содержанию чистого золота, несмотря на то, что максимально обнаруженное содержание в напылённом слое без построения трендов составляет 75.6 мас. %.

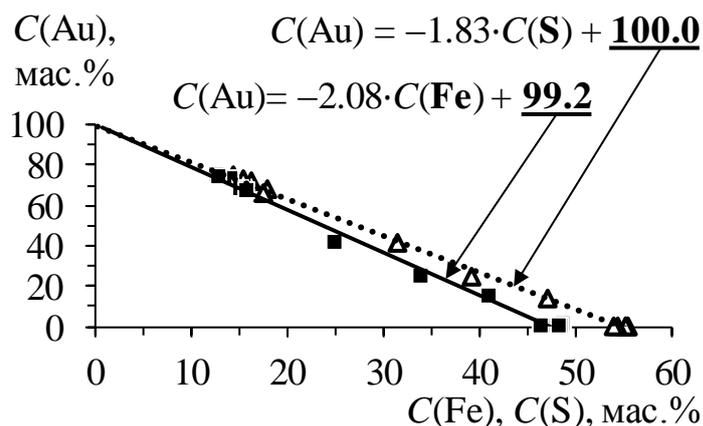


**Рисунок 11.** Слой золота, полученный вакуумным напылением, в пирите (изображение в режиме BSE)

**Таблица 3.** Результаты РСМА торцевой части золота, нанесённого на пирит

Au,	Fe	Расстояние от границы золота с пиритом, нм	Положение зонда
мас. %			
75.6	8.0	330	По центру слоя золота
68.0	10.8	250	В золоте от границы с пиритом
57.1	18.3	170	
55.2	19.4	85	
34.0	26.2	0	На границе раздела фаз
30.8	28.3	90	В пирите от границы с золотом
14.0	32.5	170	
7.9	36.2	330	
4.9	36.6	420	
3.5	37.8	500	
2.2	38.4	590	
1.7	38.9	670	
1.0	39.6	750	
1.1	39.5	840	
0.7	40.2	920	
0.8	40.0	1000	

На рисунке 12 приведены линейные тренды содержания золота в сравнении с содержанием серы и железа (элементов матрицы) для другой области искусственного образца. Экстраполяция с помощью уравнений обоих трендов в область нулевых содержаний элементов матрицы (Fe и S) приводит к оценке содержания золота в интервале 99.2–100 % мас. Таким образом, с помощью трендов может быть определена пробность золота в гомогенной матрице сульфидного минерала в тех случаях, когда размер включений золота сопоставим или меньше, чем размер области генерации рентгеновского излучения в образце.

