

УДК 543.427.42

## РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНЫЙ АНАЛИЗ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

© 2023 г. А. Г. Ревенко<sup>а</sup> \*, Г. В. Пашкова<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук  
ул. Лермонтова, 128, Иркутск, 664033 Россия

\*e-mail: xray@crust.irk.ru

Поступила в редакцию 10.04.2023 г.

После доработки 26.04.2023 г.

Принята к публикации 27.04.2023 г.

В обзоре обсуждаются особенности и возможности применения вариантов рентгенофлуоресцентного метода анализа (РФА) при исследовании жидких и твердых образцов. Основное внимание уделено работам, опубликованным за последние 10 лет. Информацию о применении РФА из работ предыдущего периода можно найти в обзорах и монографиях. Рассмотрены результаты экспериментов по определению атомных фундаментальных параметров, таких как массовые коэффициенты поглощения, выходы флуоресценции, вероятности переходов с испусканием отдельных линий конкретных элементов, вероятности безрадиационных переходов и др., а также возможности сконструированных в последние годы новых моделей спектрометров РФА. Более детально обсуждается применение для различных объектов варианта РФА с полным внешним отражением. Представлены данные по применению РФА при исследованиях наночастиц для некоторых типичных материалов. Такие частицы обладают качественно новыми свойствами и являются предметом изучения нанотехнологии, бурно развивающейся в последние десятилетия.

**Ключевые слова:** рентгенофлуоресцентный анализ, фундаментальные параметры, геология, космохимия, биология, наночастицы.

**DOI:** 10.31857/S0044450223110130, **EDN:** MNFDQX

Цель настоящего обзора – обсудить особенности и возможности применения вариантов рентгенофлуоресцентного метода анализа (РФА) при исследовании жидких и твердых образцов. Основное внимание уделено работам, опубликованным за последние 10 лет. В рассматриваемый период вышли в свет обзоры по различным аспектам РФА [1–32]. В ряде обзоров рассмотрены различные проблемы применения варианта метода РФА с полным внешним отражением [3, 17–22, 25, 31, 32]. В монографиях и учебных пособиях [33–42] изложены физические основы и методические рекомендации по применению РФА в различных областях исследований. В рассматриваемый период ушли из жизни коллеги-классики. Их жизненный путь и вклад в развитие РФА отражен в публикациях [10, 11, 40, 43–57]. Отметим, что книга Дуймакаева и соавт. [40] открывается разделом “Биографии”, в котором представлена информация об учителях и коллегах (М.А. Блохин, Н.Ф. Лосев, А.Н. Смагунова, В.П. Афонин, Г.В. Павлинский, А.П. Никольский, Р.И. Плотников, В.И. Карманов). В биографическом справочнике [43] можно найти информацию о докторрах наук, членах Научного совета по аналитической

химии (НСАХ РАН) Р.Л. Баринском, Д.А. Гоганове, М.А. Кумахове, Т.А. Куприяновой, А.Н. Смагуновой и А.Л. Якубовиче, в книге [51] – о М.А. Кумахове и А.Л. Якубовиче. В работах [44, 45] Ильин и Смагунова делятся мыслями об истории развития рентгеноспектрального микроанализа и РФА. Калинин в статье “Памяти ученого” [48] обсудил творческий путь Р.И. Плотникова (1928–2015).

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНОГО АНАЛИЗА

Развитие теоретических основ РФА стимулируется как необходимостью преодоления возникающих проблем при решении новых аналитических задач, так и новыми возможностями метода в связи с совершенствованием используемой аппаратуры. Так, например, современные технические разработки позволяют выполнять более точные и надежные эксперименты по определению атомных фундаментальных параметров.

Исследования влияния гетерогенности при РФА ультрамелких частиц показали, что даже при “мокром” измельчении порошков с добавлением этанола в случае зерен размером <10 мкм происхо-

дит агрегирование и обволакивание более крупных зерен мелкими зернами другого химического состава, что изменяет характер зависимости интенсивности рентгеновской флуоресценции от крупности частиц, особенно если флуоресцируют крупные зерна [58]. Результаты гранулометрического и электронно-зондового рентгеноспектрального микроанализа позволили глубже понять природу выявленных эффектов. Данные гранулометрического анализа порошков, обработанных ультразвуком, подтвердили гипотезу образования агрегатов. Проблемы, возникающие при РФА гетерогенных порошковых образцов сложного фазового состава, рассмотрены также в работе [59]. В работе [60] экспериментально изучена зависимость интенсивности рентгеновской флуоресценции  $FeK\alpha$ -линии от расстояния между спектрометром и анализируемым образцом для  $Fe$ -содержащих материалов. Большое число работ посвящено исследованию природы составляющих рентгеновского фона и оценке вклада в суммарный фон отдельных его составляющих [61–66]. Авторы работ [67–70] оценили вклад эффекта избирательного (дополнительного) возбуждения в интенсивность аналитических линий при рентгенофлуоресцентном анализе как насыщенных, так и ненасыщенных образцов. Теоретические и экспериментальные результаты исследования процессов рассеяния рентгеновского излучения и их вклада в интенсивность спектров рентгеновской флуоресценции приведены в публикациях [71–74]. Зависимость аналитического сигнала элементов с малым атомным номером от энергии первичных фотонов исследована в работе [75]. Борхоев в работах [76, 77] обсудил понятие предела обнаружения и его связь с пределом определения в РФА.

