

Развитие рентгеноспектрального анализа в г. Новосибирске (Электронно-зондовый микроанализ и рентгенофлуоресцентный анализ с использованием синхротронного излучения)

***А.Г. Ревенко**

Институт земной коры СО РАН, Российская Федерация, 664033, г. Иркутск, Лермонтова, 128

**Адрес для переписки: Ревенко Анатолий Григорьевич, e-mail: xray@crust.irk.ru*

Поступила в редакцию 1 апреля 2021 г, после доработки – 29 апреля 2021 г.

Рассмотрен вклад Новосибирских рентгенофизиков в становление и развитие двух направлений рентгеноспектрального анализа: электронно-зондового микроанализа и рентгенофлуоресцентного анализа с использованием синхротронного излучения. Исследования по геологической тематике в Институте геологии и геофизики СО АН СССР с применением электронно-зондового микроанализатора MS-46 французской фирмы САМЕСА (с 1967 г.) послужили основой разработки методик количественного рентгеновского микроанализа породообразующих минералов, так как методы количественных определений содержаний элементов с малыми атомными номерами в длинноволновой рентгеновской области ещё только зарождались. По мере развития и совершенствования технической базы метода (микронзонды JXA-5A, JEOL, 1975; Камебакс Микро, САМЕСА, 1981; JXA-8100, JEOL, 2003; JXA-8230, JEOL, 2016; электронно-вычислительная техника) непрерывно изменялось программное обеспечение по управлению работой приборов и переводу измеренных интенсивностей аналитических линий в содержания элементов. Первые результаты элементного анализа, полученные с использованием синхротронного излучения для возбуждения рентгеновской флуоресценции (**РФА-СИ**) на ускорительном кольце ВЭПП-3 в Институте ядерной физики СО АН СССР, опубликованы в 1977 г. В последующие годы на станции элементного РФА-СИ проводились исследования образцов различной природы — биологических (биоткани сердца, печени и лёгких, волосы, кости, растения), геологических, объектов окружающей среды (почвы, отложения, аэрозоли и др.), археологических объектов, а также новых технологических материалов. Разработаны методики определения химических элементов в образцах малой массы (миллиграммы), в частности, в уникальных образцах лунного грунта, биопсийного материала тканей миокарда человека и др. Сканирующее устройство на станции элементного РФА-СИ обеспечило возможность получения информации для реконструкции изменения климата за разные периоды времени — от 100 до 1000 лет. На станции развивается новый неразрушающий метод конфокальной рентгеновской микроскопии для исследования микрообъектов и визуализации распределения химических элементов в протяжённых объектах.

Ключевые слова: электронно-зондовый микроанализ, рентгенофлуоресцентный анализ, синхротронное излучение

For citation: *Analitika i kontrol'* [Analytics and Control], 2021, vol. 25, no. 2, pp. 155-173

DOI: 10.15826/analitika.2021.25.2.006

X-ray spectral analysis development in Novosibirsk city (Electron probe microanalysis and X-ray fluorescence analysis using the synchrotron radiation)

***A.G. Revenko**

Institute of the Earth's Crust, SB RAS, 128 Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russian Federation

**Corresponding author: Anatoliy G. Revenko, e-mail: xray@crust.irk.ru*

Submitted 01 April 2021, received in revised form 29 April 2021

Current article considers the contribution of X-ray physicists from the city of Novosibirsk to the formation and development of the two X-ray spectral analysis directions: electron probe microanalysis and X-ray fluorescence analysis using the synchrotron radiation. The research on geological topics at the Institute of Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences using the MS-46 electron probe microanalyzer of the French company CAMECA (since 1967) served as the basis for the development of methods for the quantitative X-ray microanalysis of rock-forming minerals as the methods for quantitative determination of the contents of elements with low atomic numbers in the long-wavelength X-ray region were still in their infancy. With the development and the improvement of the method's technical base (microprobes JXA-5A, JEOL, 1975; Camebax Micro, CAMECA, 1981; JXA-8100, JEOL, 2003; JXA-8230, JEOL, 2016; electronic computing), the software for controlling the operation of devices and converting the measured intensities of the analytical lines into the concentration of elements continued to changed and improve. The first results of elemental analysis, obtained using the synchrotron radiation to excite X-ray fluorescence at the VEPP-3 accelerating ring at the Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences, were published in 1977. In the following years, at the station of elemental SRXRF, samples of various nature were studied — biological (bio tissues of the heart, liver, lungs, hairs, bones, plants), geological, environmental objects (soils, sediments, aerosols, etc.), archaeological sites as well as new technological materials. The procedures for the determination of chemical elements in low-mass samples (milligrams) in unique samples of lunar soil, biopsy material of human myocardial tissues, etc. have been developed. The scanning device at the elemental SRXRF station made it possible to obtain the information for reconstructing the climate change for different periods of time – from 100 to 1000 years. A new non-destructive method of confocal X-ray microscopy for studying micro-objects and visualizing the distribution of chemical elements in extended objects on this station are currently being developed.

Keywords: electron probe microanalysis, X-ray fluorescence analysis, synchrotron radiation

ВВЕДЕНИЕ

В ноябре 2020 г. исполнилось 125 лет со дня открытия рентгеновских лучей. Об этой важной для физики дате (8 ноября 1895 г.) имеется обширная литература. Отметим здесь несколько публикаций прошлого года, посвящённых этой юбилейной дате [1-3]. В работах [2, 3] сделана попытка осветить вклад физиков нашей страны в исследование особенностей этого вида электромагнитного излучения и в развитие вариантов применения его на практике. Необходимо отметить, что в интернете на персональных сайтах и сайтах ряда организаций опубликованы материалы об этом событии. В основном это была информация об авторе открытия Рентгене В.К. (в марте 2020 г. исполнилось 175 лет со дня его рождения) и о некоторых деталях открытия.

В Советском Союзе (кроме России) существенный вклад в развитие рентгеноспектрального анализа (РСА) вносили коллеги из Украины, Казахстана и Узбекистана. Сложно перечислить всех участников этого процесса. Из тех, кто работал в этой области после 1945 г. необходимо отметить Берхоера И.Д., Бланка А.Б., Карманова В.И., Кочмолу Н.М., Легкову Г.В., Шаркина О.П., Войткевич В.Г., Экспериандову Л.П., Чебуркина А.К., Загороднего В.В., Макаровскую Я.Н. и др. (Украина) [4-10]; Пивоварова А.В., Демьяникова И.Г., Мамаева В.Е., Ильюкевича Ю.А., Рубанова И.А., Парамонова Ф.П., Фавинского И.Я., Турова Г.И., Панькова С.Д., Шмоница Л.И. и др. (Казахстан) [10-16], Стулова Б.А. [17] (Узбекистан).

В России теоретические основы и технология экспериментальных исследований с применением РСА активно разрабатывались в Москве, Ленинграде, Ростове-на-Дону, Иркутске, Новосибирске, Нижнем Новгороде (Рудневский Н.К., Машин Н.И.) [18], г.

Апатиты (Рехколайнен Г.И., Россоха Л.А., Кравченко-Бережной Р.А., Полежаева Л.И.) [19, 20], Красноярске (Бондаренко Г.В., Крамида Е.К., Верховодов П.А., Конев А.В.) [21-24], Норильске (Макаров Д.Ф., Шестаков В.А., Бондаренко Б.Ю.) [25, 26], Екатеринбурге (Панкратов А.А.), Магадане (Борходоев В.Я.) [27, 28], Владивостоке (Иваненко В.В., Пятков А.Г., Романенко И.М., Перепелица В.В.) [29-31], Улан-Удэ (Жалсараев Б.Ж., Карманов Н.С.), Якутске (Махотко В.Ф.) и др. научных и промышленных центрах. Дополнительные ссылки на работы указанных авторов можно найти в обзорах [32, 33]. Информация по истории развития вариантов РСА в научных центрах Москвы, Ленинграда, Ростова-на-Дону, Иркутска опубликована в [2, 3, 34-49]. Однако вклад других центров, оказавших существенное влияние на становление и развитие, например, электронно-зондового рентгеноспектрального микроанализа (**РСМА**), а также рентгеноспектрального анализа с использованием синхротронного излучения (**РФА СИ**) освещён недостаточно. В настоящем сообщении сделана попытка дополнить сведения о вкладе Новосибирских коллег в развитие двух последних направлений РСА.

РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРОННО-ЗОНДОВОГО РЕНТГЕНОСПЕКТРАЛЬНОГО МИКРОАНАЛИЗА В ИНСТИТУТЕ ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ СО РАН (Г. НОВОСИБИРСК)

В 60-е годы прошлого века в г. Новосибирске рентгеновское излучение для изучения характеристик разнообразных материалов применялось в ряде лабораторий (Институт катализа и Институт неорганической химии СО АН СССР, ЦНИИОлово,



Рис. 1. Заслуженный деятель науки Российской Федерации Мазалов Л.Н.

Fig. 1. L.N. Mazalov, Honored Scientist of the Russian Federation.

оловокомбинат и др.) [32, 33]. Из рентгенофизиков широко известен Лев Николаевич Мазалов (рис. 1), выпускник Ростовского-на-Дону госуниверситета. Его область интересов – рентгеновская и рентгеноэлектронная спектроскопия [50–52]. Систематические исследования по развитию методов изучения электронной структуры химических соединений начали интенсивно развиваться в нашей стране в начале 60-х годов XX-го века. Зарегистрированные и обработанные в эти годы в ИНХе рентгеновские эмиссионные спектры ряда простых «газовых» молекул (HCl , Cl_2 , H_2S и др.) имели основополагающее значение [52]. Развитие этих работ позволило получить рентгеновские спектры большого числа молекул и ионов, дающие уникальную информацию о строении электронных уровней молекул. Для реального использования этих возможностей были необходимы разработка и создание новых рентгеновских спектрометров. Для регистрации «ультрамягких» рентгеновских спектров в лаборатории ИНХа в качестве брэгговских кристалл-анализаторов использовались Лэнгмюровские многослойные пленки (псевдокристаллы жирных кислот), обладающие большим межплоскостным расстоянием. Разработка и выпуск промышленной серии рентгеновских спектрометров «Стеарат» позволили перейти к изучению рентгеновских эмиссионных K -спектров углерода, азота, фосфора и кислорода, L -спектров серы и хлора, L -спектров переходных металлов, что сразу открыло новые возможности применения рентгеновской спектроскопии в химии [52].

Мазалов Л.Н. в 1967 г. защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а в 1973 г. ему присуждена ученая степень доктора физико-математических наук. За разработку теории, методов и приборов для рентгеноспектральных исследований химической

связи в 1989 году ему в составе группы рентгенофизиков присуждена Государственная премия РФСР в области науки и техники. Впечатляет как состав участников, так и география: Мазалов Л.Н. (Новосибирск), Нефедов В.И. (Москва), Курмаев Э.З. (Свердловск), Немошкаленко В.В. (Киев), Зимкина Т.М. (Ленинград), Фомичев В.А. (Ленинград), Шуваев А.Т. (Ростов-на-Дону) и Брытов И.А. (Ленинград). Указом Президента РФ от 22 мая 2014 г. д.ф.-м.н., профессору, гл.н.с. ИНХ СО РАН Льву Николаевичу Мазалову присвоено почётное звание «Заслуженный деятель науки Российской Федерации».

Электронно-зондовый рентгеноспектральный микроанализ начинает свою историю в Институте геологии и геофизики с 1967 г., когда на выставке научного оборудования в Академгородке по инициативе академика Соболева В.С. был приобретён микронзонд MS-46 французской фирмы САМЕСА. Для непосредственной работы на микронзонде была организована группа (кабинет) в составе молодого канд. физ.-мат. наук Лаврентьева Ю.Г. (рис. 2), выпускника физфака НГУ Семёнова В.И. и Поспеловой Л.Н.

Лаврентьев Ю.Г. окончил физико-математический факультет Иркутского госуниверситета в 1958 г. Первые 8 лет он занимался разработкой методик рентгеноспектрального флуоресцентного анализа (РФА). Эксперименты по теме кандидатской диссертации «Исследование путей повышения чувствительности и точности рентгеноспектрального флуоресцентного анализа следов элементов» выполнены Лаврентьевым Ю.Г. в Институте неорганической химии СО АН СССР под руководством доктора химических наук, проф. Вайнштейна Э.Е. Основное содержание диссертации опубликовано в статьях [53–58].

Первые исследования по геологической тематике с помощью РСМА в Новосибирске – изучение минералов ртутных месторождений – были начаты с Васильевым В.И. [59]. Этому способствовал имев-



Рис. 2. Мл. научный сотрудник Лаврентьев Ю.Г., 1959 г.

Fig. 2. Yu.G. Lavrent'ev, Jr. researcher, 1959.



Рис. 3. Бердичевский Г.В.

Рис. 3. G.V. Berdichevsky.

шийся у Васильева В.И. опыт работы на микрозонде с Бердичевским Г.В. (рис. 3) в Институте неорганической химии СО РАН (ИНХ СО РАН). Затем круг пользователей и объектов исследования стал быстро расширяться (таблица). Определилась главная задача собственно аналитических исследований – разработка количественного РСМА породообразующих минералов, так как методы количественных определений элементов в длинноволновой рентгеновской области в СССР в то время ещё только начинали развиваться. Это перспективное для геолого-геохимических исследований направление стало развиваться по инициативе будущих академиков, а тогда ещё кандидатов наук Добрецова Н.Л. и особенно Соболева Н.В., оказавшего большую поддержку становлению и развитию электронно-зондовых исследований в Институте геологии и геофизики СО АН СССР. Определённую роль сыграло сотрудничество и обмен образцами сравнения с Геофизической лабораторией института Карнеги (г. Вашингтон, США). Публикации 1968-1971 гг. [60-64] с первыми в СССР количественными микрозондовыми анализами породообразующих минералов положили начало



Рис. 4. Усова Л.В. выполняет исследования на микроанализаторе MS-46.

