

Соискатель: **ТАТАРИНОВ ВАСИЛИЙ ВАДИМОВИЧ**

Тема диссертационной работы: **«ЭЛЕКТРОННО-ЗОНДОВЫЙ МИКРОАНАЛИЗ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ ЗОЛОТА В СУЛЬФИДНЫХ МИНЕРАЛАХ»**

Шифр и наименование научной специальности и отрасли науки, по которым выполнена диссертация:

**02.00.02 – АНАЛИТИЧЕСКАЯ ХИМИЯ; ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ**

На заседании **29 ИЮЛЯ 2021 ГОДА** ДИССЕРТАЦИОННЫЙ СОВЕТ **24.1.195.01** (Д 002.109.01) на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Ордена Ленина и Ордена Октябрьской Революции Института геохимии и аналитической химии им. В.И.Вернадского Российской академии наук **ПРИНЯЛ РЕШЕНИЕ ПРИСУДИТЬ ТАТАРИНОВУ ВАСИЛИЮ ВАДИМОВИЧУ** УЧЕНУЮ СТЕПЕНЬ **КАНДИДАТА ХИМИЧЕСКИХ НАУК** ПО СПЕЦИАЛЬНОСТИ **02.00.02 АНАЛИТИЧЕСКАЯ ХИМИЯ.**

На заседании из **29** человек, входящих в состав диссертационного совета, присутствовали **23** человека (**12** человек присутствовали очно, **11** – в удаленном интерактивном режиме), из них **16** докторов наук по специальности аналитическая химия, в том числе **6** докторов, обеспечивающих химические науки. Результаты открытого голосования: за – **23**, против – **0**, не голосовало – **0** (**Протокол № 8 от 29.07.2021**).

## ЯВОЧНЫЙ ЛИСТ

членов диссертационного совета 24.1.195.01 (Д 002.109.01)

к заседанию совета 29 июля 2021 г по защите диссертации **Татаринова Василия Вадимовича** по специальности **02.00.02** – аналитическая химия; протокол № 8

	Фамилия И. О.	Ученая степень, шифр специальности и отрасль науки в совете	Явка на заседание (подпись)	Получение бюллетеня (подпись)
1	Мясоедов Борис Федорович (председатель совета)	Доктор химических наук, академик РАН, профессор 02.00.14 (химические науки)		
2	Колотов Владимир Пантелеймонович (зам. председателя)	Доктор химических наук, член-корреспондент РАН, 02.00.14 (химические науки)		
3	Спиваков Борис Яковлевич (зам. председателя)	Доктор химических наук, член-корреспондент РАН, 02.00.14 (химические науки)		
4	Захарченко Елена Александровна (ученый секретарь)	Кандидат химических наук, 02.00.14 (химические науки)		
5	Баранов Виктор Иванович	Доктор физ.-мат. наук, профессор, 02.00.02 (физ.-мат. науки)		
6	Большов Михаил Александрович	Доктор физ.-мат. наук, профессор, 02.00.02 (физ.-мат. науки)		
7	Гречников Александр Анатольевич	Доктор химических наук, 02.00.02 (технические науки)	<i>удалённо интерактивно</i>	
8	Грибов Лев Александрович	Доктор физ.-мат. наук, член-корреспондент РАН, 02.00.02 (физ.-мат. науки)		
9	Дементьев Василий Александрович	Доктор физ.-мат. наук, профессор, 02.00.02 (физ.-мат. науки)		
10	Долгонос Анатолій Михайлович	Доктор химических наук, профессор, 02.00.02 (физ.-мат. науки)		
11	Ермаков Вадим Викторович	Доктор биологических наук, профессор, 02.00.02 (химические науки)	<i>удалённо интерактивно</i>	
12	Зуев Борис Константинович	Доктор технических наук, профессор, 02.00.02 (технические науки)		
13	Ищенко Анатолий Александрович	Доктор химических наук, профессор, 02.00.02 (технические науки)	<i>удалённо интерактивно</i>	