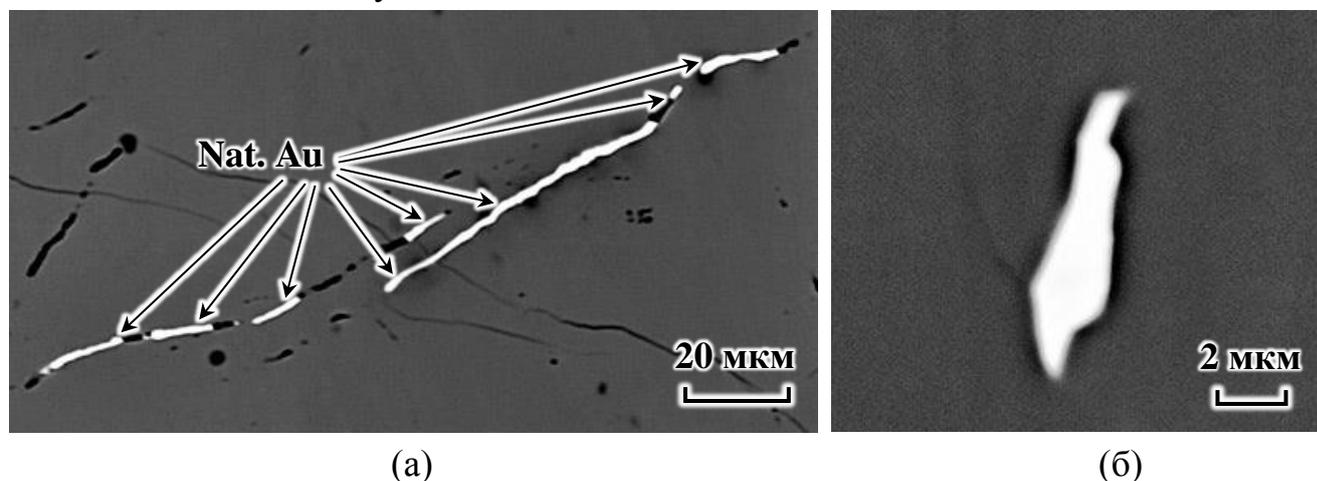


**Рисунок 12.** Тренды содержаний, полученные при проведении РСМА торцевой части слоя золота в пирите

Предлагаемый способ определения содержаний основных компонентов (Au, Ag) включений основан на экстраполяции зависимости между содержаниями элемента включения и элемента матрицы в область, где содержание элемента матрицы стремится к нулю.

В главе 4 представлены результаты РСМА тонкодисперсных включений золота с использованием разработанного способа. В качестве объектов анализа использовали минералы (в основном арсенопирит) Наталкинского золоторудного месторождения, которое расположено в Магаданской области и является одним из крупнейших в России.

В первом разделе дана характеристика объектов анализа и описаны процедуры подготовки образцов. Зёрна арсенопирита (Asp) с включениями самородного золота (Native Au) отобраны из руд на центральном участке месторождения Наталкинское. Примеры тонкодисперсных включений самородного золота приведены на рисунке 13. Поперечный размер нитевидных включений почти всюду около 1 мкм и менее.



**Рисунок 13.** Самородное золото (Nat. Au) в арсенопирите (изображение в режиме BSE): (а) нитевидные вкрапления в трещинах; (б) единичное включение

Образцы для анализа готовили в виде полированных шайб с запрессованными в них с помощью эпоксидной смолы минеральными зёрнами и аншлифов из цельных кусков породы. На поверхность образцов в вакууме на установке QR150R ES (Quarum Technologies Ltd., Великобритания) напыляли проводящий слой углерода толщиной около 20 нм.

Во втором разделе описана аппаратура, условия измерения и образцы сравнения, которые были использованы при проведении РСМА. Исследования выполняли с использованием микроаналитического комплекса Superprobe JXA-8200 (Jeol Ltd., Япония) на кристалл-дифракционных спектрометрах с волновой дисперсией (ВДС) для количественных измерений и энергодисперсионном спектрометре (ЭДС) EX-84055MU (Jeol Ltd., Япония) для поиска и диагностики состава включений.

В третьем разделе приведены результаты РСМА для четырёх минералов с тонкодисперсным золотом. РСМА крупных включений золота размером более 3 мкм показал, что пробность золота в отобранных зёрнах составляет 750–800%. На рисунках 14–15 приведены тренды содержаний элементов Au и Ag по измерениям вдоль трещины на рисунке 13а. Коэффициенты детерминации для трендов  $S \rightarrow Au$  составляют 0.96–0.98, а для других трендов 0.99. Несколько более высокая погрешность определения серы связана с погрешностью измерения и возможной неопределённостью матричной коррекции для длинноволнового излучения S  $K\alpha$ .

Оценки содержания золота и серебра в арсенипирите путём экстраполяции трендов в область нулевых содержаний элементов матрицы суммированы в таблице 4. Далее для трендов после знака « $\pm$ » приведена величина остаточного стандартного отклонения линейной регрессии  $(S_0)_{\text{trend}}$ , а для процедуры «нормировки» величина  $(S_0)_{\text{norm}}$ , которая характеризует близость друг другу нормированных значений для серии измерений в разных локальных областях включения в диапазоне содержаний Au и Ag.