Представляют интерес разработанные под руководством Чезарео варианты определения толщины тонких слоев металлических предметов, представляющих историческую ценность. Ряд работ был посвящен восстановлению слоистой структуры серебра на позолоченной маске и определению однородности и толщины пластин  $Au$ ,  $Ag$  и  $Pb-Sn$ . Получение информации о химическом составе и толщине различных слоев для многослойных структур стало возможным благодаря измерению отношения интенсивностей разных рентгеновских линий определенных элементов, например  $Au(L\alpha/L\beta)$ ,  $Ag(K\alpha/K\beta)$ ,  $Cu(K\alpha/K\beta)$ ,  $Fe(K\alpha/K\beta)$ ,  $Pb(L\alpha/L\beta)$ , а также линий разных элементов, например  $AuL\alpha/AgK\alpha$ ,  $AuL\alpha/CuK\alpha$ ,  $PbL\alpha/SnK\alpha$  и  $ZnK\alpha/FeK\alpha$ . Соотношение интенсивностей различных линий зависит от различия в эффектах ослабления, а также в расположении слоев. Теоретическая основа эффектов поглощения детально описана в работах Чезарео и соавт. Ссылки на эти работы можно найти в обзоре [26]. Отношения  $K\alpha/K\beta$  и  $L\alpha/L\beta$  могут сильно варьироваться, если рассматриваемый слой не является “бесконеч-

но тонким”, и когда он покрывается слоем материала другого элемента. Теоретические оценки и результаты экспериментальной проверки представлены авторами для позолоты, серебрения и сплавов тумбаги всех типов, которые чрезвычайно распространены в металлургии некоторых народов. Этот подход применялся также в работах Трожек и соавт. [26].

**Оценка фундаментальных параметров.** Для определения содержаний элементов с использованием РФА очень важно знание таких фундаментальных параметров, как массовые коэффициенты поглощения, выходы флуоресценции, вероятности переходов с испусканием отдельных линий конкретных элементов (относительные интенсивности линий), вероятности безрадиационных переходов, химические эффекты, сечения электронной ионизации и др. [34–36, 41]. Однако опубликованные данные либо имеют низкое качество, либо определены с большой неопределенностью. Это особенно характерно для элементов с очень малыми атомными номерами  $Z$  и диапазоном энергий от 0.1 до 0.3 кэВ.

Современные технические разработки позволяют выполнять более точные и надежные эксперименты по определению атомных фундаментальных параметров. Измерения с применением РФА в настоящее время широко применяются в таких разнообразных областях, как биология и медицина, нанотехнологии, производство полупроводников и солнечная энергетика, криминалистика, исследование культурных ценностей и космохимия, и число их растет. Расширение границ применения РФА (определение содержаний элементов с очень малыми атомными номерами, исследование распределения элементов в наноматериалах) требует критической оценки имеющихся данных, связанных с взаимодействием рентгеновского излучения с веществом, т.е. фундаментальных параметров. Эта проблема была отмечена на Европейской конференции по рентгеновской спектрометрии (EXRS2008), состоявшейся в июне 2008 г. в г. Цавтате (Хорватия). В рамках Европейской ассоциации рентгеновской спектрометрии (EXSA) была выдвинута совместная инициатива для преодоления различий в качестве и неполноте существующих фундаментальных параметров рентгеновского излучения, что являлось серьезным ограничением дальнейшего развития рентгеновских методов анализа. Были организованы экспертные группы по разным направлениям работ, проводились ежегодные семинары с участием 25–40 специалистов, в результате чего в 2012 г. была разработана первая “дорожная карта” по уточнению фундаментальных параметров для рентгеновского диапазона длин волн [78, Р. 22].