14	Калмыков Степан Николаевич	Доктор химических наук, член-корреспондент РАН, 02.00.14 (химические науки)	удалённо интерактивно	
15	Карпов Юрий Александрович	Доктор химических наук, академик РАН, 02.00.02 (технические науки)		
16	Коробова Елена Михайловна	Доктор геолого- минералогических наук, 02.00.14 (химические науки)	удалённо интерактивно	
17	Кубракова Ирина Витальевна	Доктор химических наук, 02.00.02 (химические науки)	<i>Ирина</i>	
18	Куляко Юрий Михайлович	Доктор химических наук, 02.00.14 (химические науки)	удалённо интерактивно	
19	Марютина Татьяна Анатольевна	Доктор химических наук, 02.00.02 (технические науки)	<i>Татьяна</i>	
20	Моисеенко Татьяна Ивановна	Доктор биологических наук, член-корреспондент РАН, 02.00.02 (химические науки)	<i>Татьяна</i>	
21	Новиков Александр Павлович	Доктор химических наук, 02.00.14 (химические науки)	удалённо интерактивно	
22	Ревельский Александр Игоревич	Доктор химических наук, 02.00.02 (химические науки)		
23	Севастьянов Вячеслав Сергеевич	Доктор технических наук, 02.00.02 (технические науки)	<i>Вячеслав</i>	
24	Тимербаев Андрей Роландович	Доктор химических наук, 02.00.02 (химические науки)	удалённо интерактивно	
25	Федотов Петр Сергеевич	Доктор химических наук, 02.00.02 (химические науки)	<i>Петр</i>	
26	Филиппов Михаил Николаевич	Доктор физ.-мат. наук, профессор, 02.00.02 (физ.-мат. науки)	<i>Михаил</i>	
27	Хамизов Руслан Хажсетович	Доктор химических наук, 02.00.02 (физ.-мат. науки)	удалённо интерактивно	
28	Шеховцова Татьяна Николаевна	Доктор химических наук, профессор, 02.00.02 (химические науки)	удалённо интерактивно	
29	Шкинев Валерий Михайлович	Доктор химических наук, 02.00.02 (технические науки)	удалённо интерактивно	

Ученый секретарь  
диссертационного совета

*Е.А. Захарченко* Захарченко Елена Александровна

Подпись руки *Елены Александровны Захарченко*  
удостоверяю *Е.А. Захарченко*  
зам. канцелярии ГЕОХИ РАН



**ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.195.01,**  
созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Ордена Ленина и Ордена Октябрьской Революции Института геохимии и  
аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук  
по диссертации на соискание ученой степени кандидата наук

аттестационное дело № \_\_\_\_\_  
решение диссертационного совета от 29.07.2021 № 8

О присуждении **Татаринovu Василию Вадимовичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата химических наук.

Диссертация «**Электронно-зондовый микроанализ тонкодисперсных включений золота в сульфидных минералах**» по специальности 02.00.02 – аналитическая химия принята к защите 15 апреля 2021 года (протокол заседания № 3) диссертационным советом Д 002.109.01 (новый шифр 24.1.195.01), созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Ордена Ленина и Ордена Октябрьской Революции Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук (ГЕОХИ РАН); 119991, ГСП-1, Москва, ул. Косыгина, 19; приказ о создании совета № 75/нк от 15.02.2013.

Соискатель **Татаринov Василий Вадимович**, 1994 года рождения, в 2015 году окончил Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» по специальности 210602 «Наноматериалы». В 2019 году окончил очную аспирантуру Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук по направлению подготовки 04.06.01 «Химические науки». Работает младшим научным сотрудником лаборатории рентгеновских методов анализа в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук (ИГХ СО РАН).

Диссертация выполнена в лаборатории рентгеновских методов анализа Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук (ИГХ СО РАН).