Fig. 4. L.V. Usova performs research on the MS-46 microanalyzer.

детальному изучению минерального состава пород верхней мантии.

Очень быстро РСМА из экзотического превратился в повседневный исследовательский метод выполнения количественных микрозондовых определений (таблица) [65-68]. Решение возникающих проблем (помимо методических исследований) осуществлялось по трём направлениям. Во-первых, происходило расширение аналитического коллектива. В начале 70-х гг. были приняты Королюк В.Н., Кузнецова А.И. и Усова Л.В. (рис. 4), несколько позднее Хмельникова О.С. (Покачалова), Бердичевский Г.В., Майорова О.Н. и Нигматулина Е.Н. (Илларионова). Во-вторых, началось использование ЭВМ для перевода измеренных на приборе интенсивностей аналитических линий в результаты анализа, или, другими словами, для учёта матричного эффекта. Необходимая программа (первая в СССР) была создана к 1970 г. совместно с Афоным В.П. (Институт геохимии СО РАН, г. Иркутск) [69]. В дальнейшем программное обеспечение подобного рода непрерывно совершенствовалось по мере развития

Таблица

Микроанализаторы в Институте геологии и геофизики СО АН СССР

Table

Microanalyzers at the Institute of Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences, Novosibirsk

| Прибор | Год | Исследуемые образцы | Литература |
|------------------------|------|---|------------|
| MS-46, CAMECA | 1968 | Минералы месторождений Hg Сульфотеллуриды Bi Акцессорный апатит Гранаты из ксенолитов алмазоносных перидотитов | 60-64 |
| JXA-5A, JEOL | 1975 | Гипогенные минералы Hg Самородное Au | 65-68 |
| Камебакс Микро, CAMECA | 1981 | Минералы-спутники алмазов Минералы группы Pt металлов | 73-77 |
| JXA-8100, JEOL | 2003 | Zn-шпинелевый и Ni-пироповый геотермометры | 78-81 |
| JXA-8230, JEOL | 2016 | Породообразующие минералы, редкоземельные минералы и др. | 82, 83 |



Рис. 5. Сотрудники лаборатории электронно-зондовых методов исследования. 1-й ряд: Титов А.Т., Поспелова Л.Н., Лаврентьев Ю.Г., Усова Л.В., Смирная З.И.; 2-й ряд: Соловых Д.Н., Нигматулина Е.Н., Аборнева И.В., Хмельникова О.С., Королюк В.Н., Майорова О.Н., Летов С.В.

Fig. 5. Employees of the Laboratory of Electron Probe Research Methods. 1st row: A.T. Titov, L.N. Pospelova, Yu.G. Lavrent'ev, L.V. Usova, Z.I. Smirnova, Z.I. Meek; 2nd row: D.N. Solovykh, E.N. Nigmatulina, I.V. Aborneva, O.S. Khmelnikova, V.N. Korolyuk, O.N. Mayorova, S.V. Letov.

электронно-вычислительной техники и теории количественного РСМА [70-72]. В-третьих, было реализовано приобретение более совершенной и производительной электронно-зондовой техники (см. таблицу). В итоге, годовую производительность на приборе MS-46 удалось довести до 600–800 анализов. Для микроанализатора JXA-5A годовая производительность была увеличена до 2700–2800 условных анализов, что существенно повысило статус метода в Институте. В 1977 г. на основе кабинета РСМА совместно с группами просвечивающей (Стенина Н.Г., Титов А.Т.) и сканирующей (Летов С.В.) электронной микроскопии создана лаборатория электронно-зондовых методов исследования (рис. 5), просуществовавшая как структурное подразделение до 2006 г. К концу 80-х годов годовая производительность превысила 9–10 тыс. анализов [73-77].

Микроанализатор JXA-8100 – это полностью автоматизированный прибор с компьютерным управлением. Приборы этого класса способны в течение длительного времени поддерживать высокую стабильность пучка при довольно значительной величине силы тока зонда [78-81]. В результате открылись благоприятные методические возможности работы в сильноточном режиме, направленном на улучшение статистики измерений и снижение погрешности результатов анализа. Так, например, средствами РСМА были успешно воспроизведены Zn-шпинелевый и Ni-пироповый геотермометры, известные ранее только для высокочувствительного протонно-зондового метода анализа.

С целью упрочить аналитическое обеспечение работ по алмазной тематике в 2016 г. Институт при-

обрёл новый прибор – микроанализатор JXA-8230 той же фирмы JEOL. Характеристики этого микроанализатора лучше, чем у JXA-8100, а в программном обеспечении используется более совершенный способ расчёта массовых коэффициентов поглощения. В итоге повысилось качество результатов определений [82, 83].

Для повышения роли РСМА в геологических исследованиях исключительное значение сыграло его применение в сочетании со сканирующей электронной микроскопией (СЭМ). Это направление возникло и успешно развивается в Институте новым заведующим лабораторией (с 2008 г.) Кармановым Н.С. (рис. 6) [84-86]. Сканирующий электронный микроскоп MIRA3 LMU с системой микроанализа



Рис. 6. Заведующий лабораторией рентгеноспектральных методов анализа Карманов Н.С.

Fig. 6. N.S. Karmanov, Head of the laboratory of X-ray spectral analysis methods.



Рис. 7. Делегаты V Всерос. конф. по РСА (2006. Иркутск) в лаборатории Института геохимии СО РАН. Сидят: Хмельникова О.С., Королюк В.Н., Лаврентьев Ю.Г.; стоят: Карин Г.П., Усова Л.В., Пospelова Л.Н., Нигматулина Е.Н.

Fig. 7. Delegates of the V All-Russian Conference on X-ray Spectral analysis (Irkutsk, 2006) in the laboratory of the Institute of Geochemistry SB RAS. Sitting: O.S. Khmelnikova, V.N. Korolyuk, Yu.G. Lavrent'ev; Standing: G.P. Karin, L.V. Usova, L.N. Pospelova, E.N. Nigmatulina.

Inca Energy 450 XMax 80 (Oxford Instruments) приобретен в 2010 г.

Сотрудники лаборатории активно участвовали в работе Российских и Международных конференций. На рис. 7 представлены делегаты V Всероссийской конференции по рентгеноспектральному анализу (2006 г., Иркутск) в лаборатории Института геохимии СО РАН. Обобщение полученных сотрудниками этого коллектива результатов можно найти в работах [87-89].

РАЗВИТИЕ ВАРИАНТА РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНОГО АНАЛИЗА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В НОВОСИБИРСКЕ

Эксперименты с пучками синхротронного излучения (СИ) в Институте ядерной физики (г. Новосибирск)

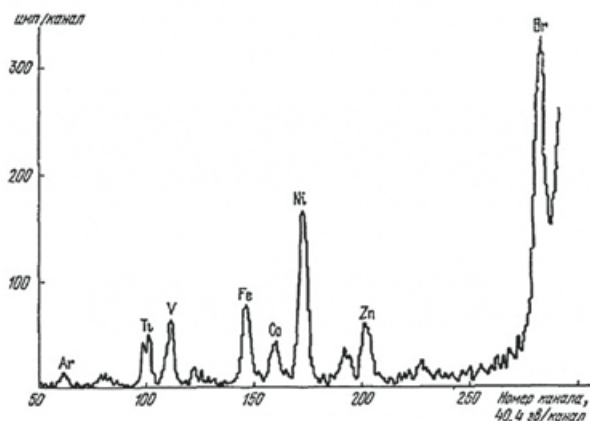


Рис. 8. Спектр рентгеновского излучения образца нефти, возбуждаемого СИ [91].

Fig. 8. X-ray spectrum of the oil sample excited by SR [91].

были начаты в июле 1973 г., когда пучок рентгеновского излучения СИ был впервые выведен из накопителя ВЭПП-3 [90]. Первые результаты элементного анализа, полученные с использованием СИ для возбуждения рентгеновской флуоресценции на ускорительном кольце ВЭПП-3, опубликованы в 1977 г. [91]. Были проведены эксперименты по определению элементного состава различных объектов (растворы солей, нефти, порошки минералов) с использованием СИ накопителя ВЭПП-3. Пример спектра флуоресцентного рентгеновского излучения образца нефти, возбуждаемого синхротронным излучением, показан на рис. 8. Необходимо отметить решающий вклад в развитие и становления РФА-СИ в нашей стране академиков Скринского А.Н. (Директор Института ядерной физики имени Будкера Г.И. СО АН СССР в 1977-2015 гг.) (рис. 9) и Кулипанова Г.Н. (Научный руководитель научного направления СИ, директор Сибирского центра



Рис. 9. Академик Скринский А.Н.

Fig. 9. Academician A.N. Skrinisky.



Рис 10. Академик Кулипанов Г.Н.

Fig 10. Academician G.N. Kulipanov

синхротронного излучения (ЦКП СЦСТИ с момента его основания), рис. 10.

Вариант РФА-СИ радикально улучшает возможности метода РФА: 1) малая угловая расходимость и непрерывный спектр СИ позволяют эффективно перестраивать в широком диапазоне энергию монохроматического излучения с применением фокусирующей рентгеновской оптики. Это делает возможным выбор оптимальных условий для регистрации заданного элемента в образцах сложного состава; 2) естественная поляризация СИ обеспечивает возможность уменьшения фона из-за рассеяния возбуждающего излучения на образце на один-два порядка при оптимальном выборе угла детектирования; 3) высокая интенсивность пучков СИ позволяет проводить локальный анализ с высоким пространственным разрешением и регистрировать излучение тонких образцов, что в ряде случаев улучшает отношение сигнал/фон [91-94]. Достоинствами СИ также являются малое поперечное сечение, высокая степень параллельности рентгеновских пучков и возможность коллимирования и фокусировки их с помощью рентгеновской оптики.

Экспериментальная станция элементного РФА на базе накопительного кольца ВЭПП-3

Накопительное кольцо ВЭПП-3 имеет периметр 74.4 м и работает в области энергий от 350 МэВ (инжекция) до 2000 МэВ (эксперимент). Сила тока электронов, ускоренных до максимальной энергии, достигает 160 мА. В качестве первичного источника возбуждения в канале станции РФА используется монохроматический пучок СИ. Для монохроматизации первичного \square смешанного \square пучка СИ применяется кристалл Si с рабочими плоскостями (111), который обеспечивает получение монохроматического излучения в диапазоне энергий 8–42 кэВ. Для проведения



Рис. 11. Вазина А.А., Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН, г. Пущино, Московской области.

Fig. 11. A.A. Vazina, Institute of Theoretical and Experimental Biophysics, Russian Academy of Sciences, Pushchino, Moscow Region.

РФА из спектра СИ вырезается участок шириной $\square E/E = (3-4) \cdot 10^{-4}$. Монохроматизация реализована с использованием дифракции узконаправленного пучка рентгеновского излучения, что снижает сплошной фон, основная составляющая которого – упругорассеянное первичное излучение в области регистрируемого излучения флуоресценции определяемых элементов.

Механизмы перемещения образца и поворота кристалла обеспечивают при сохранении положения точки фокуса на образце плавную перестройку энергии. Энергию возбуждения выбирают с учётом края поглощения определяемого элемента с наибольшим атомным номером Z в конкретной серии измерений. Характеристическое флуоресцентное излучение образца регистрировали полупроводниковым Si(Li)-детектором PentaFET (Oxford Instruments), обеспечивающим регистрацию флуоресцентного излучения с энергетическим разрешением $\square 145$ эВ (на линии 5.9 кэВ). Толщина Be-фольги – 7.62 микрометра. При расположении детектора в плоскости поляризации монохроматического пучка СИ под углом 90° к этому пучку, уменьшается интенсивность упругорассеянного и комптоновского пиков, а соответственно и высота фонового плато [92-94]. Для разложения регистрируемого спектра квантов по энергиям используется многоканальный анализатор фирмы Oxford Instruments Inc., USA. Камера для анализа образцов и коллиматоры изготовлены из композиционного материала эльконайта. Максимальный размер монохроматического пучка СИ составляет 2×5 мм. Время измерения образцов $10-10^3$ с, рабочая среда – воздух. При этом по K -линиям могут быть определены элементы от 16S до 60Nd. Для всех источников синхротронного излучения свойственны циклическая работа ускорительного кольца (4–6 ч). В



Рис. 12. Колмогоров Ю.П., Объединенный институт геологии, геофизики и минералогии СО РАН.

Fig. 12. Yu. P. Kolmogorov, United Institute of Geology, Geophysics and Mineralogy of the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences.

настоящее время существует система стабилизации пучка СИ.

Применение метода РФА-СИ для исследования образцов минимальной массы. Возможности Новосибирской станции элементного РФА-СИ успешно использовали несколько групп исследователей из разных научных организаций. Это можно видеть и на примере далеко не полного списка публикаций, приведённых в настоящей работе. На рис. 9 – рис. 13 представлены некоторые авторы первых публикаций. На станции элементного РФА-СИ проводились исследования образцов различной природы: биологических [94-100], геологических [101-102], объектов окружающей среды [103-108], археологических объектов [109-111], а также новых материалов [112, 113]. Были разработаны методики определения химических элементов в образцах малой массы (единицы миллиграмма) [114], в частности, в таких уникальных образцах как образцы лунного грунта (базальт) [115-120], биопсийного материала тканей миокарда человека [94, 99, 100].

Вариант метода РФА – РФА-СИ очень эффективен для элементного анализа биологических тканей. Важное его достоинство – отсутствие необходимости растворения, разложения, концентрирования отдельных элементов пробы, что снижает риски загрязнения и потерь определяемых элементов, а также существенно сокращает время анализа. Использование в качестве источника возбуждения СИ, благодаря высокой интенсивности и поляризации его пучка, позволяет снизить пределы обнаружения и использовать существенно меньшее количество материала по сравнению с традиционным вариантом РФА. Прямой анализ цельных образцов биологической ткани с минимальной пробоподготовкой является перспективной возможностью и неоспоримым достоинством этого варианта РФА [94]. Иногда этот способ пробоподготовки может быть единственно доступным при необходимости количественного анализа образцов биотканей малой массы (менее 5 мг), в особенности материала биопсии (рис. 14). В этой работе содержания 20 элементов опреде-



Рис. 13. 5-й семинар по рентгеновской флуоресцентной спектроскопии полного отражения и связанным с ней спектроскопическими методами. Цукуба, Япония, октябрь 1994 г. На переднем плане Streli Ch. (Австрия) и Трунова В.А. (Новосибирск).