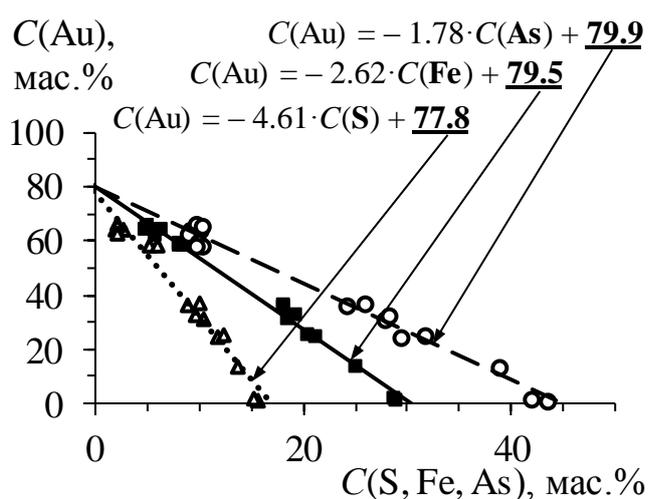


Рисунок 14. Тренды содержаний  $As \rightarrow Au$ ,  $Fe \rightarrow Au$  и  $S \rightarrow Au$  (оценка по Au  $L\alpha$ -линии)

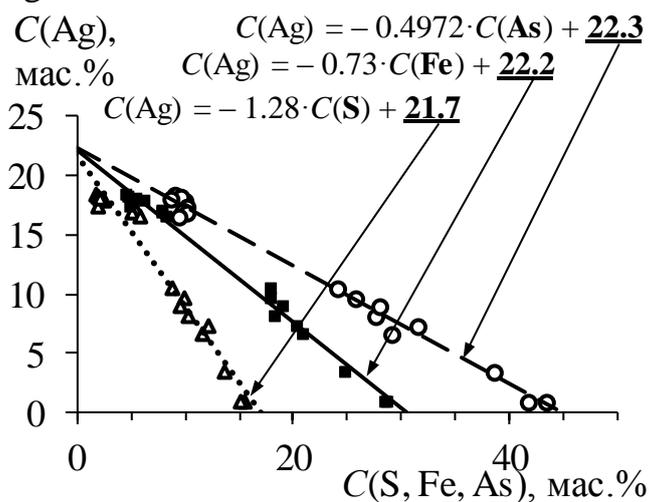


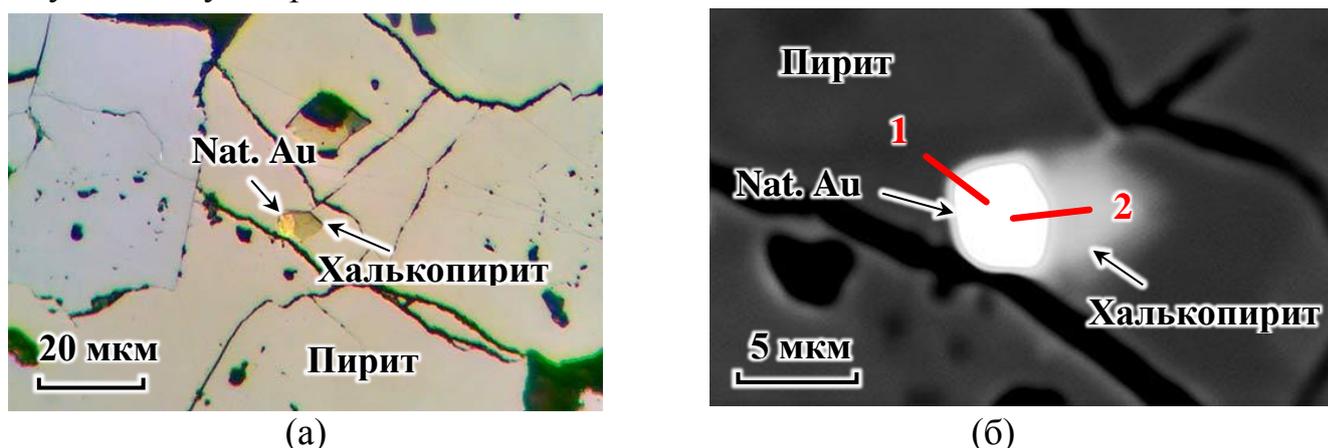
Рисунок 15. Тренды содержаний  $As \rightarrow Ag$ ,  $Fe \rightarrow Ag$  и  $S \rightarrow Ag$  (оценка по Au  $L\alpha$ -линии)