Научный руководитель – доктор технических наук **Финкельштейн Александр Львович**, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук (ИГХ СО РАН): главный научный сотрудник, заведующий лабораторией рентгеновских методов анализа.

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» (МГУ): доцент кафедры аналитической химии

дали положительные отзывы на диссертацию.

**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) в своём положительном отзыве, подписанном ведущим научным сотрудником лаборатории рентгеноспектральных методов анализа, доктором технических наук Лаврентьевым Юрием Григорьевичем, и утверждённом и.о. директора ИГМ СО РАН, доктором геолого-минералогических наук Реутским Вадимом Николаевичем, указала на то, что исследования диссертанта являются **актуальными**, открывают новые возможности количественного анализа микронных включений на примере анализа тонкодисперсного золота и могут быть распространены на другие объекты подобного рода.

В качестве **научной новизны** выделены следующие аспекты проведённого диссертационного исследования:

- разработана модификация квазиодномерной модели Монте-Карло, которая позволяет учитывать влияние размера и состава тонкодисперсных включений золота в гомогенных матрицах на интенсивность аналитического сигнала;
- предложены аналитические выражения, которые позволяют оценить пространственное разрешение (локальность) метода рентгеноспектрального электронно-зондового микроанализа (РСМА) в зависимости от атомного номера для элементов, представляющих интерес при изучении минералов золоторудных месторождений;
- разработан способ РСМА, позволяющий проводить оценку состава основных компонентов (Au, Ag) тонкодисперсных включений самородного золота в сульфидных минералах в тех случаях, когда размер включений сопоставим или меньше размера области генерации рентгеновского излучения в образце;
- с помощью предложенного способа определён состав тонкодисперсного золота в рудах Наталкинского золоторудного месторождения и состав тонкодисперсного электрума в аллювиальных отложениях на площади месторождения Дукат.

Отмечено, что разработанный способ РСМА успешно используется при изучении руд Наталкинского месторождения на микроанализаторе Superprobe JXA-8200 (Jeol ltd) в лаборатории рентгеновских методов анализа Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, что свидетельствует о **практической значимости** диссертационной работы. Способ может быть внедрён в практику других лабораторий, специализирующихся на изучении золотосодержащего сырья с использованием электронной микроскопии и РСМА.



Соискатель имеет 31 опубликованную работу, в том числе по теме диссертации 21 работа, из которых 5 статей опубликованы в рецензируемых научных изданиях.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

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. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, № 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 // Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 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. 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 Spectrometry, Vol. 47, No. 6, 2018. pp. 423–431. DOI 10.1002/xrs.2967

4. **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

5. **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.

На имя соискателя выдано 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ:

6. **Татаринов В.В.**, Кузаков А.С., Финкельштейн А.Л. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2019614428 Российская Федерация: Программа для моделирования процессов взаимодействия электронов с веществом «Герон» / заявитель и правообладатель 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)

В работах представлены результаты разработки способа оценки содержаний основных компонентов (Au, Ag) тонкодисперсных включений золота в сульфидных минералах методом рентгеноспектрального электронно-зондового микроанализа (РСМА), в том числе результаты моделирования процессов взаимодействия электронов с веществом методом Монте-Карло, а также аппроксимирующие выражения для оценки локальности РСМА; результаты определения состава тонкодисперсного самородного золота в минералах месторождения Наталкинское и в аллювиальных отложениях Дукатской золото-серебряной рудообразующей системы. Недостоверные сведения об



опубликованных соискателем учёной степени работах в диссертации отсутствуют. Требования к публикациям (п. 13 и п. 14 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утверждённого Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842), введённые в редакции Постановления Правительства РФ № 335 от 21.04.2016 г., выполнены полностью. Наиболее значимые научные работы по теме диссертации входят в российские и международные базы данных, а также в перечень изданий ВАК при Минобрнауки России, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертационных исследований, в том числе по специальности 02.00.02 – аналитическая химия.