Перечисленные мероприятия активизировали теоретические и экспериментальные работы по

оценке и уточнению значений фундаментальных параметров. В 2017 г. эксперты выработали вторую “дорожную карту” [78, Р. 2], в которой подвели итоги проделанной работы и уточнили ориентиры на следующий период. Представленные в настоящем обзоре публикации [79–97] отражают лишь малую часть выполненных исследований. Следует отметить результаты активно работающих в этой области коллег из Федерального физико-технического института РТВ (Берлин, Германия) – Б. Бекхоффа, П. Хенике и М. Кольбе.

**Аппаратура.** В зависимости от режима возбуждения аналитические методы, основанные на применении рентгеновского излучения, можно разделить на три большие группы: методы электронного пучка, протонного пучка и рентгеновского (фотонного) пучка, каждый из которых обладает своим специфическим набором преимуществ и недостатков. В каждой группе методов рентгеноспектрального анализа (РСА) различают разные варианты. Например, для варианта с электронным пучком – это электронно-зондовый микроанализ и РСА с электронным возбуждением. Тематика настоящего обзора охватывает несколько вариантов третьей группы, основанных на возбуждении атомов исследуемых образцов рентгеновским излучением. Это следующие варианты спектрометров:

– Рентгеновские спектрометры с дисперсией по длинам волн (ВДРФА) [36, 37, 41];

– Портативные энергодисперсионные рентгенофлуоресцентные (ЭДРФА) спектрометры [23, 24, 98];

– РФА с полным внешним отражением (РФА ПВО) [3, 19, 21, 22, 39];

– РФА с возбуждением флуоресценции синхротронным излучением (СИРФА) [99, 100];

– Сочетание возможностей варианта капиллярной рентгеновской оптики Кумахова и ВДРФА или варианта с синхротронным излучением (СИРФА + микроРФА) [35, 99–101];

– Некоторые модели рентгеновских спектрометров предполагают выбор варианта изменения спектрального распределения первичного излучения рентгеновских трубок (применение фильтров первичного излучения, поляризаторов, вторичных излучателей и др.) [16, 102–105].

Один из вариантов РФА ПВО получил название “рентгеновская флуоресценция скользящего падения” (РФСП; grazing incidence X-ray fluorescence, GIXRF). Обзор этого варианта РФА ПВО представлен Тивари [106]. Используя комбинированные исследования рентгеновской рефлектометрии и GIXRF, можно получить точный и последовательный набор микроструктурных параметров тонкослойного образца, нанесенного на поверхность подложки. Автор описывает примеры, демонстрирующие возможности, предлагаемые комбинированным подходом к анализу. Из-

мерения GIXRF позволяют также получить характеристики абсорбированных примесей на различных поверхностях с разрешением по глубине. Изменяя скользящий угол падения рентгеновского луча, можно менять чувствительность падающего рентгеновского луча по глубине внутри материала образца до уровня нанометров. Вариант метода впервые продемонстрирован в 1983 г. Вскоре после этого он был признан мощным техническим средством для неразрушающих исследований наноструктурированных материалов с разрешением по глубине [106].

Обычно в работах не обсуждаются причины выбора конкретного варианта РФА. Можно полагать, что основные параметры при выборе рентгеновского спектрометра – это стоимость оборудования и опубликованные данные о метрологических характеристиках коммерчески доступных спектрометров. Ниже кратко рассмотрим результаты исследований российских авторов [107–110]. В работе [107] предложен вариант двухслойного композитного детектора рентгеновского излучения, состоящего из Si-детектора (слой 1) и Ge-детектора (слой 2). Применение этого типа детекторов в энергодисперсионных рентгеновских спектрометрах должно обеспечить более низкий уровень фона. Китов и др. [110] сконструировали и испытали лабораторный образец сепаратора, показавший высокую степень извлечения алмазов из смеси различных минералов.

## ПРИМЕНЕНИЕ РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНОГО АНАЛИЗА

**Особенности и возможности применения рентгенофлуоресцентного анализа с полным внешним отражением.** Методические подходы при РФА ПВО. Среди вариантов РФА, активно развивающихся в последние десятилетия, лидером по публикациям является РФА ПВО, поэтому мы решили остановиться более подробно на особенностях этого метода. Описание физических принципов РФА ПВО и основные его отличия от традиционного РФА можно найти в монографии Клокенкампера и фон Болена [39], а также в обзорах [3, 31, 111]. В настоящем обзоре основное внимание уделено развитию РФА ПВО для элементного анализа жидких и порошкообразных проб. Возможности РФА ПВО при исследовании пленок и поверхности описаны в обзоре [26].