Fig. 13. 5th Workshop on Total Reflection X-ray Fluorescence Spectroscopy and Related Spectroscopical Methods. Tsukuba, Japan, October, 1994. In the foreground, Ch. Streli (Austria) and V.A. Trunova (Novosibirsk).

лялись с использованием всего 0.5 мг материала ткани сердечной мышцы в пересчёте на сухой вес. Несмотря на то, что как отмечают авторы, у больных с патологией дилатационная кардиомиопатия, по сравнению с контрольной группой в сердечной ткани содержания К, Са, Сг, Мп, Fe, Ni, Cu, Se, Br и Sr снижены до 50 % интенсивности аналитических линий перечисленных элементов, как видно из рисунка, достаточны для выполнения анализа.

Определение содержаний элементов при сканировании образцов влажных кернов донных отложений. Станция элементного РФА-СИ дополнительно оборудована специальным сканирующим устройством. Сканер позволяет перемещать прободержатель с



Рис. 14. Рентгенофлуоресцентный спектр фрагмента миокарда (биопсия), $E_{\text{возб}} = 21.43$ кэВ, время измерения 600 с.

Fig. 14. X-ray fluorescence spectrum of the myocardium fragment (biopsy), $E_{\text{excitation}} = 21.43$ keV, measurement time 600 s.

керном на длину до 400 мм, перпендикулярно плоскости падающего монохроматического излучения. Минимальный шаг сканирования составляет 0.1 мм. Данная установка позволяет проводить сканирование кернов донных осадков по длине, что дает уникальную возможность получения информации при реконструкции изменения климата за разные периоды времени – от 100 до 1000 лет и более. Такого рода исследования в настоящее время проводятся только методом РФА с использованием СИ. Использование РФА-СИ с разрешением в 1 мм позволило получить более подробную картину протекающего процесса за счёт лучшего разрешения. Это эффективнее традиционного ИСП-МС анализа с разрешением в 1 см [121]. С использованием сканера измерены с высоким разрешением влажные и ненарушенные фрагменты кернов донных отложений озера Байкал, Телецкого озера и других озер Сибири [121-128]. Определяли концентрации следовых и породообразующих элементов К, Са, Тi, Мп и Fe, а также редких и рассеянных элементов Ni, Cu, Zn, As, Br, Rb-Мо, Ва, La, Се, Pb, Th и U. Эта методика применялась в дальнейшем при исследовании ледника Перетолчина (Восточная Сибирь) для изучения изменения климата за последние 110 лет с временным разрешением год-сезон – на основе исследования элементного состава керна донных отложений прогляциального озера Эхой (ледник Перетолчина) [94, 104, 129-133]. Выявлены три группы химических элементов – мобильные элементы (К, Са, Тi, Мп и Fe); элементы, образующие соединения с растворённым органическим веществом и интенсивно накапливаемые в процессе жизненного цикла аквальной биоты (Ni, Cu, Br и U), и элементы, за счет поступления которых увеличивается мутность воды в озере и снижается его биопродуктивность (Rb, Sr, Y, Zr, Nb и Th). Вариант РФА-СИ позволяет обнаруживать годовую ритмику в поступлении элементов указанной третьей группы.

Рентгеновский микроанализ (micro X-Ray-SR). На существующих источниках синхротронного излучения, как правило, имеется возможность исследования объектов методом рентгеновского микроанализа. Для использования рентгеновского излучения практически всегда требуется преобразование первичного пучка СИ: коллимирование (преобразование расходящегося пучка в параллельный) и фокусировка (преобразование расходящегося или параллельного пучка в сходящийся). Возможности современной рентгеновской оптики позволяют получать как двумерные картины распределения химических элементов в образце, так и в объеме, используя конфокальную геометрию [134-137] с разрешением менее 10 микрометров.

В настоящее время на экспериментальной станции «РФА-СИ» в СЦСТИ развивается новый неразрушающий метод конфокальной рентгеновской микроскопии (КРМ) для исследования микрообъектов и визуализации распределения химических элементов в протяжённых объектах. Разработанный и установленный на экспериментальной станции прибор основан на применении двух поликапильных линз в конфокальной геометрии, имеющих фокусные размеры 10–15 микрометров в зависимости от энергии регистрируемых квантов. Волосы, как протяжённый объект (диаметр 80-100 микрометров), являются практически идеальным образцом для развития методики анализа с применением КРМ. Получены первые данные по распределению химических элементов (в частности, Cu) в поперечном сечении отдельно взятого волоса.

Таким образом, использование возможностей СИ в РФА позволяет проводить прямой многоэлементный анализ уникальных материалов: образцов миллиграммовой массы (биопсия, образцы лунного грунта), археологических и других объектов без разрушения, протяжённых объектов — посредством сканирующего анализа с высоким разрешением (керны донных осадков). Это лежит практически



Рис. 15. XI Российская конференция по синхротронному излучению СИ-96. В первом ряду в центре Кулипанов Г.Н.

Fig. 15. XI Russian SR-96 Synchrotron Radiation Conference. In the first row in the center – G.N. Kulipanov.



Рис. 16. Участники конференции EXRS-2006, Paris. Слева направо: Трунова В.А. (Институт неорганической химии им. Николаева А.В. СО РАН), Torök S.B. (Венгрия), Van Grieken R. (Бельгия) и Van Espen P. (Бельгия).

Fig. 16. Participants of the EXRS-2006 conference, Paris. From left to right: V.A. Trunova (A.V. Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry SB RAS), S.B. Torök (Hungary), R. Van Grieken (Belgium) and P. Van Espen (Belgium).

за гранью возможностей традиционных методов РФА и ряда других спектрометрических методов анализа [137, 138].

Количество научных коллективов на ВЭПП-3 быстро росло и уже в 1975 г. по инициативе основателя и директора ИЯФ г. Новосибирск академика Будкера Г.И. было организовано первое совещание под названием, включавшим при этом область применения СИ в то время: Первое совещание по использованию электронных накопителей — источников СИ для экспериментов в биологии, химии твердого тела и физике (SR-75) [91]. На SR-75 было представлено всего четыре отчета по результатам экспериментов с пучками СИ от накопителей ВЭПП-2 и ВЭПП-3 ИЯФ, в их числе доклад Вазиной А.А. об исследовании структуры биополимеров с большими периодами. Следующие встречи проводились примерно раз в два года с 1977 г., а с 1982 г. они получили статус национальных конференций. Основное место проведения этих конференций — Институт ядерной физики им. Будкера, Новосибирск. Рис. 15 — общее фото участников XI Российской конференции по синхротронному излучению СИ-96 (ИЯФ СО РАН, Новосибирск). На рис. 16 представлен один из эпизодов Международной конференции EXRS-2006, Paris. Слева направо участники конференции: Трунова В.А. (Россия), S.B. Torök (Венгрия), R. Van Grieken (Бельгия) и P. Van Espen (Бельгия).

В заключение необходимо отметить высокий научный уровень работ, выполненных Новосибирскими коллегами. Научные коллективы Новосибирска, успешно исследующие и применяющие возможности электронно-зондового микроанализа и рентгенофлуоресцентного анализа с использованием синхротронного излучения, выдержали суровые испытания 90-х годов. И в этом немаловажная заслуга, как руководителей, так и рядовых сотрудников.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает свою благодарность д.т.н. Ю.Г. Лаврентьеву и д.х.н. В.А. Труновой за помощь и поддержку при сборе материала и подготовке рукописи к печати.

ACKNOWLEDGEMENTS

The author is grateful to Y.G. Lavrent'ev and V.A. Trunova for their help with the preparation of the manuscript.

ЛИТЕРАТУРА

1. Щербаков Р.Н. В.К. Рентген – гений простоты и точности эксперимента. *Природа*. 2020. № 2 (1254). С. 54-66.
2. Ревенко А.Г. 125 лет со дня открытия рентгеновских лучей // *Аналитика и контроль*. 2020. Т. 24, № 1. С. 66–79.
3. Калинин Б.Д. Исследование рентгеновского излучения и развитие рентгеновского приборостроения в Санкт-Петербурге. К 125-летию открытия рентгеновского излучения // *Аналитика и контроль*. 2020. Т. 24, № 3. С. 201-229.
4. Рентгеноспектральный анализ в цементной промышленности СССР / И.Д. Берхоер [и др.] // (Доп. докл. / VI Междунар. конгресс по химии цемента; Разд. 1. 1-5. 169). 1974. М. 10 с.
5. Blank A.B., Eksperiandova L.P. Specimen preparation in x-ray fluorescence analysis of materials and natural objects SICI // *X-Ray Spectrom.* 1998. V. 27, № 3. P. 147–160.
6. Карманов В.И., Походня И.К. Рентгеноспектральный анализ с одним эталоном и корректировкой интенсивности на ЭВМ // *Завод. лаборатория*. 1972. Т. 38, № 2. С. 167-169.
7. Электронно-зондовое определение содержания Fe²⁺ и Fe³⁺ в минералах (на примере амфиболов) / Г.В. Легкова [и др.] // *Минералогический журнал*. 1982. Т. 4, № 4. С. 90-94.
8. Кочмола Н.М., Бондаренко В.П. Влияние крупности частиц руд и их смесей на результаты определения кальция рентгенофлуоресцентным методом // *Ж. аналит. химии*. 1987. Т. 42, № 7. С. 1216-1220.
9. Загородний В.В., Карманов В.И., Гордеева Г.Л. Рентгенофлуоресцентный анализ марганцевых агломератов // *Ж. аналит. химии*. 1984. Т. 39, № 3. С. 498-503.
10. Макаровская Я.Н., Экспериандова Л.П., Бланк А.Б. Обработка проб природной воды при помощи ультразвукового и ультрафиолетового разложения гуминовых веществ // *Ж. аналит. химии*. 2003. Т. 58, № 2. С. 130-134.
11. Пивоваров А.В., Вайнштейн Э.Е. Об одном способе устранения погрешностей фокусировки и увеличения светосилы рентгеновского спектрографа типа Кошуа // *Ж. аналит. химии*. 1951. Т. 6, № 6. С. 386-387.
12. Ильюкевич Ю.А., Демьяников И.Г., Гладышев В.П. О способе повышения точности рентгенофлуоресцентного анализа порошковых проб продуктов обогащения руд цветных металлов // *Ж. аналит. химии*. 1978. Т. 33, № 7. С. 1427-1429.
13. Мамаев В.Е., Юзвак Л.А. Рентгеноспектральное определение тантала при сплавлении анализируемых проб с бурой // *Аппар. и мет. рентг. анализа*. Л.: СКБРА. 1969. Вып. 4. С. 176-179.