На диссертацию и автореферат поступило 10 отзывов. Все отзывы положительные. Положительных отзывов без замечаний – 3. Отзывы поступили от:

**Канакина Сергея Васильевича**, к.г.-м.н., заведующего лабораторией инструментальных методов анализа ФГБУН Геологический институт СО РАН;

**Савиновой Юлии Александровны**, к.т.н., с.н.с. лаборатории пирометаллургии ООО «Институт Гипроникель»;

**Широковой Екатерины Васильевны**, к.ф.-м.н., доцента кафедры «Бизнес-информатика и информационные технологии» Калужского филиала Финансового университета при Правительстве РФ;

Положительных отзывов с вопросами и замечаниями – 7. Отзывы поступили от:

**Соцкой Ольги Тарасовны**, к.г.-м.н., н.с. лаборатории петрологии, изотопной геохронологии и рудообразования ФГБУН Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А.Шило ДВО РАН;

- Из текста автореферата на совсем понятно, насколько трудоёмкий данный метод: сколько времени потребуется на выполнение количественного анализа для одного включения самородного золота и сколько расчётов и измерений необходимо при этом провести?
- Возможно ли этот метод использовать в лабораториях других институтов и что для этого необходимо сделать?

**Портного Александра Юрьевича**, д.ф.-м.н., доцента кафедры «Физика, механика и приборостроение» ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения»;

- По большому счёту, размазывание изображения в L спектре золота считается следствием изменения траекторий электронов зонда при анализе, при этом набор процессов типа флуоресценции элементов матрицы – радиационного переноса – флуоресценции золота игнорируется. Хотелось бы понять, какие изменения будут в пространственном изображении при добавлении рассмотрения подобных процессов 2 порядка, и оценить порядок возможных изменений в интенсивность измерительного сигнала.
- На рисунках типа рисунок 8 автореферата отсутствует шкала по яркости или цвету, по которым можно оценить численное изменение интенсивности.

- В разделе 4 главы 3 рассматривается создание некоторого стандартного образца. Не совсем понятно, каким образом проводилась аттестация образца с точки зрения измерения толщины золотого слоя (0,5-1,5 мкм), и возможна ли она в этом диапазоне толщин при доступных уровнях обработки поверхности.
- Возможно ли увеличение пространственного разрешения в режиме обратнорассеянных электронов просто при уменьшении энергии электронов в пучке? Моделировался ли отклик для случая регистрации в обратнорассеянных электронах? Возможно ли для дополнительного разрешения использовать информацию, полученную при совмещении изображений в рентгеновских лучах и обратнорассеянных электронах?

**Сенина Валерия Георгиевича**, к.х.н., с.н.с. лаборатории методов исследования и анализа вещества и материалов ГЕОХИ РАН;

- В таблице 3 действительно расстояния измеряются в нанометрах?
- По таблице 4 и 5. Как определялись стандартные отклонения при определении состава тонкодисперсного золота?
- В образцах природного золота как правило присутствуют примеси меди, палладия, платины, висмута. Применим ли используемый в работе способ для определения примесных элементов?

**Моногаровой Оксаны Викторовны**, к.х.н. доцента кафедры аналитической химии химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, **Гармая Андрея Владимировича**, к.х.н., м.н.с. химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова;

- Из приведенных на рисунке 1 функций распределения рентгеновского излучения по глубине образца следует, что для линии AuL $\alpha$  фактор поглощения при расчете по 2D-модели должен быть выше по сравнению с фактором, рассчитанным по 3D-модели, что не согласуется с данными таблицы 1 и последующим текстом. Не может ли здесь быть опечатки?
- В описании раздела 2 главы 3 приведены результаты построения зависимости между *интенсивностями* характеристического излучения элемента включения и элементов матрицы, что необходимо для обоснования предложенного способа анализа. В дальнейшем же – при экспериментальной проверке и при определении состава минералов Наталкинского месторождения – для анализа использованы зависимости между *концентрациями* элементов включения и элементов матрицы, рассчитанными с помощью метода ZAF-коррекции. Насколько равноценна такая замена? Не может ли метод ZAF-коррекции, разработанный для гомогенных образцов, стать при таком подходе источником систематической погрешности, связанной с гетерогенностью исследуемых объектов? Можно ли утверждать, что предложенный способ в достаточной мере учитывает взаимное влияние элементов включения? Не может ли быть более перспективным расчет состава включения с использованием интенсивностей излучения его элементов, определённых с помощью экстраполяции на основе зависимостей, приведённых в описании раздела 2 главы 3?
- В работе предложена модификация Монте-Карло модели Лава, Кокса и Скота, позволяющая имитировать процессы взаимодействия электронов с мишенью,