Поскольку при РФА ПВО в образовании рентгеновской флуоресценции участвует очень малое количество вещества на подложке, особое внимание уделяется выбору способа подготовки проб. Детальный обзор, описывающий основные способы подготовки проб к РФА ПВО, опубликован Де Ла Калле и сотр. [17]. Можно выделить следующие основные варианты подготовки проб: 1) без предварительной подготовки либо с мини-

мальной подготовкой проб к анализу; 2) подготовка суспензий; 3) минерализация; 4) подготовка образца на подложке *in situ*; 5) методы разделения и концентрирования.

Основной целью пробоподготовки к РФА ПВО, как правило, является получение тонкого слоя высушенной пробы на подложке-отражателе с равномерным распределением внутреннего стандарта. Толщина “тонкого” излучающего слоя (поверхностная плотность) может быть рассчитана с учетом массовых коэффициентов ослабления аналита и внутреннего стандарта [39]. Такие расчеты для разных матриц можно найти в работах [112–115]. Для экспериментального изучения влияния химического состава и концентрации матрицы на результаты РФА ПВО используют модельные смеси и растворы [112, 116]. Гомогенность излучателя на подложке и распределение внутреннего стандарта можно проверить с использованием микроРФА [117], морфологию, размер и форму пятна на подложке контролируют с помощью различных методов микроскопии [115, 117, 118]. Методом РФА скользящих углов падения (GIXRF) изучают образование стоячих волн и изменение интенсивности сигнала при разных способах подготовки проб [115, 119].

Среди предложенных новых подходов, направленных на получение однородного сухого остатка пробы минимального размера, можно отметить лиофилизацию капли на подложке-отражателе [120], применение гидрофобного покрытия, центр которого частично растворяется ацетоном, и высушивание капли при ее вибрации [121], покрытие кварцевой подложки алмазоподобным углеродом DLC [122], нанесение слоя резиста [123].

Для уменьшения влияния матрицы и более равномерного распределения биологических жидкостей на подложке иногда достаточно простой процедуры разбавления водой либо раствором поверхностно-активного вещества [117]. На примере анализа молока показано, что разбавление пробы водой позволяет устранить эффекты поглощения излучения элементов в низкоэнергетической области спектра (P, S, Cl, K, Ca) [114, 124]. В работе [125] рекомендуется жидкости с высокой концентрацией неорганических солей разбавлять раствором Triton X-100, а жидкости с высоким содержанием органических веществ – этанолом, что повышает правильность анализа по сравнению с разбавлением образца просто водой. Для рассолов также показано, что разбавление раствором Triton X-100 позволяет избежать кристаллизации солей и достичь более равномерного распределения внутреннего стандарта [112].

В работах [115, 126, 127] изучено влияние органической матрицы сахарозы при анализе сахаросодержащих напитков. Рассмотрены наиболее распространенные способы подготовки проб:

прямой, заключающийся в анализе исходного образца, разбавление водой и кислотное разложение. Сделан вывод, что при анализе напитков с высоким содержанием сахара необходимо использовать разложение пробы для устранения матричных эффектов при РФА ПВО, разбавление водой в этом случае оказалось неэффективным способом. При анализе порошковых образцов в виде суспензий особое внимание уделяется влиянию размера частиц на результаты РФА ПВО [128]. Особенно жесткие требования к размеру частиц предъявляются при анализе геологических материалов. Если для традиционного РФА подходят порошки с размером частиц менее 75 мкм, то для РФА ПВО средний размер частиц должен быть менее 10–20 мкм [113]. Мокрое измельчение позволило получить модальное распределение частиц со средним размером менее 5 мкм и показало свою эффективность при анализе руд [129].

Для повышения стабильности суспензии используют различные агенты. Шаранов и сотр. [130] для минимизации влияния осаждения частиц предложили использовать в качестве дисперсионной среды жидкости с высокой вязкостью: глицерин и этиленгликоль.

Иногда пробы для измерений готовят непосредственно на подложке-отражателе. Можно отметить оригинальную работу Мальцева и сотр. [131], в которой для определения состава апатита микрокристалл наносили на подложку и растворяли в азотной кислоте, а в качестве внутреннего стандарта использовали фосфор, концентрацию которого рассчитывали с учетом стехиометрии.

В практику РФА ПВО продолжают внедряться способы разделения и концентрирования, например, для определения Hg [132–134], U [135–137], As [138, 139]. Малков и сотр. [140] сравнили различные способы пробоподготовки при определении Ni, Cu и Co в морской воде и показали, что эффективным является предварительное экстракционное концентрирование металлов в виде диэтилдитиокарбаматных комплексов с последующей реэкстракцией. В обзоре работ сотрудников кафедры аналитической химии химфака МГУ [141] описаны преимущества новых методических подходов к сорбционно- и экстракционно-рентгенофлуоресцентному определению ионов металлов в воде на спектрометре РФА ПВО. Концентрирование благородных металлов с использованием гетероцепных азотсодержащих сорбентов с последующим определением Os, Ir, Pt, Au из малых навесок твердых концентратов в виде суспензий описано в работе [142].