14. Парамонов Ф.П. Определение концентрации элементов способом подбора теоретического стандарта // Изв. КазССР. Сер. хим. 1966. № 3. С. 97-98.
15. Фавинский И.Я. О компенсации эффекта ненасыщенности в рентгеноспектральном флуоресцентном анализе с помощью рассеянного излучения // Аппар. и мет. рентг. анализа. Л.: Машиностроение. 1972. Вып. 10. С. 143-147.
16. Оценка и учёт влияния размера частиц и химического состава проб шихты при рентгеноспектральном анализе / И.Я. Фавинский [и др.] // Аппар. и мет. рентг. анализа. Л.: Машиностроение. 1977. Вып. 19. С. 32-36.
17. Стулов Б.А. Применение метода стандарта-фона при рентгеноспектральном флуоресцентном анализе пульп // Завод. лаборатория. 1967. Т. 33, № 12. С. 1505-1507.
18. Рудневский Н.К., Машин Н.И. Рентгеноспектральное определение толщины медноникелевых пленок на ситалловой подложке с использованием однокомпонентных эталонов // Завод. лаборатория. 1984. Т. 50, № 9. С. 22-24.
19. Рехолайнен Г.И. Исследование рассеянного рентгеновского излучения в области L-спектра флуоресценции редкоземельных элементов // Аппар. и мет. рентг. анализа. Л.: Машиностроение. 1972. Вып. 11. С. 89-94.
20. Кравченко-Бережной Р.А., Полежаева Л.И. Способ приготовления излучателей для рентгеноспектрального анализа порошковых материалов // Завод. лаборатория. 1968. Т. 34, № 11. С. 1396-1397.
21. Бондаренко Г.В., Долгарева А.П. Рентгеноспектральный анализ тонких магнитных пленок с помощью спектрометра СПАРК-1 // Аппар. имет. рентг. анализа. Л.: Машиностроение. 1983. Вып. 31. С. 128-132.
22. Физический критерий качества фона как стандарта сравнения в рентгеноспектральном анализе / А.В. Конев [и др.] // Ж. аналит. химии. 1984. Т. 39, № 2. С. 197-203.
23. Учёт ненасыщенности излучателя в рентгеноспектральном анализе / А.В. Конев [и др.] // Ж. аналит. химии. 1984. Т. 39, № 3. С. 405-410.
24. Верховодов П.А., Молодецкая И.Е., Конев А.В. Рентгенофлуоресцентное определение благородных и цветных металлов в технологических продуктах // Ж. аналит. химии. 1975. Т. 30, № 3. С. 472-478.
25. Рентгеноспектральный анализ шламов и платиновых концентратов на благородные металлы / В.А. Шестаков [и др.] // Ж. аналит. химии. 1974. Т. 29, № 1. С. 2176-2180.
26. Бондаренко Б.Ю. Способ оперативной диагностики систематических погрешностей в рентгеноспектральном флуоресцентном анализе // Завод. лаборатория. 1990. Т. 56, № 7. С. 96-102.
27. Борходоев В.Я. Определение фона в каналах рентгенофлуоресцентного квантометра при анализе горных пород на основные компоненты // Ж. аналит. химии. 1987. Т. 42, № 2. С. 241-245.
28. Борходоев В.Я. Рентгенофлуоресцентный анализ горных пород способом фундаментальных параметров. СВКНИ И ДВО РАН. Магадан. 1999. 279 с.
29. Способ последовательных приближений с полуэмпирическими коэффициентами при рентгеноспектральном анализе геологических образцов / А.Г. Пятков [и др.] // Аппар. и мет. рентг. анализа. Л.: Машиностроение. 1975. Вып. 16. С. 56-61.
30. Рентгенорадиометрическое определение кобальта в железомарганцевых конкрециях океана / В.В. Иваненко [и др.] // Ж. аналит. химии. 1989. Т. 44, № 2. С. 351-355.
31. Развитие методов ядерно-физического анализа (ЯФА) элементного состава вещества в институте химии ДВО РАН / В.В. Иваненко [и др.] // Вестник ДВО РАН. 2002. № 4. С. 3-20.
32. Современные способы рентгеноспектрального флуоресцентного анализа / Н.Ф. Лосев [и др.] // Завод. лаборатория. 1968. Т. 34, № 8. С. 944-960.
33. Современное состояние рентгеноспектрального анализа / Н.Ф. Лосев [и др.] // Завод. лаборатория. 1977. Т. 43, № 2. С. 160-178.
34. Научные школы рентгеновской и рентгеноэлектронной спектроскопии России / Э.П. Домашевская [и др.]. Под ред. Э.П. Домашевской. Воронеж: Издательский дом ВГУ. 2015. 330 с.
35. Лабораторная служба ВИМСа им. Н.М. Федоровского / Г.В. Остроумов [и др.] // Ж. аналит. химии. 2002. Т. 57, № 8. С. 874-884.
36. «Николай Фомич Лосев». Иркутск: Типография «Оттиск». 2003. 56 с.
37. Аналитический отдел Института геохимии им. А.П. Виноградова / Л.Л. Петров [и др.]. // Ж. аналит. химии. 2003. Т. 58, № 12. С. 1300-1308.
38. Смагунова А.Н., Павлинский Г.В. Иркутская школа РСА // Ж. аналит. химии. 2005. Т. 60, № 2. С. 205-210.
39. Филиппов М.Н. Михаил Арнольдович Блохин (1908-1995) // Тез. докл. VI Всерос. конф. по РСА. 2008. Краснодар: КубГУ. С. 3-8.
40. Лапутина И.П. К истории группы рентгеноспектрального анализа института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии (ИГЕМ) РАН (РСМА ЛЛМВ ИГЕМ РАН) // Аналитика и контроль. 2009. Т. 13, № 4. С. 213-215.
41. Revenko A., Hoffmann P. Editorial // X-Ray Spectrom. 2010. V. 39, № 1. P. 1-2.
42. Смагунова А.Н. Развитие рентгенофлуоресцентного анализа // В кн.: Химики-аналитики о себе и о своей науке / Ред.-сост. Ю.А. Золотов, В.А. Шапошник. 2011. М.: Книжный дом «Либроком». С. 237-266.
43. Ильин Н.П. Рентгеноспектральные методы микроанализа // В кн.: Химики-аналитики о себе и о своей науке / Ред.-сост. Ю.А. Золотов, В.А. Шапошник. 2011. М.: Книжный дом «Либроком». С. 267-303.
44. Лаврентьев Ю.Г. Научные совещания по рентгеновской спектроскопии и рентгеноспектральному анализу как отражение процесса становления и развития отечественного рентгеноспектрального микроанализа // Аналитика и контроль. 2013. Т. 17, № 3. С. 252-274.
45. Ревенко А.Г. К 75-летию со дня рождения профессора Валерия Петровича Афонина // Аналитика и контроль, 2013. Т. 17, № 3. С. 358-364.
46. Смагунова А.Н., Ревенко А.Г. Развитие отечественного рентгенофлуоресцентного анализа (по материалам со-вещаний) // Ж. аналит. химии. 2014. Т. 69, № 3. С. 316-332.
47. Мурадин Кумахов: опередивший время. Жизнь и творчество / Сост. М.Г. Кумахов, А.М. Кумахов. Нальчик: Эльбрус, 2016. 216 с. (Серия «Наши знаменитости»).
48. Брытов И.А. Николай Иванович Комяк, организатор отечественного рентгеновского приборостроения, ученый и человек (к 90-летию юбилею) // Научное приборостроение. 2018. Т. 28, № 4. С. 21-23.
49. Ревенко А.Г., Дуймакаев Ш.И. Смагунова Антонина Никоновна - к 85-летию со дня рождения // Аналитика и контроль. 2019. Т. 23, № 2. С. 274-290.
50. Мазалов Л.Н. Рентгеновские спектры и химическая связь. Новосибирск: Наука. 1982. 111 с.
51. Мазалов Л.Н. Рентгеновские спектры. 2003. Новосибирск: ИНХ СО РАН, 329 с.

52. Мазалов Л. Возможности рентгеновской спектроскопии // Наука в Сибири. 1998 (15 мая). № 18 (2154).
53. Лаврентьев Ю.Г., Вайнштейн Э.Е. Влияние инструментальной ошибки на точность и чувствительность рентгеноспектрального анализа. Сообщение 1 // Ж. аналит. химии. 1965. Т. 20, № 9. С. 918-926.
54. Лаврентьев Ю.Г., Вайнштейн Э.Е. Влияние инструментальной ошибки на точность и чувствительность рентгеноспектрального анализа. Сообщение II // Ж. аналит. химии. 1965. Т. 20, № 10. С. 1033-1037.
55. Вайнштейн Э.Е., Лаврентьев Ю.Г. Современное состояние рентгеноспектрального определения следов элементов и перспективы его развития (обзор) // Ж. аналит. химии. 1966. Т. 21, № 4. С. 463-472.
56. Лаврентьев Ю.Г., Вайнштейн Э.Е. Оценка предела чувствительности рентгеноспектрального флуоресцентного анализа // Аппар. и мет. рентг. анализа. Л.: Машиностроение. 1968. Вып. 3. С. 3-18.
57. Лаврентьев Ю.Г., Вайнштейн Э.Е. Об оптимальных условиях рентгеноспектрального флуоресцентного анализа с предварительным концентрированием следов элементов // Завод. лаборатория. 1969. Т. 35. № 9. С. 1063-1067.
58. Лаврентьев Ю.Г. Выбор условий разбавления проб при рентгеноспектральном флуоресцентном анализе // Завод. лаборатория. 1969. Т. 35. № 12. С. 1452-1454.
59. Лаврентьев Ю.Г. Развитие рентгеноспектрального микроанализа в институте // В сб. «Институт геологии и геофизики СО (АН СССР и РАН) в воспоминаниях сотрудников-ветеранов института: Научные коллективы, люди, события, факты, антология самодетельной поэзии разных лет. СО РАН, Ин-т геологии и минералогии им. В.С. Соболева, Ин-т нефтегазовой геологии и геофизики им А.А. Трофимука. 2013. Новосибирск: Изд-во «Гео», ИНГГ СО РАН, С. 319-322.
60. Васильев В.И., Лаврентьев Ю.Г. Находка онофрида - селеносодержащей разновидности черного сульфида ртути – в ртутных рудах Алтае-Саянской области // Докл. АН СССР. 1968. Т. 182, № 2. С. 430-433.
61. Васильев В.И., Лаврентьев Ю.Г. Новая ртутьсодержащая разновидность сфалерита // Докл. АН СССР. 1969. Т. 186, № 4. С. 911-913.
62. Применение рентгеноспектрального микроанализа к изучению особенностей состава акцессорных минералов / В.И. Сотников [и др.] // Геол. и геофиз. 1970. № 9. С. 43-49.
63. Ассоциация оливин – гранат – хромдиопсид из якутского алмаза / Н.В. Соболев [и др.] // Докл. АН СССР. 1970. Т. 192, № 6. С. 1349-1352.
64. Годовиков А.А., Кочеткова К.В., Лаврентьев Ю.Г. Сульфотеллуриды висмута месторождения Сохондо // Зап. ВМО. 1971. Ч. 100, № 3. С. 257-265.
65. Васильев В.И., Лаврентьев Ю.Г. Блеклые руды ртутных месторождений // Геол. и геофиз. 1977. № 3. С. 56-63.
66. Васильев В.И., Лаврентьев Ю.Г., Пальчик Н.А. Шаховит (shahovite) – $Hg_8Sb_2O_{13}$ – новый гипергенный минерал // Геол. и геофиз. 1980. № 11. С. 128-132.
67. Лаврентьев Ю.Г., Васильев В.И. Рентгеноспектральный микроанализ гипергенных минералов ртути // Геол. и геофиз. 1981. № 11. С. 70-76.
68. Рентгеноспектральный микроанализ самородного золота / Ю.Г. Лаврентьев [и др.] // Геол. и геофиз. 1982. № 2. С. 83-87.
69. Афонин В.П., Перфильева Л.А., Лаврентьев Ю.Г. Программа для расчёта на ЭВМ концентраций элементов при рентгеноспектральном микроанализе проб разнообразного химического состава // Ежегодник – 1970. Иркутск. 1971. Сиб. ин-т геохимии СО АН СССР. С. 398-401.
70. Программа для вычисления результатов количественного рентгеноспектрального микроанализа многокомпонентных образцов / Ю.Г. Лаврентьев [и др.] // Аппар. и мет. рентг. анализа. Л.: Машиностроение. 1974. Вып. 13. С. 215-228.
71. "Карат" – программа для вычислений концентраций при количественном рентгеноспектральном микроанализе / Ю.Г. Лаврентьев [и др.] // Аппар. и мет. рентг. анализа. Л.: Машиностроение. 1980. Вып. 23. С. 217-224.
72. Лаврентьев Ю.Г., Усова Л.В. Новая версия программы «Карат» для количественного рентгеноспектрального микроанализа // Ж. аналит. химии. 1994. Т. 46, № 5. С. 462-468.
73. Васильев В.И., Лаврентьев Ю.Г. Новые данные о составе эггестонита // Докл. АН СССР. Серия Геология. 1986. Т. 287, № 4. С. 960-963.
74. Васильев В.И., Лаврентьев Ю.Г. Бромистый эггестонит $Hg_4(Cl,Br,I)_2O$ – новая разновидность оксихлорида ртути Hg_4Cl_2O // Геол. и геофиз. 1987. № 3. С. 117-121.
75. Рентгеноспектральный квантометрический микроанализ важнейших минералов кимберлитов / Ю.Г. Лаврентьев [и др.] // Геол. и геофиз. 1987. № 5. С. 75-81.
76. Лаврентьев Ю.Г., Усова Л.В. Выбор оптимального метода расчёта поправочных факторов при рентгеноспектральном микроанализе породообразующих минералов // Ж. аналит. химии. 1996. Т. 51, № 3. С. 323-331.
77. Korolyuk V.N., Lavrent'ev Yu.G., Reznitskii L.Z. Quantitative electron probe microanalysis of oxygen in compounds with pentavalent vanadium: an ultrastrong absorption phenomenon // X-Ray Spectrom. 2000. V. 29, № 6. P. 434-437.
78. Королюк В.Н., Усова Л.В., Нигматулина Е.Н. О точности определения состава основных породообразующих силикатов и оксидов на микроанализаторе JXA-8100 // Ж. аналит. химии. 2009. Т. 64, № 10. С. 1070-1074.
79. Некоторые особенности регистрации рентгеновского излучения на электронно-зондовом микроанализаторе JXA-8100 / В.Н. Королюк [и др.] // Ж. аналит. химии. 2010. Т. 65, № 3. С. 255-260.
80. Королюк В.Н., Нигматулина Е.Н. Регистрация М α -линии свинца в фосфатах редких земель на микроанализаторе JEOL JXA-8100 // Ж. аналит. химии. 2013. Т. 68, № 9. С. 865-872.
81. Рентгеноспектральный микроанализ породообразующих минералов на микроанализаторе JXA-8100 / Ю.Г. Лаврентьев [и др.] // Геол. и геофиз. 2015. Т. 56, № 10. С. 1813-1824.
82. Особенности рентгеноспектрального микроанализа азотсодержащих соединений / И.М. Куликова [и др.] // Завод. лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85, № 11. С. 5-18.
83. Лаврентьев Ю.Г., Усова Л.В. Сумма концентраций компонентов как показатель качества рентгеноспектрального микроанализа минералов // Геол. и геофиз. 2018. Т. 59, № 11. С. 1827-1835.
84. Лаврентьев Ю.Г., Карманов Н.С., Усова Л.В. Электронно-зондовое определение состава минералов: микроанализатор или сканирующий электронный микроскоп? // Геол. и геофиз. 2015. Т. 56, № 8. С. 1473-1482.
85. Поведение примесей благородных металлов при фракционной кристаллизации Cu-Fe-Ni-(Pt, Pd, Rh, Ir, Ru, Ag, Au, Te) сульфидных расплавов / Е.Ф. Синякова [и др.] // Геол. и геофиз. 2019. Т. 60., № 6. С. 820-842.
86. Физико-химические параметры магматизма вулканов Уксичан и Ичинский (срединный хребет Камчатки):