**Таблица 4.** Результаты оценки состава тонкодисперсного самородного золота в арсенопирите по трендам содержаний

Линия золота	Au, мас. %			Ag, мас. %		
	S $\rightarrow$ Au	Fe $\rightarrow$ Au	As $\rightarrow$ Au	S $\rightarrow$ Ag	Fe $\rightarrow$ Ag	As $\rightarrow$ Ag
Au L $\alpha$	77.8 $\pm$ 2.2	79.5 $\pm$ 1.1	79.9 $\pm$ 1.4	21.7 $\pm$ 0.6	22.2 $\pm$ 0.3	22.3 $\pm$ 0.3
	«Нормировка»: 76.6 $\pm$ 5.1			«Нормировка»: 23.4 $\pm$ 5.1		
Au M $\alpha$	79.1 $\pm$ 1.8	80.2 $\pm$ 1.4	80.1 $\pm$ 1.3	21.8 $\pm$ 0.4	22.1 $\pm$ 0.5	22.0 $\pm$ 0.4
	«Нормировка»: 82.2 $\pm$ 6.4			«Нормировка»: 17.8 $\pm$ 6.4		

По данным таблицы 4 определённое с помощью трендов содержание Au в арсенопирите составляет 79–80 мас. % и  $(S_0)_{\text{trend}} \lesssim 2$  мас. %, а содержание Ag 21–22 мас. % и  $(S_0)_{\text{trend}} < 1$  мас. %. Результаты прямых измерений, для обработки которых применялась только ZAF-коррекция, показали, что максимальное обнаруженное содержание золота составляет 70 мас. %, а серебра 18 мас. %. Эти значения значительно меньше, чем содержания, полученные с помощью трендов. Исключение элементов матрицы и «нормировка» содержаний на 100% приводит оценкам, которые более чем на 5 мас. % отличаются для измерений по Au L $\alpha$ - и Au M $\alpha$ -линии, при этом  $(S_0)_{\text{norm}} > 5$  мас. %. Определение содержания Au и Ag во включении с помощью построенных трендов приводит к более достоверной оценке с меньшей неопределённостью.

В рудах Наталкинского месторождения тонкодисперсное золото ассоциирует также с пиритом и халькопиритом. На рисунке 16 приведён пример включения золота, расположенного на грани халькопирита, находящегося в пирите. Для построения трендов содержаний и оценки состава включений проводили измерения с помощью спектрометров с волновой дисперсией. На рисунке 16 измерения проводили вдоль красных линий: вдоль линии 1 измерения для трендов в пирите, а вдоль линии 2 – измерения для трендов в халькопирите. Результаты суммированы в таблице 5.



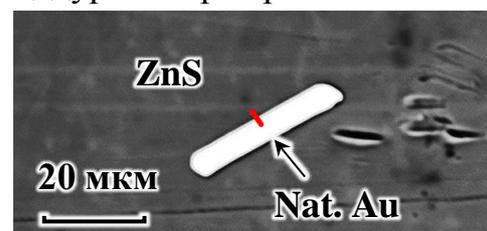
**Рисунок 16.** Изображения включения самородного золота (Nat. Au) в окружении двух минералов: халькопирита и пирита: (а) под оптическим микроскопом; (б) в режиме BSE. Измерения для построения трендов 1 и 2 проводили вдоль красных линий

**Таблица 5.** Результаты оценки состава тонкодисперсного самородного золота в халькопирите и пирите по трендам содержаний

Тренд	Au, мас. %			Ag, мас. %		
	S→Au	Fe→Au	Cu→Au	S→Ag	Fe→Ag	Cu→Ag
1. Пирит	67.5±0.5	67.6±0.9	—	32.7±0.4	33.0±0.6	—
	«Нормировка»: 65.8±9.3			«Нормировка»: 34.2±9.3		
2. Халькопирит	68.3±1.3	69.5±0.4	67.5±0.9	32.7±0.5	33.3±0.5	32.3±0.4
	«Нормировка»: 67.9±7.5			«Нормировка»: 32.2±7.5		