Для расчета концентраций аналитов, как правило, применяют способ внутреннего стандарта с использованием чувствительностей, определенных с помощью стандартных растворов. Для устранения вклада матричных эффектов строят эмпирические

градуировки с помощью образцов известного состава с матрицей, подобной анализируемым пробам [118, 142–147]. Добавляя внутренний стандарт в градуировочные образцы, можно рассчитать чувствительности элементов, учитывающие матрицу анализируемой пробы [116]. Для дополнительного учета наложений линий в спектре используют различные варианты многомерных градуировок [148–151]. В качестве аналитического параметра при построении градуировочных функций возможно использование отношения интенсивности аналитической линии к интенсивности рассеянного излучения [118, 142, 143]. В работе [152] отношение Compton/Rayleigh позволило разделить на группы образцы разного по составу молока. Описан [153] новый способ определения P, S, K, Ca и Fe в растительных образцах, основанный на использовании отношения интенсивности аналитической линии к интенсивности  $K\alpha$  линии аргона.

Среди источников погрешностей при РФА ПВО наибольший вклад, как правило, вносит отбор представительной аликвоты, ее нанесение и высушивание. Оценивание расширенной неопределенности, включающей различные погрешности, возникающие при подготовке проб, определении и расчете концентраций, можно найти в работах [154–157].

*Примеры применения РФА ПВО.* Наиболее распространенными объектами анализа являются вода [19], пищевые продукты [13, 20], биологические материалы [13, 31, 158], что отражено в соответствующих обзорах. Например, применению РФА ПВО для анализа пищевых продуктов посвящен обзор Боргезе и соавт. [20], в котором выделены следующие основные объекты анализа: 1) напитки, 2) овощи, фрукты, травы и специи, 3) зерновые, 4) продукты животного происхождения, 5) пищевые добавки. Жидкие пищевые продукты и напитки (вино [159–161], виски [162], соки [160], пиво [163], молоко [114, 124], питьевую воду [164]) можно анализировать без специальной подготовки либо после простого разбавления водой. В работе [160] определяли содержания элементов в вине и соке с использованием как РФА ПВО, так и традиционного ЭДРФА. Если для проведения РФА ПВО достаточно высушить аликвоту пробы на кварцевой подложке, то для традиционного варианта РФА вино подвергают лиофильной сушке, а затем полученный порошок помещают в пластиковую кювету, дно которой покрыто майларовой пленкой. Показано, что элементы Fe, Cu, Zn, Br, Rb и Sr, определенные с помощью обоих методов РФА, можно использовать для географической идентификации вина. Для анализа жидкого молока с помощью ВДРФА требуется предварительная длительная сушка пробы, а в случае РФА ПВО можно проводить экспрессное определение P, S, Cl, K, Ca, Mn, Fe, Cu, Zn, Br, Rb и Sr в

разбавленном молоке животного и растительного происхождения [114, 124].

Анализ напитков без предварительной подготовки жидких проб может сопровождаться потерей чувствительности и ограничением круга определяемых элементов, влиянием углеводородной матрицы. В некоторых работах сравниваются возможности прямого анализа и различных способов разложения пробы при анализе виски [162], пива [163], спиртовых напитков [165], сахаросодержащих напитков [115, 126, 127].

Довольно большое количество работ посвящено анализу чая [166–172]. Определяют состав как чайных листьев, так и их настоев. Экспрессная методика приготовления суспензий из чайных листьев осложняется влиянием размера частиц. Однако суспензии могут использоваться в сочетании с процедурой кислотного разложения чайных листьев для определения летучих элементов, таких как Cl и Br [168, 170].

Анализ образцов мяса [173], пшеничной муки [174], сухого молока [146], моллюсков [175] и других различных растительных продуктов [147, 176] возможен в виде суспензий. Определение элементного состава витаминно-минеральных комплексов также возможно с использованием растворения и суспендирования [177, 178]. Для водорастворимых витаминов достаточно растворить таблетку в воде. Малорастворимые образцы измельчают и готовят в виде суспензий в этиленгликоле, чтобы избежать процедуры вскрытия образца, упростить и ускорить анализ [178].

Среди последних работ по применению РФА ПВО в биологии и медицине можно отметить определение состава мочевых камней малого размера после микроволнового разложения [179]. Методические подходы при анализе тканей человека с различным содержанием жира (толстая кишка, сердце, печень, легкие, мышцы, кишечник, кожа, желудок, матка, мочевой пузырь и аорта) описаны в работе [180]. Показано, что для тканей с более высоким содержанием жира (например, кожи и кишечника) лучшей стратегией является кислотное разложение образца, однако для других тканей приемлемые результаты получены при суспендировании порошкообразного материала в 2 М  $\text{HNO}_3$ .