- данные по расплавленным включениям / Н.Л. Добрецов [и др.] // Геол. и геофиз. 2019. Т. 60, № 10. С. 1353-1383.
87. Павлова Л.А. Развитие рентгеноспектрального электронно-зондового микроанализа в Сибири // Ж. аналит. химии. 2008. Т. 63, № 12. С. 1311-1318.
88. Pavlova L.A. Contribution of Siberian researchers to the development of electron probe X-ray microanalysis // X-Ray Spectrom. 2010. V. 39, № 1. P. 3–11.
89. Лаврентьев Ю.Г. Электронно-зондовый анализ в геологии / В кн. "Химический анализ в геологии и геохимии". Новосибирск: Академическое изд-во "Гео", 2016. 622 с. Гл. 14. С. 298-317.
90. Preface / G.N. Kulipanov [et al.] // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. 2001. V. 470A. P. VII-X.
91. Кулипанов Г.Н., Скринский А.Н. Использование синхротронного излучения: состояние и перспективы // Успехи физических наук. 1977. Т. 122, № 3. С. 369-418.
92. Ревенко А.Г. Рентгеноспектральный флуоресцентный анализ природных материалов. Новосибирск: Наука, 1994. 264 с.
93. Ревенко А.Г. Рентгенофлуоресцентный анализ: состояние и тенденции развития (обзор) // Завод. лаборатория. 2000. Т. 66, № 10. С. 3-19.
94. Трунова В.А. Рентгенофлуоресцентный анализ с возбуждением синхротронным излучением — методология использования при исследовании специфических объектов // Докт. дисс. хим. наук: 02.00.02., Иркутск. 2018. 215 С.
95. Non-invasive methods for express analysis of biological objects based on elemental analysis using synchrotron radiation on hair samples from animals and patients / A.A. Vazina [et al.] // Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. 1998. V. 405A. P. 454-458.
96. Kolmogorov Y., Kovaleva V., Gonchar A. Analysis of trace elements in scalp hair of healthy people, hyperplasia and breast cancer patients with XRF method // Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. 2000. V. 448A, № 1-2. P. 457-460.
97. X-ray fluorescent analysis and atomic spectrometry for the bone's elemental composition determination / A.M. Gonchar [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. 2005. V. 543A, № 1. P. 271-273.
98. РФА СИ для исследования растений в зоне геологической неоднородности / Е.П. Храмова [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, Синхротронные и Нейтронные исследования. 2012. № 5. С. 86–89.
99. Химические элементы в сердечно-сосудистой системе кардиохирургических больных / Г.Н. Окунева [и др.] // Новосибирск. Академическое изд. «Гео». 2010. 183 с.
100. Chemical Elements and Structural/Molecular Properties of Myocardium in Infants with Transposition of Great Arteries / G.N. Okuneva [et al.] // Congenital Heart Disease - Selected Aspects. 2012. Chapter 15. P. 331-348.
101. Высококочувствительный рентгенофлуоресцентный анализ геологических проб с использованием синхротронного излучения / В.Б. Барышев [и др.] // Ж. аналит. химии. 1987. Т. 42, № 2. С. 232-240.
102. Применение синхротронного излучения для определения редкоземельных элементов в горных породах / А.Э. Гильберт [и др.] // Ж. аналит. химии. 1987. Т. 42, № 3. С. 477-485.
103. Synchrotron Radiation X-Ray Fluorescence Study of the Compositional Homogeneity of a Sediment Core from Lake Baikal / V.A. Trounova [et al.] // X-Ray Spectrom. 1996. V. 25, № 2. P. 55–59.
104. Reconstruction of glacier fluctuations in the East Sayan, Baikalsky and Kodar Ridges (East Siberia, Russia) during the last 210 years based on high-resolution geochemical proxies from proglacial lake bottom sediments / O.G. Stepanova [et al.] // Environ Earth Sci. 2015. V. 74, № 3. P. 2029-2040.
105. Применение метода РФА СИ для определения микроэлементного состава донных осадков оз. Хубсугул (Монголия). Поиск геохимических индикаторов осадко-накопления и вариаций палеоклимата в Байкальской рифтовой зоне / А.В. Дарьин [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2003. № 12. С. 45-48.
106. Sokolovskaya I.P., Trounova V.A., Kiprianova L.M. The investigation of element distributions in some aquatic higher plants and bottom sediments of Novosibirsk reservoir (data by SR-XRF techniques) // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. 2000. V. 448A. P. 449 – 452.
107. SRXFA for element compositions of bottom sediments from the Okhotsk Sea / E.L. Goldberg [et al.] // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. 2005. V. 543A. P. 280–283.
108. Первые результаты геохимического исследования рыхлых отложений пещеры-рудника Кан-и-Гут (Средняя Азия) методом РФА с использованием синхротронного излучения / Е.П. Базарова [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, Синхротронные и Нейтронные исследования. 2016. № 3. P. 103–106.
109. Полосьмак Н.В., Трунова В.А. Волосы из пазырыкских могил (метод исследования – рентгено-флуоресцентный анализ с использованием СИ) // Археол. этногр. антроп. Евр. 2004. № 1(13). С. 73-81.
110. Investigation of Organic Materials from the 'Royal' Burials of Xiongnu (Noin-Ula, Mongolia) by SRXRF and XAFS Methods / V. Trunova [et al.] // Archaeometry. 2015. V. 57, № 6. P. 1060-1077.
111. Mercury in archeological hair samples from Xiongnu burials (Noin-Ula, Mongolia): SR XRF and CXRM analysis» / V.V. Zvereva [et al.] // X-ray Spectrom. 2017. V. 46, № 6. P. 554-562.
112. Application of SR-XFA for identification of the basic composition of high-temperature superconductors / V.A. Trounova [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. 1991. V. 308A, № 1-2. P. 321-324.
113. Application of synchrotron radiation XRF analysis in high-temperature superconducting thin-film technology / V.A. Trounova [et al.] // X-Ray Spectrom. 1994. V. 23, № 4. P. 187-189.
114. Some methodical peculiarities of analysis of small-mass samples by SRXFA / A.F. Kudryashova [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. 1989. V. 282A, № 2-3. P. 673-676.
115. Geochemical identification of mare-type basalt groups from a lunar highland region (by INAA and SRXFA) / L.S. Tarasov [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. 1989. V. 282A, № 2-3. P. 669-672.
116. Geochemistry of rare elements in lunar basalt rocks based on SRXFA / L.S. Tarasov [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. 1989. V. 282A, № 2-3. P. 677-683.
117. Trace element distribution in lunar rocks of various titanium content by SR-XFA data / L.S. Tarasov [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. 1995. V. 359A, № 1-2. P. 312-316.
118. Geochemistry of trace elements in the highland lunar rocks based on SRXFA data / L.S. Tarasov [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. 1998. V. 405A, № 2-3. P. 590-598.
119. Particularities of rare element distribution in high-aluminium basalts from mare and highland regions of the Moon (based on SR-XFA data) / L.S. Tarasov [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. 2000. V. 448A, № 1-2. P. 376-383.
120. Geochemistry of rare elements in different types of lunar rocks (based on XFA-SR data) / V.B. Baryshev [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. 2001. V. 470A, № 1-2. P. 422–425.

121. Scanning SR-XRF beamline for analysis of bottom sediments / K.V. Zolotarev [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. 2001. V. 470A, № 1-2. P. 376-379.

122. Phedorin M.A., Bobrov V.A., Zolotarev K.V. SR-XFA on VEPP-3 of the bottom sediments of Lake Baikal to perform a paleoclimatic reconstruction // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res., 1998. V. 405 A, № 2-3. P. 560-568.

123. Bobrov V.A., Kalugin I.A., Phedorin M.A. SRXFA of element composition of bottom sediments from Teletskoye Lake // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. 1998. V. 405A, № 2-3. P. 569-571.

124. SR-XFA as a method of choice in the search of signals of changing palaeoclimates in the sediments of Lake Baikal, compared to INAA and ICP-MS / M.A. Phedorin [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. 2000. V. 448A, № 1-2. P. 394-399.

125. The comparison of biogenic silica, Br and Nd distributions in the sediments of Lake Baikal as proxies of changing paleoclimates of the last 480 kyr / M.A. Phedorin [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. 2000. V. 448A, № 1-2. P. 400-406.

126. Use of a scanning XRF analysis on SR beams from VEPP-3 storage ring for research of core bottom sediments from Teletskoe Lake with the purpose of high resolution quantitative reconstruction of last millennium paleoclimate / A.V. Daryin [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. 2005. V. 543A. P. 255-258.

127. Phedorin M.A., Goldberg E.L. Prediction of absolute concentrations of elements from SR XRF scan A measurements of natural wet sediments // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. 2005. V. 543A. P. 274-279.

128. Scanning SRXF analysis and isotopes of uranium series from bottom sediments of Siberian lakes for high-resolution climate reconstructions / E.L. Goldberg [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. 2005. V. 543A. P. 250-254.

129. Динамика ледника Перетолчина (Восточный Саян) в XX веке по донным осадкам прогляциального озера Эхой / О.Г. Степанова [и др.] // Геология и геофизика. 2015. V. 56, № 9. С. 1621-1629.

130. Tracing recent glacial events in bottom sediments of a glacial lake (East Sayan Ridge, Russia) from high-resolution SR-XRF, ICP-MS, and FTIR records / V.A. Trunova [et al.] // X-Ray Spectrom. 2015. V. 44, № 4. P. 255-262.

131. A 850-year record climate and vegetation changes in East Siberia (Russia), inferred from geochemical and biological proxies of lake sediments / A.P. Fedotov // Environ. Earth Sci. 2015. V. 73, № 12. P. 7297-7314.

132. Reconstruction of glacier fluctuations in the East Sayan, Baikalsky and Kodar Ridges (East Siberia, Russia) during the last 210 years based on high-resolution geochemical proxies from proglacial lake bottom sediments / O.G. Stepanova [et al.] // Environ. Earth Sci. 2015. V. 74, № 3. P. 2029-2040.

133. Impact of glacier changes on ecosystem of proglacial lakes in high mountain regions of East Siberia (Russia) / S.S. Vorobyeva [et al.] // Environ. Earth Sci. 2015. V. 74, № 3. P. 2055-2063.

134. Kumakhov M.A., Capillary optics and their use in X-ray analysis // X-Ray Spectrom. 2000. V. 29, № 5. P. 343-348.

135. Kumakhov M.A., Status of polycapillary optics and perspectives // Proc. SPIE. 2002. V. 4765. P. 20-25.

136. Handbook of Practical X-Ray Fluorescence Analysis / Ed. by B. Beckhoff [et al.]. Berlin/Heidelberg: Springer, 2006. 863 p.

137. Revenko A.G. Specific features of X-ray fluorescence analysis techniques using capillary lenses and synchrotron radiation // Spectrochim. Acta, Part B. 2007. V. 62, № 7. P. 567-576.

138. Трунова В.А., Зверева В.В. Метод рентгенофлуоресцентного анализа с использованием синхротронно-

го излучения: объекты исследования // Журн. структур. химии. 2016. Т. 57, № 7. С. 1401-1407.

139. Сороколетов Д.С., Ракшун Я.В., Дарьин Ф.А. Аппаратные функции поликапиллярной линзы и конфокального рентгеновского микроскопа при перестройке его конфокального объёма // Автометрия. 2015. № 3. С. 94-100.

REFERENCE

- Shcherbakov R.N. V.K. [Roentgen is the genius of simplicity and precision of the experiment]. Priroda [Nature], 2020, no. 2 (1254), pp. 54-66 (in Russian).
- Revenko A.G. [125 years since the discovery of X-rays]. Analitika i kontrol [Analytics and control], 2020, vol. 24, no. 1, pp. 66-79 (in Russian). DOI: 10.15826/analitika.2020.24.1.008
- Kalinin B.D. [X-ray radiation research and the development of X-ray engineering in St. Petersburg]. Analitika i kontrol [Analytics and control], 2020, vol. 24, no. 3, pp. 201-229 (in Russian). DOI: 10.15826/analitika.2020.24.3.005
- Berkhoer I.D., Komyak N.I., Mezhevich A.N., Sorin M.I. X-ray spectral analysis in the cement industry of the USSR. 1974. M. (Dopolnitel'nyye doklady /VI Mezhdunarodnyy kongress po khimii tsementa; Razdel 1) [(Suppl. report / VI Intern. Congress on the chemistry of cement], Sect. 1. 1-5. 169), 10 p. (in Russian)
- Blank A.B., Eksperiandova L.P. Specimen preparation in x-ray fluorescence analysis of materials and natural objects SiCl. X-Ray Spectrom., 1998, vol. 27, no. 3, pp. 147-160. Doi:10.1002/(SICI)1097-4539(199805/06)27:3<147::AID-XRS263>3.0.CO;2-P
- Karmanov V.I., Pokhodnya I.K. [X-ray spectral analysis with one standard and intensity correction on a computer]. Zavodskaya laboratoria [Industrial laboratory], 1972, vol. 38, no. 2, pp. 167-169 (in Russian).
- Legkova G.V., Voitkevich V.G., Sharkin O.P. [Electron-probe determination of the content of Fe²⁺ and Fe³⁺ in minerals (for example, amphiboles)]. Mineralogicheskiy zhurnal [Mineralogical journal], 1982, vol. 4, no. 4, pp. 90-94 (in Russian).
- Kochmola N.M., Bondarenko V.P. [Influence of the particle size of ores and their mixtures on the results of determination of calcium by the X-ray fluorescence method]. Zhurn. Analyt. Chem. [Journal of Analytical Chemistry], 1987, vol. 42, no. 7, pp. 1216-1220 (in Russian).
- Zagorodny V.V., Karmanov V.I., Gordeeva G.L. [X-ray fluorescence analysis of manganese agglomerates]. Zhurn. Analyt. Chem. [Journal of Analytical Chemistry], 1984, vol. 39, no. 3, pp. 498-503 (in Russian).
- Makarovskaya Ya.N., Eksperiandova L.P., Blank A.B. Sampling of Natural Water Using the Ultrasonic and Ultraviolet Decomposition of Humic Substances. Journal of Analytical Chemistry, 2003, vol. 58, no. 2, pp. 110-113. Doi: 10.1023/A:1022341601795
- Pivovarov A.V., Weinstein E.E. [On one method for eliminating focusing errors and increasing the luminosity of an X-ray spectrograph of the Cauchois type]. Zhurn. Analyt. Chem. [Journal of Analytical Chemistry], 1951, vol. 6, no. 6, pp. 386-387 (in Russian).
- Ilyukevich Yu.A., Demyanikov I.G., Gladyshev V.P. [On the method of increasing the accuracy of X-ray fluorescence analysis of powder samples of the products of concentration of non-ferrous metal ores]. Zhurn. Analyt. Chem. [Journal of Analytical Chemistry], 1978, vol. 33, no. 7, pp. 1427-1429 (in Russian).
- Mamaev V.E., Yuzvak L.A. [X-ray spectral determination of tantalum by fusion of the analyzed samples with a borax]. Apparatura i metody rentgenovskogo analiza [Equipment