представляющую собой гомогенную матрицу с отдельными микронными и субмикронными включениями. Насколько такая модель адекватна реальным объектам анализа? Можно ли матрицу сульфидных материалов считать достаточно гомогенной?

- Возможно ли использование предложенного в работе способа РСМА для анализа гетерогенных образцов сложного состава?
- Можно ли провести оценку общего содержания золота по результатам анализа микрочастиц?

**Егорова Владимира Константиновича**, к.ф.-м.н., с.н.с. лаборатории рентгеновской кристаллооптики и рентгеновской акустики Института проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН;

- Непонятно, почему диссертант не попытался разработать процедуру определения уровня золотонности на базе использования сильно расфокусированного электронного пучка. В этом случае присутствие золота и серебра в минерале можно было бы рассматривать как примесь, равномерно распределённую по объёму.
- В качестве серьёзных замечаний и к автореферату хотелось бы указать на отсутствие экспериментальных данных энергодисперсионной спектроскопии, хотя эти данные присутствуют в диссертации.

**Кузьминой Татьяны Георгиевны**, к.ф.-м.н., с.н.с. лаборатории методов исследования и анализа вещества и материалов ГЕОХИ РАН;

- Небольшое замечание к тексту – в комментариях к таблице 4 автор, видимо, ошибся в данных, полученных с помощью «нормировки» (70% и 18%).

**Ревенко Анатолия Григорьевича**, д.т.н., г.н.с. ЦКП «Геодинамика и геохронология» Института земной коры СО РАН;

- К сожалению, автор иногда пишет об энергии линий, а надо бы об энергии излучения линий.
- На стр. 11 отмечено, что 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. В таблице, однако, приведены только два таких примера.
- Считаю, что в работе необходимо отметить тот факт, что проведённые исследования являются продолжением исследований профессора В.П. Афонина.

В целом в поступивших отзывах подчёркивается, что перечисленные замечания не носят принципиального характера, не затрагивают существа основных положений, выносимых на защиту, и не снижают общего высокого уровня диссертации и её практической ценности, выводы по работе в достаточной степени обоснованы и убедительно аргументированы. В диссертации рассмотрены некоторые важные фундаментальные вопросы рентгеноспектрального микроанализа, в том числе распределение электронов в образце и локальность. Полученные результаты моделирования и соответствующие методологические наработки в перспективе могут быть внедрены в программное обеспечение электронных микроскопов и электронно-



зондовых микроанализаторов. Соискателем предложен новый методический подход, позволяющий преодолеть физические ограничения метода рентгеноспектрального электронно-зондового микроанализа (РСМА) и проводить оценку состава объектов, размер которых меньше, чем локальность метода РСМА, в том числе тонкодисперсного самородного золота в минералах. Адекватность предложенного подхода была проверена с использованием специально изготовленного образца пирита с напылённым золотом, имитирующим природные тонкодисперсные включения. Показано, данный подход позволяет значительно повысить точность определения содержания золота во включениях, заключённых в матрицу сульфидных минералов. В дальнейшей предложенный подход может быть распространён и на другие объекты анализа. Для решения поставленных в диссертации задач был использован метод Монте-Карло, что является вполне обоснованным.