При экологическом мониторинге с помощью РФА ПВО изучают состав почв [181], аэрозолей [182]. Содержания тяжелых металлов и различных токсичных элементов в образцах растительного происхождения (иголах сосны [181], водных растений [183], листьях деревьев [184]) также служат индикаторами загрязнения окружающей среды.

В отличие от традиционного РФА, метод РФА ПВО не является рутинным методом анализа твердотельных образцов с минеральной матрицей, но возможности метода постоянно расширяются. В Институте земной коры СО РАН ведутся

исследования по применению РФА ПВО для анализа геологических (руд, конкреций, осадков, минералов) и археологических образцов (керамики, глины), что отражено в обзоре [185]. Шаранов и Алов [186] представили обзор исследований, проводимых на кафедре аналитической химии химфака МГУ, по определению элементного состава твердотельных объектов металлургической промышленности (каменного угля, кокса, медноцинковых руд) методом РФА ПВО. Там же метод РФА ПВО используется [187, 188] для определения состава синтезированных образцов. Исследования, выполняемые в Индии Мисра и Дхара [25], направлены на развитие метода РФА ПВО в области анализа радиоактивных веществ и ядерных материалов.

Среди необычных объектов анализа можно отметить шерсть домашних животных [189], косметические образцы [190], эссенциальные масла [191], автомобильные шины [192]. При судебно-медицинской экспертизе важен анализ остатков выстрелов огнестрельного оружия. В работе [193] ватной палочкой, смоченной в азотной кислоте, собирали частицы с тыльной стороны ладони, выщелачивали и определяли Pb, Ba, Cu. В работе [194] остатки выстрелов из огнестрельного оружия на хлопчатобумажной ткани разлагали в концентрированной азотной кислоте и определяли Pb, Cu, Ba, Sb, Fe, и Zn.

Метод РФА ПВО не позволяет определять форму нахождения элемента в пробе, но появляются первые работы по исследованию влияния окружения элемента в спектре образца. В работе [93] продемонстрированы значительные различия между металлическим золотом(0) и хлоридом золота(3+). Влияние химического окружения также наблюдалось для Pb, PbS и Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> [93]. Разработан прямой метод оценки степеней окисления урана по соотношению интенсивностей *M*- и *L*-линий рентгеновского излучения [195].

Перечисленные примеры применения РФА ПВО не охватывают все работы, опубликованные за последние 10 лет, но даже они ясно демонстрируют широкие возможности этого метода при анализе разнообразных объектов.

**Применение рентгенофлуоресцентного анализа в геологии.** Геология – это традиционная область применения РФА. Казалось бы, что все проблемы, связанные с анализом таких проб, давно уже должны быть решены. Однако совершенствуется аппаратура, повышаются требования к метрологическим характеристикам, появляются новые задачи – все это подталкивает и стимулирует специалистов, работающих в этой области на поиск новых более оптимальных решений. Можно отметить следующие тенденции:

– Широкое применение в полевых условиях небольших (массой 2–3 кг) портативных рентге-

новских спектрометров с возможностями, близкими к тем, что характерны для больших настольных приборов [16, 23];

– Разработка методик анализа малых количеств материала [196–199];

– Обычным стало определение содержаний элементов с малым атомным номером (B, C, N, O, F) [200, 201] и некоторых элементов, проблематичных для определения методом РФА в горных породах (Sc, Br, Sn, PЗЭ, Hf, Ta, W) [202–206];

– Снижение нижней границы определяемых содержаний для большинства химических элементов [203–206];

– Определение содержаний элементов с разной валентностью [93, 207–210].

В ряде публикаций представлены результаты исследований по разработке методик анализа руд, алмазов и угля [14, 206, 211–216]. Выше отмечено, что вариант РФА ПВО применяется при исследованиях разнообразных геологических материалов: природной воды [112, 138, 140, 141], горных пород, почв и отложений [131, 143–145, 155, 197], руд [113, 129, 150] и др.

В небольшой по объему монографии Бахтиярова и Савельева [37] четвертая глава посвящена РФА минерального сырья. В одном разделе этой главы рассмотрены особенности РФА горных пород и почв (отдельно микроэлементы и силикатный анализ). В другом разделе обсуждены вопросы анализа руд и продуктов их переработки. Книга адресована работникам аналитических лабораторий и может служить учебным пособием.