- and methods of X-ray analysis], L.: SKBRA, 1969, Issue 4, pp. 176-179 (in Russian).
14. Paramonov F.P. [Determination of the concentration of elements by the selection of a theoretical standard]. *Izvestiya Akademii Nauk Kazakhskoi SSR. Seria Khimiya* [Bulletin of the Academy of Sciences of the Kazakh SSR. Seria chemistry], 1966, no. 3, pp. 97-98 (in Russian).
 15. Favinsky I.Ya. [Compensation of the effect of unsaturation in X-ray spectral fluorescence analysis using scattered radiation]. *Apparatura i metody rentgenovskogo analiza* [Equipment and methods of X-ray analysis], L.: Mashinostroenie Publ., 1972, Issue 10, pp. 143-147 (in Russian).
 16. Favinsky I.Ya., Pan'kov S.D., Smagunova A.N., Losev N.F. [Evaluation and accounting of the effect of particle size and chemical composition of batch samples during X-ray spectral analysis]. *Apparatura i metody rentgenovskogo analiza* [Equipment and methods of X-ray analysis], L.: Mashinostroenie Publ., 1977, Issue 19, pp. 32-36 (in Russian).
 17. Stulov B.A. [Application of the standard-background method for X-ray spectral fluorescence analysis of pulps]. *Zavodskaya laboratoriya* [Industrial laboratory], 1967, vol. 33, no. 12, pp. 1505-1507 (in Russian).
 18. Rudnevsky N.K., Mashin N.I. [X-ray spectral determination of the thickness of copper-nickel films on a sital substrate using one-component standards]. *Zavodskaya laboratoriya*. [Industrial laboratory], 1984, vol. 50, no. 9, pp. 22-24 (in Russian).
 19. Rehkolaian G.I. [Study of scattered X-ray radiation in the region of the L-fluorescence spectrum of rare-earth elements]. *Apparatura i metody rentgenovskogo analiza* [Equipment and methods of X-ray analysis], L.: Mashinostroenie Publ., 1972, Issue 11, pp. 89-94 (in Russian).
 20. Kravchenko-Berezhnoy R.A., Polezhaeva L.I. [Method of preparation of emitters for X-ray spectral analysis of powder materials]. *Zavodskaya laboratoriya* [Industrial laboratory], 1968, vol. 34, no. 11, pp. 1396-1397 (in Russian).
 21. Bondarenko G.V., Dolgareva A.P. [X-ray spectral analysis of thin magnetic films using a SPARK-1 spectrometer]. *Apparatura i metody rentgenovskogo analiza* [Equipment and methods of X-ray analysis], L.: Mashinostroenie Publ., 1983, Issue 31, pp. 128-132 (in Russian).
 22. Konev A.V., Grigoriev E.V., Sukhovolskaya N.E., Astakhova N.A., Rubtsova S.N. [Physical criterion of background quality as a comparison standard in X-ray spectral analysis]. *Zhurn. Analyt. Chem.* [Journal of Analytical Chemistry], 1984, vol. 39, no. 2, pp. 197-203 (in Russian).
 23. Konev A.V., Sukhovolskaya N.E., Smagunova A.N., Grigoriev E.V., Astakhova N.A. [Taking into account the unsaturation of the emitter in X-ray spectral analysis]. *Zhurn. Analyt. Chem.* [Journal of Analytical Chemistry], 1984, vol. 39, no. 3, pp. 405-410 (in Russian).
 24. Verkhovodov P.A., Molodetskaya I.E., Konev A.V. [X-ray fluorescence determination of noble and non-ferrous metals in technological products]. *Zhurn. Analyt. Chem.* [Journal of Analytical Chemistry], 1975, vol. 30, no. 3, pp. 472-478 (in Russian).
 25. Shestakov V.A., Arkhipov N.A., Makarov D.F., Kukushkin Yu.N. [X-ray spectral analysis of sludge and platinum concentrates for precious metals]. *Zhurn. Analyt. Chem.* [Journal of Analytical Chemistry], 1974, vol. 29, no. 1, pp. 2176-2180 (in Russian).
 26. Bondarenko B.Yu. [A method for prompt diagnosis of systematic errors in X-ray spectral fluorescence analysis]. *Zavodskaya laboratoriya* [Industrial laboratory], 1990, vol. 56, no. 7, pp. 96-102 (in Russian).
 27. Borkhodoev V.Ya. [Determination of the background in the channels of an X-ray fluorescence quantometer in the analysis of rocks for the main components]. *Zhurn. Analyt. Chem.* [Journal of Analytical Chemistry], 1987, vol. 42, no. 2, pp. 241-245 (in Russian).
 28. Borkhodoev V.Ya. *Rentgenofluorestsentyy analiz gornykh porod sposobom fundamental'nykh parametrov* [X-ray fluorescence analysis of rocks by fundamental parameter method]. NEISRI FEB RAS, Magadan. 1999, pp. 279 (in Russian).
 29. Pyatkov A.G., Eliseenko L.G., Romanenko I.M., Kozodoy G.I. [The method of successive approximations with semiempirical coefficients for X-ray spectral analysis of geological samples]. *Apparatura i metody rentgenovskogo analiza* [Equipment and methods of X-ray analysis], L.: Mashinostroenie Publ., 1975, Issue 16, pp. 56-61 (in Russian).
 30. Ivanenko V.V., Kustov V.N., Metelev A.Yu., Rakita K.A. [X-ray Radiometric Determination of Cobalt in Ferromanganese Nodules in the Ocean]. *Zhurn. Analyt. Chem.* [Journal of Analytical Chemistry], 1989, vol. 44, no. 2, pp. 351-355.
 31. Ivanenko V.V., Kustov V.N., Metelev A.Yu., Grigoriev A.I. [Development of methods of nuclear physical analysis (NPA) of the elemental composition of matter at the Institute of Chemistry of the Far Eastern Branch of the RAS]. *Vestnik dal'nevostochnogo Otdeleniya Rossiyskoy Akademii Nauk* [Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences], 2002, no. 4, pp. 3-20 (in Russian).
 32. Losev N.F., Smagunova A.N., Pavlinsky G.V., Afonin V.P., Gunicheva T.N., Revenko A.G. [Modern methods of X-ray spectral fluorescence analysis]. *Zavodskaya laboratoriya* [Industrial laboratory], 1968, vol. 34, no. 8, pp. 944-960 (in Russian).
 33. Losev N.F., Smagunova A.N., Revenko A.G., Pavlinsky G.V., Tarasenko S.A., Rozova O.F., Velichko Yu.I. [The current state of X-ray spectral analysis]. *Zavodskaya laboratoriya* [Industrial laboratory], 1977, vol. 43, no. 2, pp. 160-178 (in Russian).
 34. Domashevskaya E.P., Shulakov A.S., Sukhorukov V.L., Amusya M.Ya., Brytov I.A., Vinogradov A.V., Ivanova T.M., Narbutt K.I., Nefedov V.I., Kurmaev E.Z., Trapeznikov V.A., Teterin Yu.A., Shuvaev A.T. *Nauchnyye shkoly rentgenovskoy i rentgenoelektronnoy spektroskopii Rossii* [Scientific schools of X-ray and X-ray electron spectroscopy in Russia]. / Ed. E.P. Domashevskaya. Voronezh: Voronezh State University Publishing House, 2015, 330 pp. (in Russian)
 35. Ostroumov G.V., Lyubimova L.N., Malyshev V.I., Sidorenko G.A., Yakubovich A.L. *Laboratory Service at the Fedorovskii All-Russia Institute of Mineral Resources. Journal of Analytical Chemistry*, 2002, vol. 57, no. 8, pp. 739-747. Doi: 10.1023/A:1016886228542
 36. Nikolai Fomich Losev [Nikolai Fomich Losev]. Irkutsk: Publishing House "Imprint". 2003. 56 p. (in Russian).
 37. Petrov L.L., Vasilieva I.E., Gunicheva T.N., Kuznetsova A.I., Men'shikov V.I., Pavlova L.A., Prokopchuk S.I., Smirnova E.V., Finkelshtein A.L., Cykhanski V.D., Chumakova N.L. [Analytical Department of the Institute of Geochemistry]. *Journal of Analytical Chemistry*, 2003, no. 12, vol. 58, pp. 1165-1173. Doi: 0.1023/B:JANC.0000008957.71846.ca
 38. Smagunova A.N., Pavlinsky G.V. [The Irkutsk school of x-ray spectrochemical analysis]. *Journal of Analytical Chemistry*, 2005, vol. 60, no. 2, pp. 181-186. Doi: 10.1007/s10809-005-0058-1
 39. Filippov M.N. [Mikhail Arnol'dovich Blokhin (1908-1995)]. *Tez. Dokl. VI Vserossiyskoy konferencii po RSA* [Abstr. reports VI All-Russian Conference at the XRF], 2008, Krasnodar: Kuban State University, pp. 3-8 (in Russian).
 40. Laputina I.P. [On the history of the X-ray spectral analysis group of the Institute of Geology of Ore deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry (IGEM) of the Russian Academy of Sciences (RSMA LLMV IGEM RAS)]. *Analitika i kontrol'*

[Analytics and control], 2009, vol. 13, no. 4, pp. 213-215 (in Russian).

41. Revenko A., Hoffmann P. Editorial. X-Ray Spectrom., 2010, vol. 39, no. 1, pp. 1-2.
42. Smagunova A.N. [Development of X-ray fluorescence analysis]. In the book: Analytical chemists about themselves and their science / Eds.-comps. Yu.A. Zolotov, V.A. Shaposhnik, 2011, M.: Book House "Librokom". pp. 237-266.
43. Ilyin N.P. [X-ray spectral microanalysis methods]. In the book: Analytical chemists about themselves and their science / Eds.-comps. Yu.A. Zolotov, V.A. Shaposhnik, 2011, M.: Book House "Librokom". pp. 267-303.
44. Lavrent'ev Yu.G. [Scientific conferences on X-ray spectroscopy and to the X-Ray Spectral analysis as reflection of formation and development process of the Soviet/Russian X-Ray Spectral microanalysis]. Analitika i kontrol' [Analytics and control], 2013, vol. 17, no. 3, pp. 252-274 (in Russian). Doi: 10.15826/analitika.2013.17.3.001
45. Revenko A.G. [On the 75th anniversary of prof. V.P. Afonin's birth]. Analitika i kontrol' [Analytics and Control], 2013, vol. 17, no. 3, pp. 358-364 (in Russian). Doi:10.15826/analitika.2013.17.3.014
46. Smagunova A.N., Revenko A.G. Development of domestic X-ray fluorescence analysis (according to the materials of conferences). Journal of Analytical Chemistry, 2014. vol. 69, no. 3, pp. 316-332. Doi: 10.7868/S0044450214010149
47. Revenko A.G. [Meteor in the sky]. [Muradin Kumakhov: Ahead of time. Life and creativity]. Comps. M.G. Kumakhov, A.M. Kumakhov, Nalchik: Elbrus, 2016, pp. 109-116 (in Russian).
48. Brytov I.A. [Nikolay Ivanovich Komyak, organizer of Russian X-ray instrument making, scientist and person (for the 90th anniversary)]. Nauchnoe priborostroenie [Sci. Instrum. Making], 2018, vol. 28, no. 4, pp. 21-23 (in Russian).
49. Revenko A.G., Duymakaev Sh.I. [85th birthday anniversary of Antonina Nikonovna Smagunova]. Analitika i kontrol' [Analytics and control], 2019, vol. 23, no. 2, pp. 274-290 (in Russian).
50. Mazalov L.N. Rentgenovskiy spektry i khimicheskaya svyaz' [X-ray spectra and chemical bonding]. 1982, Novosibirsk: Science, 111 p. (in Russian)
51. Mazalov L.N. Rentgenovskiy spektry [X-ray spectra]. 2003. Novosibirsk: INCh SB RAS, 329 p. (in Russian)
52. Mazalov L. The possibilities of X-ray spectroscopy. Science in Siberia. 1998 (May 15). no. 18(2154) (In Russian).
53. Lavrent'ev Yu.G., Weinstein E.E. [Influence of instrumental error on the accuracy and sensitivity of X-ray spectral analysis. Message 1.] Zhurn. Analyt. Chem. [Journal of Analytical Chemistry], 1965, vol. 20, no. 9, p. 918-926 (in Russian).
54. Lavrent'ev Yu.G., Weinstein E.E. [Influence of instrumental error on the accuracy and sensitivity of X-ray spectral analysis. Message II]. Zhurn. Analyt. Chem. [Journal of Analytical Chemistry], 1965, vol. 20, no. 10, p. 1033-1037 (in Russian).
55. Weinstein E.E., Lavrent'ev Yu.G. [Current state of X-ray spectral fluorescence determination of trace elements and prospects for its development (review)]. Zhurn. Analyt. Chem. [Journal of Analytical Chemistry], 1966, vol. 21, no. 4, p. 463-472 (in Russian).
56. Lavrent'ev Yu.G., Weinstein E.E. [Evaluation of the sensitivity limit for X-ray spectral fluorescence analysis]. Apparatura i metody rentgenovskogo analiza [Equipment and methods of X-ray analysis], L., Mashinostroenie Publ., 1968, Issue 3, pp. 3-18.
57. Lavrent'ev Yu.G., Weinstein E.E. [Optimal conditions for X-ray spectral fluorescence analysis with preliminary concentration of trace elements]. Zavodskaya laboratoriya [Industrial laboratory], 1969, vol. 35, no. 9, pp. 1063-1067.