Отмечено, что с практической точки зрения проведённые исследования имеют важное значение не только в сфере геологии и геохимии, но и в области изучения вещественного состава материалов технологического происхождения. Актуальность, практическая значимость и достоверность полученных результатов не вызывает сомнения. Татарин В.В. заслуживает присуждения учёной степени кандидата химических наук по специальности 02.00.02 – аналитическая химия (шифр 1.4.2 в соответствии с новой номенклатурой специальностей) и обладает соответствующими профессиональными навыками.

Выбор официальных оппонентов обусловлен их научными достижениями в теоретических и практических вопросах рентгеноспектрального анализа. Выбор ведущей организации обусловлен тем, что ИГМ СО РАН (г.Новосибирск) является признанным лидером в области электронно-зондового микроанализа природных веществ и материалов.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

– впервые разработан теоретически обоснованный и экспериментально подтверждённый способ рентгеноспектрального электронно-зондового микроанализа (РСМА), позволяющий проводить оценку содержаний основных компонентов (Au, Ag) тонкодисперсных включений самородного золота в сульфидных минералах в тех случаях, когда размер таких включений меньше, чем размер области генерации рентгеновского излучения в образце, или сопоставим с ним; полученные результаты являются серьёзным достижением в области локального анализа веществ и материалов, предложенный подход вносит существенный вклад в методологию современного РСМА и в дальнейшем может быть распространён на другие родственные объекты анализа.

– доказана перспективность практического использования разработанного способа для определения пробности тонкодисперсного самородного золота в минералах золоторудных месторождений (пирит, арсенопирит, халькопирит, сфалерит). Показано, что использование разработанного способа позволяет снизить неопределённость оценки состава включений в 2-17 раз по сравнению с распространённой в практике РСМА процедурой «нормировки» содержаний на 100 %, предполагающей исключение из результатов анализа элементов матрицы.



– для обоснования разработанного способа предложена модификация квазиодномерной Монте-Карло модели возбуждения рентгеновского излучения при РСМА для двумерного и трёхмерного случая, позволяющая оценивать влияние размера и состава тонкодисперсных включений в минеральной матрице на интенсивность аналитического сигнала;

– создано специализированное программное обеспечение, прошедшее государственную регистрацию, которое позволяет проводить моделирование процессов взаимодействия электронов с веществом применительно ко включениям – автономным микронным и субмикронным фазам, находящимся в гомогенной минеральной матрице;

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

**Теоретическая значимость** исследования обоснована тем, что применительно к проблематике диссертации:

– рассмотрены процессы взаимодействия электронов киловольтных энергий с веществом, проведена калибровка и тест модифицированной модели Монте-Карло, в том числе подобраны оптимальные значения прицельного параметра, позволяющие адаптировать модель возбуждения рентгеновского излучения при РСМА в соответствии с экспериментальными данными о коэффициентах обратного рассеяния, которые используются в программном обеспечении микроанализаторов в рамках метода ZAF-коррекции для учёта матричных эффектов;

– доказано, что для описания процессов возбуждения рентгеновского излучения электронами с энергией более 3 кэВ достаточно двумерной модели, которая значительно проще в программной реализации по сравнению трёхмерной моделью и обеспечивает приемлемую точность расчёта поправки на поглощение;

– представлены результаты расчётов пространственного разрешения метода РСМА при энергии электронов 20 кэВ, выполненные методом Монте-Карло для некоторых элементов, представляющих интерес при изучении минералов золоторудных месторождений; эти данные имеют важное значение для понимания нижней границы размеров микровключений, при достижении которого определение их количественного состава формально уже нельзя проводить с использованием традиционных методик РСМА.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики** подтверждается тем, что разработанный способ РСМА внедрён в аналитическую практику лаборатории рентгеновских методов анализа Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН в г.Иркутске используется при проведении анализа арсенопирита Наталкинского золоторудного месторождения на микроанализаторе Superprobe JXA-8200 (Jeol Ltd). Аналитические данные, полученные с помощью разработанного способа, имеют важное значение для выявления особенностей генезиса золоторудных месторождений, разработки схем обогащения руд, а также для оценки экономической составляющей проектов по разработке месторождений. Практическое внедрение способа базируется на следующих результатах:



– представлены методические рекомендации, выполнение которых позволяет снизить систематическую погрешность при проведении анализа тонкодисперсных включений золота в минералах;

– показано, что применение предложенного способа повышает достоверность определения пробности тонкодисперсного золота в сульфидных минералах методом РСМА, при этом состав основных компонентов тонкодисперсных включений самородного золота (Au, Ag) может быть определён с точностью, сопоставимой с таковой для массивных образцов;

– предложен подход для эмпирической оценки диаметра электронного зонда по контурам изображений в обратно рассеянных электронах и рентгеновских лучах, который позволяет улучшить контроль юстировки колонны микроанализатора и соответствующих приборных настроек.

**Оценка достоверности результатов исследования.** Достоверность представленных в диссертации результатов подтверждена тем, что расчётные данные были получены с использованием калибровки модели Монте-Карло по коэффициентам обратного рассеяния Данкамба-Рида, которые используются в программном обеспечении микроанализаторов, и соответствуют полученным на сертифицированном оборудовании экспериментальным данным РСМА. Результаты моделирования соответствуют литературным данным: кривые распределения рентгеновского излучения по глубине образца согласуются с данными в работах Вернера, а также гауссианом Паквуда и Брауна; оценки пространственного разрешения согласуются с данными в работах Рида; глубина проникновения электронов согласуется с расчётами по формуле Канаи-Окаямы; формы облаков траекторий электронов имеют схожую конфигурацию и размеры с соответствующими формами в монографии Гоулдстейна.

Корректность предложенного подхода для определения пробности тонкодисперсного золота в сульфидных минералах подтверждена при изучении специально созданного искусственного образца пирита известного химического состава и геометрии с включениями чистого золота в виде напылённого тонкого слоя толщиной около 1 мкм. Исследования методом РСМА проведены с использованием образцов сравнения самородного золота, пробность которого соответствует пробности напылённого золота в искусственном образце, а при изучении природных объектов золоторудных месторождений – пробности массивных включений самородного золота в исследованной выборке проб.

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



Диссертационная работа Татаринова В.В. «Электронно-зондовый микроанализ тонкодисперсных включений золота в сульфидных минералах» на соискание учёной степени кандидата химических наук представляет собой научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утверждённого Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 (в редакции от 01.10.2018 г, с изменениями от 26.05.2020 г). Работа содержит решение научной задачи, имеющей важное значение для развития рентгеноспектрального электронно-зондового микроанализа: в результате проведённых исследований разработан способ, позволяющий оценить содержание основных компонентов (Au, Ag) тонкодисперсных включений самородного золота в сульфидных минералах в тех случаях, когда размер включений сопоставим или меньше размера области генерации аналитического сигнала в образце. Содержание работы соответствует специальности 02.00.02 – аналитическая химия (1.4.2 в соответствии с новой номенклатурой специальностей).

На заседании 29 июля 2021 года диссертационный совет принял решение **присудить Татаринову Василию Вадимовичу учёную степень кандидата химических наук** за разработку нового способа количественного рентгеноспектрального электронно-зондового микроанализа микронных и субмикронных включений самородного золота в сульфидных минералах. При проведении **открытого голосования** диссертационный совет в количестве **23** человек (**12** присутствовали на заседании очно, **11** – в удалённом интерактивном режиме), из них **16** докторов наук по специальности 02.00.02 (1.4.2) – аналитическая химия, в том числе **6** докторов наук, обеспечивающих химические науки, участвовавших в заседании, из **29** человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – **23**, против – **0**.

Председатель  
диссертационного совета,  
академик РАН,  
доктор хим. наук

Учёный секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат хим. наук

29 июля 2021 года



Мясоедов Борис Федорович

Захарченко Елена Александровна