Хашке [35] в главе 7 “Применения” (треть объема монографии) рассмотрел в параграфе “Анализ драгоценных камней” как пример исследование образца турмалина (Мадагаскар), в параграфе “Анализ керна отложения из скважины” обсудил картирование керна с шагом 30 мкм (химический состав и толщина слоев позволяют получать информацию о климате и загрязнениях окружающей среды в прошлом) и в параграфе “Анализ геологических образцов” представил информацию о РФА урановых руд; марганцевых конкреций; ультралегких элементов.

Наибольший интерес с точки зрения охвата разнообразных геологических объектов представляет “Руководство по рентгенофлуоресцентному анализу”, подготовленное Виллис и соавт. [36]. Авторы подробно рассмотрели ключевые этапы анализа: подготовка проб, выбор аналитических линий и условий их измерения, градуировка и рекомендуемые стандартные образцы, учет наложения линий и фона, взаимные влияния элементов. В книге представлена конкретная информация по методикам РФА угля, карбонатов (доломиты, магнезиты и известняки), сульфидных и оксидных руд (Cr-, Mn-, Cu-, Zn- и Pb-руды), железных, никелевых, алюминиевых, урановых и ториевых руд.

**Применение рентгенофлуоресцентного анализа в космохимии.** Космохимия – наука о химическом составе космических тел, законах распространения и распределения элементов во Вселенной, процессах сочетания и миграции атомов при образовании космического вещества. Материалы неземного происхождения изучаются с использованием одного из следующих вариантов: 1) в лабораторных условиях (образцы доставляются на Землю); 2) отбор проб непосредственно на поверхности других планет и исследование их химического состава с помощью приборов, доставленных на эти планеты; 3) определение химического состава горных пород на поверхности небесных тел на основе регистрации рентгеновской флуоресценции, возбуждаемой солнечным потоком рентгеновского излучения; 4) при падении метеоритов на поверхность Земли. Основное внимание нами уделено вариантам 2–4.

Публикации по этой тематике за последние 10 лет можно классифицировать по исследуемым объектам: метеориты [217–228], планеты и спутники планет в пределах Солнечной системы – Луна [229–238], Марс [239–249], Меркурий [250–257], Европа [258]; астероиды [259], кометы [260], космическая пыль [261].

*Метеориты* – малые тела Солнечной системы, попадающие на поверхность Земли из межпланетного пространства. Основным источником метеоритов считают пояс астероидов. В некоторых случаях на Землю попадают метеориты с Марса и Луны. Все эти внеземные материалы имеют большую ценность для науки, так как они обеспечивают дополнительную информацию о телах нашей Солнечной системы. Метеориты имеют размеры от нескольких мм до нескольких метров и массу от долей грамма до десятков тонн. Ежедневно на Землю из межпланетного пространства выпадает около 10 т метеоритного вещества. Метеориты диаметром около двух метров врезаются в атмосферу Земли примерно раз в месяц. Однако найти удастся обычно только единичные осколки этих образцов. Различают железные и каменные метеориты.

До второй половины 20 века химические процессы в космическом пространстве и состав космических тел исследовали в основном путем спектрального анализа вещества Солнца, звезд, отчасти внешних слоев атмосферы планет. Единственным прямым методом изучения космических тел был анализ химического и фазового состава метеоритов. Найденные на Земле фрагменты космического вещества подвергаются детальному изучению всеми доступными методами. Большой вклад в исследование метеоритов внесло применение электронно-зондового рентгеноспектрального микроанализа. Тысячи метеоритов были найдены в течение последних нескольких десятилетий в жарких пустынях мира, например в Омани, Север-

ной Африке, Саудовской Аравии и Австралии, пустыне Атакама и в США. Тем не менее эти космические породы остаются уникальными, редкими и драгоценными образцами, помогающими нам понять раннюю эволюцию Солнечной системы.

В работе Зурфлюх и соавт. [219] для исследования метеоритов использовали прибор NITON XL3t-600 (США), энерго-дисперсионный РФ-анализатор, откалиброванный для геологических образцов. Он оснащен миниатюрной рентгеновской трубкой с Au-анодом (максимум 50 кВ, 2 Вт и 40 мА) и тремя фильтрами первичного пучка для обеспечения оптимального возбуждения разных элементов. Авторы оценили два режима измерения, предлагаемых фирмой для этого прибора: “почвенный” и “горный” режимы. “Почвенный” режим использует метод отношения интенсивности элемента к интенсивности комптоновского пика (способ стандарта/фона). “Горный” режим основан на способе фундаментальных параметров (СФП). Алгоритмы на основе СФП учитывают матричные эффекты (решаются численно методом итераций). Интенсивность комптоновского рассеянного излучения используется для представления суммы всех элементов, которые не определяются непосредственно по их характеристическому излучению (такие как O, N и т.д.), но которые вносят вклад в интенсивность этого излучения. Авторы использовали исключительно “горный” режим для этого исследования, так как предварительные тесты показали, что для образцов метеоритов он более надежен и более точен по сравнению с “почвенным” режимом. Использование “горного” режима позволило подобрать градуировочную кривую. Это особенно важно, так как матрица метеоритов отличается от земных пород.