58. Lavrent'ev Yu.G. [Selection of sample dilution conditions for X-ray spectral fluorescence analysis]. Zavodskaya laboratoriya [Industrial laboratory], 1969, vol. 35, no. 12, pp. 1452-1454.
59. Lavrent'ev Yu.G. [Development of X-ray spectral microanalysis at the institute]. In sb. "Institute of Geology and Geophysics SB (USSR Academy of Sciences and RAS) in the memoirs of veteran employees of the institute: Research teams, people, events, facts, an anthology of amateur poetry of different years]. SB RAS, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, A.A. Trofimuk Institute of Oil and Gas Geology and Geophysics. 2013. Novosibirsk: Publishing House "Geo", INGG SB, pp. 319-322 (in Russian).
60. Vasiliev V.I., Lavrent'ev Yu.G. [The discovery of onophrite, a selenium-containing variety of black mercury sulfide, in mercury ores of the Altai-Sayan region]. Doklady Akademii nauk SSSR [Reports of the USSR Academy of Sciences], 1968, vol. 182, no. 2, pp. 430-433 (in Russian).
61. Vasiliev V.I., Lavrent'ev Yu.G. [A new mercury-containing variety of sphalerite]. Doklady Akademii nauk SSSR [Reports of the USSR Academy of Sciences], 1969, vol. 186, no. 4, pp. 911-913 (in Russian).
62. Sotnikov V.I., Nikitina E.I., Lavrent'ev Yu.G., Semenov V.I. [Application of X-ray spectral microanalysis to the study of the compositional features of accessory minerals]. Geologiya i Geofizika [Geology and Geophysics], 1970, no. 9, pp. 43-49 (in Russian).
63. Sobolev N.V., Bartoshinsky Z.V., Efimova E.S., Lavrent'ev Yu.G., Pospelova L.N. [Association olivine - garnet - chrome diopside from the Yakut diamond]. Doklady Akademii nauk SSSR [Reports of the USSR Academy of Sciences], 1970, vol. 192, no. 6, pp. 1349-1352 (in Russian).
64. Godovikov A.A., Kochetkova K.V., Lavrent'ev Yu.G. [Bismuth sulfellurides from the Sokhondo deposit]. Zapiski Vsesoyuznogo mineralogicheskogo obzchestva [Notes of the All-Union Mineralogical Society], 1971, vol. 100, no. 3, pp. 257-265 (in Russian).
65. Vasiliev V.I., Lavrent'ev Yu.G. [Faded ores of mercury deposits]. Geologiya i Geofizika [Geology and Geophysics], 1977, no. 3, pp. 56-63 (in Russian).
66. Vasiliev V.I., Lavrent'ev Yu.G., Palchik N.A. [Shahovite - $Hg_8Sb_2O_{13}$ - a new hypergene mineral]. Geologiya i Geofizika [Geology and Geophysics], 1980, no. 11, pp. 128-132 (in Russian).
67. Lavrent'ev Yu.G., Vasiliev V.I. [X-ray spectral microanalysis of hypergene mercury minerals]. Geologiya i Geofizika [Geology and Geophysics], 1981, no. 11, pp. 70-76 (in Russian).
68. Lavrent'ev Yu.G., Kuznetsova A.I., Nesterenko G.V., Malikov Yu.I. [X-ray microanalysis of native gold]. Geologiya i Geofizika [Geology and Geophysics], 1982, no. 2, pp. 83-87 (in Russian).
69. Afonin V.P., Perfilieva L.A., Lavrent'ev Yu.G. [Program for calculating on a computer the concentrations of elements in X-ray spectral microanalysis of samples of various chemical composition] Ezegodnik - 1970, Irkutsk, 1971, Siberian Institut geochimii Sibirskogo otdeleniya AN SSSR [Yearbook - 1970, Siberian Institute of Geochemistry, Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences], Irkutsk, 1971, pp. 398-401 (in Russian).
70. Lavrent'ev Yu.G., Afonin V.P., Berdichevsky G.V., Chernetskaya N.A., Pospelova L.N. [Program for calculating the results of quantitative X-ray spectral microanalysis of multicomponent samples]. Apparatura i metody rentgenovskogo analiza [Equipment and methods of X-ray analysis], L.: Mashinostroenie Publ., 1974, Issue 13, pp. 215-228 (in Russian).
71. Lavrent'ev Yu.G., Berdichevsky G.V., Chernyavsky L.I., Kuznetsova A.I. ["Karat" is a program for calculating

- concentrations in quantitative X-ray spectral microanalysis]. *Apparatura i metody rentgenovskogo analiza [Equipment and methods of X-ray analysis]*, L.: Mashinostroenie Publ., 1980, Issue. 23, pp. 217-224 (in Russian).
72. Lavrent'ev Yu.G., Usova L.V. [New version of the "Karat" software for quantitative X-ray spectral microanalysis]. *Zhurn. Analyt. Chem. [Journal of Analytical Chemistry]*, 1994, vol. 46, no. 5, pp. 462-468 (in Russian).
73. Vasiliev V.I., Lavrent'ev Yu.G. [New data on the composition of eglestonite]. *Doklady Akademii nauk SSSR [Reports of the USSR Academy of Sciences]*, 1986, vol. 287, no. 4, pp. 960-963. (in Russian)
74. Vasiliev V.I., Lavrent'ev Yu.G. [Eglestonite bromide $Hg_4(Cl,Br,I)_2O$ – a new type of mercury oxychloride Hg_4Cl_2O]. *Geologiya i Geofizika [Geology and Geophysics]*, 1987, no. 3, pp. 117-121 (in Russian).
75. Lavrent'ev Yu.G., Usova L.V., Kuznetsova A.I., Letov S.V. [X-ray spectral quantitative microanalysis of the most important minerals of kimberlites]. *Geologiya i Geofizika [Geology and Geophysics]*, 1987, no. 5, pp. 75-81 (in Russian).
76. Lavrent'ev Yu.G., Usova L.V. [Selection of the optimal method for calculating correction factors for X-ray spectral microanalysis of rock-forming minerals]. *Zhurn. Analyt. Chem. [Journal of Analytical Chemistry]*, 1996, vol. 51, no. 3, pp. 323-331 (in Russian).
77. Korolyuk V.N., Lavrent'ev Yu.G., Reznitskii L.Z. Quantitative electron probe microanalysis of oxygen in compounds with pentavalent vanadium: an ultrastrong absorption phenomenon. *X-Ray Spectrom.*, 2000, vol. 29, no. 6, pp. 434-437. Doi: 10.1002/1097-4539(200011/12)29:6<434::AID-XRS449>3.0.CO;2-N
78. Korolyuk V.N., Usova L.V., Nigmatulina E.N. Accuracy in the Determination of the Compositions of Main Rockforming Silicates and Oxides on a JXA-8100 Microanalyzer]. *Journal of Analytical Chemistry*, 2009, vol. 64, no. 10, pp. 1042-1046. Doi: 10.1134/S1061934809100128
79. Korolyuk V.N., Lavrent'ev Yu.G., Usova L.V., Nigmatulina E.N. [Some features of X-ray registration using a JXA-8100 electron-probe microanalyzer]. *Journal of Analytical Chemistry*, 2010, vol. 65, no. 3, pp. 249-254. Doi: 10.1134/S106193481003007X
80. Korolyuk V.N., Nigmatulina E.N. Recording lead Ma line in rare-earth phosphates using a JEOL JXA-8100 microanalyser. *Journal of Analytical Chemistry*, 2013, vol. 68, no. 9, pp. 781-789. Doi: 10.1134/S1061934813090062
81. Lavrent'ev Yu.G., Korolyuk V.N., Usova L.V., Nigmatulina E.N. [X-ray spectral microanalysis of rock-forming minerals with a JXA-8100 microanalyzer]. *Geologiya i Geofizika [Geology and Geophysics]*, 2015, vol. 56, no. 10, pp.1813-1824 (in Russian). Doi: 10.15372/GiG20151005
82. Kulikova I.M., Nabelkin O.A., Lavrent'ev Yu.G., Ivanov V.A. [Features of X-ray spectral microanalysis of nitrogen-containing compounds]. *Zavodskaya laboratoria, Diagnostika materialov [Industrial laboratory, Diagnostics of materials]*, 2019, vol. 85, no. 11, pp. 5-18 (in Russian). Doi: 10.26896/1028-6861-2019-85-11-5-18
83. Lavrent'ev Yu.G., Usova L.V. The sum of the concentrations of components as an indicator of the quality of X-ray microanalysis of minerals. *Geologiya i Geofizika [Geology and Geophysics]*, 2018, vol.59, no. 11, pp. 1827-1835 (in Russian). Doi: 10.15372/GiG20181106
84. Lavrent'ev Yu.G., Karmanov N.S., Usova L.V. [Electron probe microanalysis of minerals: microanalyzer or scanning electron microscope?] *Geologiya i Geofizika [Geology and Geophysics]*, 2015, vol. 56, no. 8, pp.1473-1482. Doi: 10.15372/GiG20150806
85. Sinyakova E.F., Kosyakov V.I., Borisenko A.S., Karmanov N.S. [Behavior of noble metals during fractional crystallization of Cu-Fe-Ni- (Pt, Pd, Rh, Ir, Ru, Ag, Au, Te) sulfide melts]. *Geologiya i Geofizika [Geology and Geophysics]*, 2019, vol. 60., no. 6, pp. 820-842. Doi: 10.15372/RGG2019050
86. Dobretsov N.L., Simonov V.A., Kotlyarov A.V., Karmanov N.S. [Physicochemical parameters of magmatism of the Uksichan and Ichinsky volcanoes (Sredinnyi ridge, Kamchatka): data on melt inclusions]. *Geologiya i Geofizika [Geology and Geophysics]*, 2019, vol. 60, no. 10, pp.1353-1383 (in Russian). Doi: 10.15372/RGG2019100
87. Pavlova L.A. [Development of X-ray electron probe microanalysis in Siberia]. *Journal of Analytical Chemistry*, 2008, vol. 63, no. 12, pp. 1199-1205. Doi: 10.1134/S1061934808120101
88. Pavlova L.A. Contribution of Siberian researchers to the development of electron probe X-ray microanalysis. *X-Ray Spectrom.*, 2010, vol. 39, no. 1, pp. 3–11. Doi: 10.1002/xrs.1228
89. Lavrent'ev Yu.G. Electron probe analysis in geology / In the book: "Chemical analysis in geology and geochemistry". Novosibirsk: Academic Publishing House "Geo", 2016, 622 p. Ch. 14, pp. 298-317.
90. Kulipanov G.N., Kuzin M.V., Kochubej D.I., Baryshev V.B. Preface. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.* 2001, vol. 470A, pp. VII-X.
91. Kulipanov G.N., Skrinisky A.N. [The use of synchrotron radiation: state and prospects]. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk [Progress Physical Sciences]*. 1977, vol. 122, no. 3, pp. 369-418 (in Russian).
92. Revenko A.G. Rentgenospektral'nyi fluorestsentnyi analiz prirodnikh materialov [X-ray Spectral Fluorescence Analysis of Natural Materials]. Novosibirsk: Nauka, 1994. 264 p. (in Russian).
93. Revenko A.G. Rentgenofluorestsentnyi analiz: sostoyaniye i tendentsii razvitiya (obzor) [X-ray Fluorescence Analysis: State and Development Trends (review). *Zavodskaya laboratoria [Industrial laboratory]*, 2000, vol. 66, no. 10, pp. 3-19.
94. Trunova V.A. X-ray fluorescence analysis with excitation by synchrotron radiation - a methodology for use in the study of specific objects. *Dokt. diss. chem. sci.: 02.00.02.*, Irkutsk, 2018, 215 p. (in Russian).
95. Vazina A.A., Gerasimov V.S., Gorbunova N.P., Sergienko P.M., Shelestova V.M., Nesterikhin Yu., Baryshev V.B., Zolotaryov V.K., Kulipanov G.N., Trunova V.A. Non-invasive methods for express analysis of biological objects based on elemental analysis using synchrotron radiation on hair samples from animals and patients. *Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res.*, 1998, vol. 405A, pp. 454-458. Doi: 10.1016/S0168-9002(97)00172-1
96. Kolmogorov Y., Kovaleva V., Gonchar A. Analysis of trace elements in scalp hair of healthy people, hyperplasia and breast cancer patients with XRF method. *Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res.*, 2000, vol. 448A, no. 1-2, pp. 457-460. Doi: 10.1016/S0168-9002(00)00236-9
97. Gonchar A.M., Kolmogorov U.P., Gladkikh E.A., Shuvaeva O.V., Beisel N.F., Kolosova N.G. X-ray fluorescent analysis and atomic spectrometry for the bone's elemental composition determination. *Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res.*, 2005, vol. 543A, no. 1, pp. 271-273. Doi: 10.1016/j.nima.2005.01.239
98. Khramova E.P., Boyarskikh I.G., Chankina O.V., Kutsenogii K.P. SR XRF Analysis for Studying Plants in an Area of Geological Heterogeneity. *Poverkhnost'. Rentgenovskie, Sinkhrotronnye i Neitronnye Issledovaniya [J. of Surf. Invest. Xray, Synchrotron and Neutron Techniques]*, 2012, vol. 6, no. 3, pp. 454–457. Doi: 10.1134/S1027451012050096
99. Okuneva G.N., Karas'kov F.M., Chernyavsky A.M., Loginova I.Yu., Levicheva E.N., Trunova V.A., Zvereva V.V., Volkov