Из таблицы 5 видно, что по трендам в пирите содержание золота составляет 68 мас. %, а серебра 33 мас. %; по трендам в халькопирите содержание золота 68–70 мас. %, а серебра 32–33 мас. %. Для всех трендов стандартное отклонение оценки содержания  $(S_0)_{\text{trend}} \leq 1$  мас. % и коэффициент детерминации 0.99. Результаты прямых измерений, для обработки которых применялась только ZAF-коррекция, показали, что максимальное обнаруженное в образце содержание золота составляет 68 мас. %, а серебра 31 мас. %. Исключение элементов матрицы и «нормировка» содержаний на 100 % для набора данных, по которым построены тренды 1 и 2 вдоль линий на рисунке 16б, приводят к правильной оценке содержания при построении трендов для Au в халькопирите, однако для случая Au в пирите «нормировка» приводит заниженному результату. Об этом свидетельствуют результаты определения состава массивных включений, находящихся в этом же зерне минерала, содержание золота в которых составляет 68 мас. %, в то время как «нормировка» для набора измерений вдоль линии 1 для тонкодисперсного включения приводит к значению 66 мас. %. Определение содержания Au и Ag по трендам приводит к оценке, неопределённость которой может быть в 2–17 раз ниже, чем при проведении процедуры «нормировки».

С использованием разработанного способа было исследовано зерно сфалерита с необычным крупным включением самородного золота (рисунок 17). РСМА в нескольких точках по центру включения показал следующие содержания: Au 80–85 мас. %, Ag 17–18 мас. %, S около 2 мас. % и Zn 4–5 мас. %, однако Zn  $L\alpha$ -линия в ЭДС-спектре не наблюдается. Учитывая то, что цинк редко встречается в природном золоте в качестве примеси, можно предположить, что включение представляет собой тонкую пластину. В этом случае генерация рентгеновского излучения может происходить под этой пластиной в матрице и это обстоятельство не позволяет определить достоверный состав включения. Построение тренда Au→Zn приводит к значению содержания Au  $89.3 \pm 0.9$  мас. % (коэффициент детерминации тренда 0.99). «Нормировка» содержаний Au и Ag на 100 % с последующим исключением элементов матрицы приводит к значению содержания Au  $81.3 \pm 5.7$  мас. %. С учётом того, что массивные включения в других зёрнах сульфидных минералов из этой же выборки проб в основном были



**Рисунок 17.** Изображение пластины самородного золота (Nat. Au) в матрице сфалерита (ZnS) в режиме BSE

представлены высокопробным самородным золотом 850–900‰, очевидно, что оценка состава с помощью тренда  $Au \rightarrow Zn$  позволяет повысить точность определения содержания золота на 5–9 мас. % по сравнению с прямым измерением содержаний без учёта влияния матрицы или с использованием процедуры «нормировки» содержаний.

Таким образом, использование трендов позволяет оценить состав включений, размер которых меньше, чем размер области генерации рентгеновского излучения в образце, причём не только в продольном направлении (по поверхности образца), но и в поперечном направлении (по глубине). Как было показано, с виду массивное включение на изображении в режиме BSE в реальности может оказаться тонкодисперсным из-за малого поперечного размера. При интерпретации результатов РСМА не всегда удаётся установить: является ли элемент примесным во включении или происходит так называемый «захват» элемента матрицы вследствие малой толщины включения. Поскольку для каждого типа рудной формации перечень возможных элементов-примесей в самородном золоте, как правило, хорошо известен, задача определения пробности тонкодисперсного золота в большинстве случаев может быть решена путём построения трендов содержаний.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Предложена модификация Монте-Карло модели Лава, Кокса и Скотта, позволяющая проводить расчёт интенсивности аналитического сигнала во включениях, находящихся в гомогенных матрицах. Получены аппроксимирующие выражения, позволяющие оценить локальность РСМА для элементов, представляющих интерес при изучении минералов золоторудных месторождений.