- A.M., Kliver E.E., Zheleznyak S.I., Repezin S.A., Al'tov S.A., Vlasov Yu.A., Tarasenko O.A. Khimicheskiye elementy v serdechno-sosudistoy sisteme kardiokhirurgicheskikh bol'nykh [Chemical elements in the cardiovascular system of cardiac surgery patients]. Novosibirsk, Academic Publ. "Geo", 2010, 183 p. (in Russian).
100. Okuneva G.N., Karaskov A.M., Trunova V.A., Zvereva V.V., Kliever Ye.E., Volkov A.M., Vlasov Yu.A. Chemical Elements and Structural/Molecular Properties of Myocardium in Infants with Transposition of Great Arteries. *Congenital Heart Disease - Selected Aspects*, 2012, Ch. 15, pp. 331-348.
101. Baryshev V.B., Kulipanov G.N., Zaitsev E.V., Terekhov Ya.V., Kalyuzhny V.I. [Highly sensitive X-ray fluorescence analysis of geological samples using synchrotron radiation]. *Zhurn. Analyt. Chem. [Journal of Analytical Chemistry]*, 1987, vol. 42, no. 2, pp. 232-240 (in Russian).
102. Gilbert A.E., Koz'menko O.A., Baryshev V.B., Zolotarev K.V., Kulipanov G.N. [The use of synchrotron radiation for the determination of rare earth elements in rocks]. *Zhurn. Analyt. Chem. [Journal of Analytical Chemistry]*, 1987, vol. 42, no. 3, pp. 477-485 (in Russian).
103. Trounova V.A., Bobrov V.A., Zolotarev K.V., Pampura V.D. Synchrotron Radiation X-Ray Fluorescence Study of the Compositional Homogeneity of a Sediment Core from Lake Baikal. *X-Ray Spectrom.*, 1996, vol. 25, no. 2, pp. 55-59.
104. Stepanova O.G., Trunova, V.A., Zvereva, V.V., Melgunov M.S., Fedotov A.P. Reconstruction of glacier fluctuations in the East Sayan, Baikalsky and Kodar Ridges (East Siberia, Russia) during the last 210 years based on high-resolution geochemical proxies from proglacial lake bottom sediments. *Environ. Earth Sci.*, 2015, vol. 74, no. 3, pp. 2029-2040. Doi: 10.1007/s12665-015-4457-9
105. Daryin A.V., Zolotarev K.V., Kalugin I.A., Maksimova N.V. Application of SRXRF Analysis for Definition of Microelement Composition of Bottom Sediments from Hovsogol Lake (Mongolia). Search Geochemical Indicators for Processes of Sedimentation and Paleoclimate Variations in Baikal Rift Zone. *Poverkhnost'. Rentgenovskie, Sinkhrotronnye i Neitronnye Issledovaniya [J. of Surf. Invest. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques]*, 2003, no. 12, pp. 45-48.
106. Sokolovskaya I.P., Trounova V.A., Kiprianova L.M. The investigation of element distributions in some aquatic higher plants and bottom sediments of Novosibirsk reservoir (data by SR-XRF techniques). *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.*, 2000, vol. 448A, p. 449-452. Doi: 10.1016/0168-9002(00)00233-3
107. Goldberg E.L., Gorbarenko S.A., Shaporenko A.D., Phedorin M.A., Artemov A.V., Bosin A.A., Zolotarev K.V. SRXFA for element compositions of bottom sediments from the Okhotsk Sea. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.*, 2005, vol. 543A, pp. 280-283. Doi: 10.1016/j.nima.2005.01.241
108. Bazarova E.P., Markova Yu.N., Zolotarev K.V., Rakshun Ya.V., Ushchapovskaya Z.F. First Geochemical Data on Loose Sediments in the Kan-i-Gut Cave Mine (Central Asia) by Synchrotron Radiation XRF Analysis. *J. of Surf. Invest. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2016, vol. 10, no. 2, pp. 361-364.
109. Polosmak N.V., Trunova V.A. Hairs from Pazyryk graves (research method - X-ray fluorescence analysis using SR). *Arkheol. Etnogr. Antropol. Evraziya*, 2004, no. 1(13), pp. 73-81.
110. Trunova V., Zvereva V., Polosmak N., Kochubey D., Kriventsov V., Kuper K. Investigation of Organic Materials from the 'Royal' Burials of Xiongnu (Noin-Ula, Mongolia) by SRXRF and XAFS Methods. *Archaeometry*, 2015, vol. 57, no. 6, pp. 1060-1077. Doi: 10.1111/arcm.12109
111. Zvereva V.V., Trunova V.A., Sorokoletov D.S., Polosmak N.V. Mercury in archeological hair samples from Xiongnu burials (Noin-Ula, Mongolia): SR XRF and CXRF analysis. *X-ray Spectrom.*, 2017, vol. 46, no. 6, pp. 554-562. Doi: 10.1002/xrs.2798
112. Trunova V.A., Danilovich V.S., Baryshev V.B., Zolotarev K.V. Application of SR-XFA for identification of the basic composition of high-temperature superconductors. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res.*, 1991, vol. 308A, no. 1-2, p. 321-324. Doi: 10.1016/0168-9002(91)90659-E
113. Trounova V.A., Danilovich V.S., Zolotarev K.V., Predtechensii M.R., Bobrinok O.F. Application of synchrotron radiation XRF analysis in high-temperature superconducting thin-film technology. *X-Ray Spectrom.*, 1994, vol. 23, no. 4, pp. 187-189. Doi: 10.1002/xrs.1300230410
114. Kudryashova A.F., Tarasov L.S., Ulyanov A.A., Baryshev V.B. Some methodical peculiarities of analysis of small-mass samples by SRXFA. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res.* 1989, vol. 282A, no. 2-3, pp. 673-676. Doi: 10.1016/0168-9002(89)90079-X
115. Tarasov L.S., Kudryashova A.F., Ulyanov A.A., Baryshev V.B., Bobrov V.A., Shipitsyn Yu.G., Vertman E.G., Sudyko A.F. Geochemical identification of mare-type basalt groups from a lunar highland region (by INAA and SRXFA). *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res.*, 1989, vol. 282A, no. 2-3, pp. 669-672. Doi: 10.1016/0168-9002(89)90078-8
116. Tarasov L.S., Kudryashova A.F., Ulyanov A.A., Baryshev V.B., Zolotarev K.V. Geochemistry of rare elements in lunar basalt rocks based on SRXFA. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res.* 1989, vol. 282A, no. 2-3, pp. 677-683. Doi: 10.1016/0168-9002(89)90080-6
117. Tarasov L.S., Kudryashova A.F., Ulyanov A.A., Baryshev V.B., Zolotarev K.V. Trace element distribution in lunar rocks of various titanium content by SR-XFA data. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res.*, 1995, vol. 359A, no. 1-2, pp. 312-316. Doi: 10.1016/0168-9002(94)01658-5
118. Tarasov L.S., Kudryashova A.F., Ulyanov A.A., Baryshev V.B., Zolotarev K.V. v Geochemistry of trace elements in the highland lunar rocks based on SRXFA data. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res.*, 1998, vol. 405A, no. 2-3, pp. 590-598. Doi: 10.1016/S0168-9002(96)01124-2
119. Tarasov L.S., Kudryashova A.F., Ulyanov A.A., Baryshev V.B., Zolotarev K.V. Particularities of rare element distribution in high-aluminium basalts from mare and highland regions of the Moon (based on SR-XFA data). *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res.*, 2000, vol. 448A, no. 1-2, pp. 376-383. Doi: 10.1016/S0168-9002(99)00695-6
120. Baryshev V.B., Kudryashov A.F., Tarasov L.S., Ulyanov A.A., Zolotarev K.V. Geochemistry of rare elements in different types of lunar rocks (based on XFA-SR data). *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res.*, 2001, vol. 470A, no. 1-2, pp. 422-425. Doi: 10.1016/S0168-9002(01)01089-0
121. Zolotarev K.V., Goldberg E.L., Kondratyev V.I., Kulipanov G.N., Miginsky E.G., Tsukanov V.M., Phedorin M.A., Kolmogorov Yu.P. Scanning SR-XRF beamline for analysis of bottom sediments. *Nucl. Instrum. Methods A*, 2001, vol. 470, no. 1-2, pp. 376-379. Doi: 10.1016/S0168-9002(01)01073-7
122. Phedorin M.A., Bobrov V.A., Zolotarev K.V. SR-XFA on VEPP-3 of the bottom sediments of Lake Baikal to perform a paleoclimatic reconstruction. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A*, 1998, vol. 405, no. 2-3, pp. 560-568. Doi: 10.1016/S0168-9002(97)00177-0
123. Bobrov V.A., Kalugin I.A., Phedorin M.A. SRXFA of element composition of bottom sediments from Teletskoye

- Lake. Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A, 1998, vol. 405, № 2-3, pp. 569-571. Doi:10.1016/S0168-9002(96)01057-1
124. Phedorin M.A., Bobrov V.A., Goldberg E.L., Navez J., Zolotaryov K.V., Grachev M.A. SR-XFA as a method of choice in the search of signals of changing palaeoclimates in the sediments of Lake Baikal, compared to INAA and ICP-MS. Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A, 2000, vol. 448, no. 1-2, pp. 394-399. Doi: 10.1016/S0168-9002(99)00721-4
125. Phedorin M.A., Goldberg E.L., Grachev M.A., Levina O.L., Khlystov O.M., Dolbnya I.P. The comparison of biogenic silica, Br and Nd distributions in the sediments of Lake Baikal as proxies of changing paleoclimates of the last 480 kyr. Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A, 2000, vol. 448, no. 1-2, pp. 400-406. Doi: 10.1016/S0168-9002(99)00726-3
126. Daryin A.V., Kalugin I.A., Maksimova N.V. et al. Use of a scanning XRF analysis on SR beams from VEPP-3 storage ring for research of core bottom sediments from Teletskoe Lake with the purpose of high resolution quantitative reconstruction of last millennium paleoclimate. Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A, 2005, vol. 543, no. 1, pp. 255-258. Doi: 10.1016/j.nima.2005.01.217
127. Phedorin M.A., Goldberg E.L. Prediction of absolute concentrations of elements from SR XRF scan measurements of natural wet sediments. Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A, 2005, vol. 543, no. 1, pp. 274-279. Doi: 10.1016/j.nima.2005.01.240
128. Goldberg E.L., Grachev M.A., Chebykin E.P., Phedorin M.A., Kalugin I.A., Khlystov O.M., Zolotarev K.V. Scanning SRXF analysis and isotopes of uranium series from bottom sediments of Siberian lakes for high-resolution climate reconstructions. Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A, 2005, vol. 543, no. 1, pp. 250-254. Doi: 10.1016/j.nima.2005.01.216
129. Stepanova O.G., Trunova V.A., Zvereva V.V., Mel'gunov M.S., Petrovskii S.K., Krapivina S.M., Fedotov A.P. Reconstruction of the peretolchin glacier fluctuation (east sayan) during the 20th century inferred from the bottom sediments of proglacial lake Ekhoi. Geologiya i Geofizika [Geology and Geophysics]. 2015, vol. 56, no. 9, pp. 1621-1629. Doi: 10.15372/GiG20150904
130. Trunova V.A., Stepanova O.G., Zvereva V.V., Sidorina A.V., Melgunov M.S., Petrovskii S.K., Rakshun Ya.V., Fedotov A.P. Tracing recent glacial events in bottom sediments of a glacial lake (East Sayan Ridge, Russia) from high-resolution SR-XRF, ICP-MS, and FTIR records. X-Ray Spectrom., 2015, vol. 44, no. 4, pp. 255-262. Doi: 10.1002/xrs.2616
131. Fedotov A.P., Trunova V.A., Enushchenko I.V., Vorobyeva S.S., Stepanova O.G., Petrovskii S.K., Melgunov M.S., Zvereva V.V., Krapivina S.M., Zheleznyakova T.O. A 850-year record climate and vegetation changes in East Siberia (Russia), inferred from geochemical and biological proxies of lake sediments. Environ. Earth Sci., 2015, vol. 73, no. 12, pp. 7297-7314. Doi: 10.1007/s12665-014-3906-1
132. Stepanova O.G., Trunova V.A., Zvereva V.V., Melgunov M.S., Fedotov A.P. Reconstruction of glacier fluctuations in the East Sayan, Baikalsky and Kodar Ridges (East Siberia, Russia) during the last 210 years based on high-resolution geochemical proxies from proglacial lake bottom sediments. Environ. Earth Sci., 2015, vol. 74, no. 3, pp. 2029-2040. Doi: 10.1007/s12665-015-4457-9
133. Vorobyeva S.S., Trunova V.A., Stepanova O.G., Zvereva V.V., Petrovskii S.K., Melgunov M.S., Zheleznyakova T.O., Chechetkina L.G., Fedotov A.P. Impact of glacier changes on ecosystem of proglacial lakes in high mountain regions of East Siberia (Russia). Environ. Earth Sci., 2015, vol. 74, no. 3, pp. 2055-2063. Doi: 10.1007/s12665-015-4164-6
134. Kumakhov M.A. Capillary optics and their use in X-ray analysis, X-Ray Spectrom., 2000, vol. 29, no. 5, pp. 343-348. Doi: 10.1002/1097-4539(200009/10)29:5<343::AID-XRS414>3.0.CO;2-S
135. Kumakhov M.A. Status of polycapillary optics and perspectives, Proc.SPIE, 2002, vol. 4765, pp. 20-25. Doi: 10.1117/12.489770
136. Handbook of Practical X-Ray Fluorescence Analysis / Ed. by B. Beckhoff [et al.]. Berlin/Heidelberg: Springer, 2006. 863 p.
137. Revenko A.G. Specific features of X-ray fluorescence analysis techniques using capillary lenses and synchrotron radiation. Spectrochim. Acta, Part B, 2007, vol. 62, no. 7, pp. 567-576. Doi:10.1016/j.sab.2007.04.019
138. Trunova V.A., Zvereva V.V. X-Ray fluorescent analysis using synchrotron radiation: Subjects of research. J. Struct. Chem., 2016, vol. 57, no. 7, pp. 1327-1333. Doi: 10.1134/S0022476616070052
139. Sorokoletov D.S., Rakshun Ya.V., Dar'in F.A. [Hardware functions of a polycapillary lens and a confocal X-ray microscope during restructuring of its confocal volume]. Avtometriya [Autometry], 2015, no. 3, p. 94-10 (in Russian).