По результатам проведённых исследований разработан способ определения содержаний основных компонентов (Au, Ag) тонкодисперсных включений самородного золота микронных и субмикронных размеров в матрице сульфидных минералов для тех случаев, когда размер включений сопоставим или меньше размера области генерации рентгеновского излучения в образце (менее 3 мкм), характеризующей пространственное разрешение метода РСМА. Способ обоснован посредством моделирования процессов взаимодействия электронов с веществом методом Монте-Карло. Экспериментальная проверка способа выполнена на специально подготовленном образце пирита с напылённым слоем чистого золота. Апробация способа проведена на примере анализа природных минералов с тонкодисперсным золотом из руд месторождения Наталкинское, являющегося одним из крупнейших в России. На основе результатов моделирования и экспериментальных данных разработаны практические рекомендации по использованию предложенного способа для определения пробности тонкодисперсного самородного золота.

## ВЫВОДЫ

1. Разработан способ оценки содержаний основных компонентов (Au, Ag) тонкодисперсного золота в матрице пирита для тех случаев, когда размер включений сопоставим или меньше, чем размер области генерации рентгеновского излучения (0.5–3 мкм). Способ основан на экстраполяции зависимости между интенсивностями аналитического сигнала элемента включения и элемента матрицы в область, где интенсивность аналитического сигнала элемента матрицы стремится к нулю.

2. Обоснование способа выполнено на основе результатов моделирования процессов взаимодействия электронов с веществом методом Монте-Карло с использованием 2D- и 3D-модели. Показано, что 2D-модель, которая значительно проще в реализации по сравнению с 3D-моделью, может быть использована для описания зависимости интенсивности аналитического сигнала от размера включений в сульфидной матрице для аналитических линий с энергией более 3 кэВ.

3. Предложены аппроксимирующие выражения для оценки локальности электронно-зондового микроанализа в зависимости от атомного номера для элементов, представляющих интерес при изучении сульфидных минералов золоторудных месторождений. Полученные выражения позволяют оценить пространственное разрешение для элементов, определяемых по аналитическим линиям *K*-серии (с атомным номером в диапазоне от 11 до 34), и некоторых элементов, определяемых по аналитическим линиям *L*-серии (с атомным номером в диапазонах от 44 до 50 и от 74 до 82).

4. Проверка предложенного способа на специально подготовленном искусственном образце пирита с напылённым слоем чистого золота шириной около 1 мкм показала, что содержание золота в искусственном образце составляет  $98 \pm 2$  мас. % и это соответствует известному составу напылённого слоя. Установлено, что содержание золота, определённое без использования предложенного способа, систематически занижено по сравнению с истинным содержанием, соответствующим чистому золоту, и достигает максимального значения 76 мас. %, что существенно меньше, чем в чистом золоте.

5. Выявлено, что оценка погрешности определения состава тонкодисперсного золота с помощью разработанного способа меньше в 2–17 раз, чем при использовании процедуры «нормировки», предполагающей исключение из результатов РСМА элементов матрицы и нормирование содержаний элементов включения на 100 %.

6. Разработанный способ продемонстрирован на примере определения пробности природного тонкодисперсного золота в арсенопирите, пирите, халькопирите и сфалерите. Способ позволил оценить содержание золота в диапазоне содержаний от 65 до 90 мас. % с точностью от 0.4 до 2.2 мас. %, а также содержание серебра в диапазоне содержаний от 10 до 35 мас. % с точностью от 0.3 до 0.6 мас. %. Величина погрешности сопоставима с таковой для массивных образцов самородного золота.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в изданиях из списка ВАК и приравненные к ним

1. **Татаринов В.В.**, Кузаков А.С. Оценка характеристик возбуждения рентгеновского излучения под воздействием электронного зонда при 2D- и 3D-моделировании методом Монте-Карло // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед., № 3, 2020. С. 37–45. DOI 10.31857/S102809602003019X

**Tatarinov V.V.**, Kuzakov A.S. Evaluation of the characteristics of the excitation of X-ray radiation under the effects of an electron probe using 2D and 3D modeling by the Monte Carlo method // J. Surf. Invest.: X-Ray Synchrotron Neutron Tech., Vol. 14, No. 2, 2020. pp. 245–252. DOI 10.1134/S1027451020020366

2. Makshakov A.S., Kravtsova R.G., **Tatarinov V.V.** Lithochemical Stream Sediments of the Dukat Gold–Silver Ore-Forming System (North–East of Russia) // Minerals, Vol. 9, No. 12, 2019. 789. DOI 10.3390/min9120789

3. **Татаринов В.В.**, Кузаков А.С., Финкельштейн А.Л. Свид. о гос. регистрации прЭВМ 2019614428 РФ: Программа для моделирования процессов взаимодействия электронов с веществом «Герон» / ИГХ СО РАН (RU). № 2019612941; заявл. 22.03.2019; опубл. 04.04.2019, Бюл. № 4. 1 с. URL: [http://www1.fips.ru/wps/PA\\_FipsPub/res/Doc/PrEVM/RUNWPR/000/002/019/614/428/2019614428-00001/DOCUMENT.PDF](http://www1.fips.ru/wps/PA_FipsPub/res/Doc/PrEVM/RUNWPR/000/002/019/614/428/2019614428-00001/DOCUMENT.PDF)

4. Finkelshtein A.L., **Tatarinov V.V.**, Finkelstein E.A., Pavlova L.A., Kravtsova R.G. About the assessment of gold concentrations in tiny inclusions within sulfide mineral matrix: An electron microprobe study // X-Ray Spectrom., Vol. 47, No. 6, 2018. pp. 423–431. DOI 10.1002/xrs.2967

5. **Татаринов В.В.**, Финкельштейн А.Л., Кравцова Р.Г., Павлова Л.А. Определение состава микровключений самородного золота в матрице сульфидного минерала при рентгеноспектральном электронно-зондовом микроанализе // Аналитика и контроль, Т. 21, № 4, 2017. С. 208–215. DOI 10.15826/analitika.2017.21.3.006

### Другие публикации

6. **Татаринов В.В.**, Финкельштейн Е.А., Макшаков А.С. Электронно-зондовый микроанализ тонкодисперсного золота в однородной матрице сульфидного минерала // Вопросы естествознания, № 4/18, 2018. С. 75–79.

7. Татаринов В.В., Макшаков А.С. Особенности калибровки модели Монте-Карло в приближении непрерывного замедления для расчёта траекторий электронов // XXVIII Российская конф. по электрон. микроскопии «Современные методы электрон., зондовой микроскопии и комплементарных методов исслед. наноструктур и наноматериалов», Черногловка, 7–10 сен. 2020: Сб. тезисов. М. 2020. Т. 3. С. 220–221. DOI 10.37795/RCEM.2020.20.31.045

8. **Татаринов В.В.**, Кузаков А.С., Макшаков А.С. Сопоставление результатов 2D- и 3D-моделирования для оценки характеристик возбуждения рентгеновского излучения под воздействием электронного зонда // Конф. с междунар. участием «Электронно-лучевые технологии» КЭЛТ-2019, Черногловка, 30 сен. – 3 окт. 2019: Тез. докл. Черногловка. 2019. С. 88.

9. **Татаринов В.В.**, Кузаков А.С., Макшаков А.С. Оценка пространственного разрешения рентгеноспектрального микроанализа с электронным зондом при определении элементов по линиям К- и L-серий // Конф. с междунар. участием «Электронно-лучевые технологии» КЭЛТ-2019, Черногловка, 30 сен. – 3 окт. 2019: Тез. докл. Черногловка. 2019. С. 89.

10. **Татаринов В.В.**, Кузаков А.С. Сравнение 2D- и 3D-модели Монте-Карло для построения функции распределения рентгеновского излучения в образце // III Всероссийская конф. по аналитической спектроскопии с междунар. участием, 29 сен. – 5 окт. 2019: Материалы конф. Краснодар. 2019. С. 147.

11. **Татаринов В.В.** Оценка локальности рентгеноспектрального электронно-зондового микроанализа при определении состава тонкодисперсных включений самородного золота в гомогенной сульфидной матрице // Двадцатая междунар. конф. «Физ.-хим. и петрофиз. исслед. в науках о Земле», Москва, 23–25, Борок, 27 сен. 2019: Материалы конф. М. 2019. С. 324–327.

12. **Tatarinov V.V.**, Finkelshtein A.L., Finkelstein E.A. Monte Carlo simulation of electron tracks for assessment of dependence X-ray generation on size of inclusion // The 5<sup>th</sup> International Conference on X-Ray Analysis, Ulaanbaatar, Mongolia, 12–14 September 2018: Book of abstracts. Ulaanbaatar. 2018. P. 48.

13. **Татаринов В.В.**, Финкельштейн А.Л., Павлова Л.А. Способ определения пробности тонкодисперсного золота в сульфидных минералах методом РСМА // XXVII Российская конф. по электрон. микроскопии «Современные методы электрон. и зондовой микроскопии в исслед. органических, неорганических наноструктур и нанобиоматериалов», Черногловка, 28–30 авг. 2018: Сб. тезисов. Черногловка. 2018. С. 207–208.

14. **Tatarinov V.V.**, Finkelshtein A.L. Method for estimating the basic composition of fine-dispersed inclusions of native gold in a matrix of a sulfide mineral by electron microprobe // Geoanalysis 2018, 10<sup>th</sup> International Conference on the Analysis of Geological and Environmental Materials, Sydney, Australia, 8–13 July 2018: Abstracts. Sydney: Macquarie University 2018. P. 66. URL: [http://ccfs.mq.edu.au/Geoanalysis2018/img/Geoanalysis2018Program & Abs.pdf](http://ccfs.mq.edu.au/Geoanalysis2018/img/Geoanalysis2018Program&Abs.pdf)

15. **Tatarinov V.V.** Monte Carlo simulation of electron tracks for assessment of dependence x-ray generation on size of inclusion // European Conference on X-Ray Spectrometry – EXRS-2018, Ljubljana, Slovenia, 24–29 June 2018: Book of abstracts. Ljubljana. 2018. P. 63.

16. **Татаринов В.В.** Способ оценки основного состава тонкодисперсных включений самородного золота в сульфидных минералах при рентгеноспектральном электронно-зондовом микроанализе // Материалы Юбилейного съезда Российского минералогического общества «200 лет РМО», СПбГУ Горный университет, 10–13 окт. 2017. СПб. 2017. Т. 1. С. 419–420. URL: <http://www.minsoc.ru/viewreports.php?id=6&cid=1633&rid=2395>

17. **Татаринов В.В.**, Финкельштейн А.Л. Моделирование процессов взаимодействия электронов с мишенью при РСМА тонкодисперсного золота в рудных минералах методом Монте-Карло // 2-й Междунар. форум «Техноюнити – Электронно-лучевые технологии для микроэлектроники», Москва, Зеленоград, 9–12 окт. 2017: Тез. докл. Черногловка. 2017. С. 116.

18. **Татаринов В.В.**, Финкельштейн А.Л. Двумерная модель Монте-Карло для оценки влияния матричных эффектов при РСМА золотосодержащих включений // Тез. докл. Третьего съезда аналитиков России, Москва, 8–13 окт. 2017. М. 2017. С. 279.

19. **Татаринов В.В.**, Финкельштейн А.Л., Павлова Л.А., Кравцова Р.Г. Определение пробности тонкодисперсного самородного золота в матрице арсенопирита методом рентгеноспектрального электронно-зондового микроанализа // Современные направления развития геохимии: Материалы Всероссийской конф. с междунар. участием, посвящённой 60-летию Института геохимии СО РАН и 100-летию со дня рождения акад. Л.В. Таусона, Иркутск, 18–23 сен. 2017. Иркутск. 2017. С. 187.

20. **Татаринов В.В.**, Макшаков А.С. Изучение состава арсенопирита Наталкинского золоторудного месторождения методом рентгеноспектрального электронно-зондового микроанализа // Проблемы геологии и освоения недр: тр. XXI Междунар. симп. им. акад. М.А. Усова студентов и молодых учёных, посвящённого 130-летию со дня рождения проф. М.И. Кучина, Томск, 3–7 апр. 2017. Томск. 2017. Т. 1. С. 129–130.

21. Павлова Л.А., **Татаринов В.В.** Особенности РСМА и РЭМ при поиске и изучении состава минералов, содержащих редкие и благородные металлы в рудах разного типа // XXVI конф. по электрон. микроскопии и 4-я Шк. молодых учен. «Современные методы электрон. и зондовой микроскопии в исслед. наноструктур и наноматериалов»: Тез. докл., Зеленоград, 30 мая – 3 июня. 2016. С. 624–625.