В 2007 г. в Аналитический центр ИЗК СО РАН был представлен для исследования образец размером 90 × 35 мм. Образец имел характерные признаки метеоритов, в частности, сглаженные выступы и ямки. Для этого образца выполнено определение относительных содержаний ряда элементов на рентгеновском энергодисперсионном спектрометре с поляризатором. Установлено, что основными компонентами этого образца являются Fe и Ni в соотношении ~(40–50) : 1, т.е. содержание железа составляет ~96–98% и содержание никеля 2–3%. Отмечено наличие кобальта (<0.5%). Содержание остальных элементов в диапазоне от Ti до Pb оказалось пренебрежимо малым. Таким образом, химический состав образца подобен Сихотэ-Алинскому метеориту. Для более тщательного исследования необходимо частичное разрушение образца.

*Исследования Луны.* В 1970 г. космическая станция “Луна-17” доставила на Луну самоходный аппарат “Луноход-1”. С помощью установленного на “Луноходе-1” рентгенорадиометрического анали-

затора “РИФМА” было выполнено 25 анализов лунного грунта. Через два года “Луна-21” позволила “прилунить” “Луноход-2” (1973). На рентгеновском флуоресцентном спектрометре “РИФМА-М” выполнены сотни определений химического состава лунного грунта. Данные о химическом составе лунного грунта, полученные с помощью рентгеновских спектрометров на “Луноходе-1” и “Луноходе-2”, позволили доказать, что Море Дождей и дно кратера Лемонье образованы типичными породами морских базальтов, в то время как для горных пород возвышенной местности вокруг кратера Лемонье характерны более высокие содержания Fe, Si, Al и K [217]. Исследования лунного грунта были продолжены в ходе выполнения экспедиций “Аполлон-15”, “Аполлон-16” и советскими космическими станциями.

В 21 веке к работам по исследованию Луны присоединились Китай, Индия и другие страны. В последние 10 лет публикации по применению РФА для решения задач лунной программы в основном посвящены оценкам рентгеновского спектрометра APXS – одного из приборов для ровера “Чандраян-2” (Индия) [229, 230, 232]. В качестве радиоизотопного источника для него выбран  $^{244}\text{Cm}$ , излучающий альфа-частицы с энергией 5.8 МэВ и рентгеновское излучение с энергиями 14.3 и 18.4 кэВ. К сожалению, второй индийский лунный зонд “Чандраян-2” вышел на окололунную орбиту, но при спуске на лунную поверхность посадочный модуль разбился о поверхность Луны.

В работах [234, 236] представлены результаты оценки условий возбуждения характеристического рентгеновского излучения электронным пучком для дистанционного рентгеноспектрального элементного анализа поверхностных горных пород на безатмосферных небесных телах, в частности на Луне. Авторы работы [236] обсуждают вопросы, требующие решения при проектировании будущих лабораторных комплексов на Луне или Марсе, а также рекомендуют набор минимального оборудования.

Приведем здесь слова известных специалистов Марова и Хантресса [238] “Космическая гонка – феномен холодной войны, но, как и авиационная гонка в первой половине XX века, она привела к взрывному развитию научных, прикладных исследований и технологий. Состязание в исследованиях между СССР и США шло не только в области пилотируемых полетов на Луну, но одновременно также в запусках автоматических космических аппаратов к Луне и планетам Солнечной системы – Венере и Марсу.” И далее: “Советская программа создания автоматических космических аппаратов, содержащая, наряду с успехами, много драматических событий, стимулировалась стремлением к технологическим достижениям, желанием международного признания и восхищения. Она

достигла и того и другого. Советские космические роботы были первыми на Луне, первыми на Венере и первыми на Марсе.”

*Исследования Марса.* Работы последнего десятилетия по марсианской тематике посвящены в основном испытаниям приборов и методик РФА в рамках подготовки к будущим экспедициям.

В заключение этого раздела необходимо отметить высокий уровень работ по применению РФА для исследования химического состава материалов в космохимии. В ряде работ авторы детально оценивают влияние неопределенности калибровки и изменения в интенсивности аналитических линий, которые связаны с физическими и композиционными неоднородностями в таких материалах.

**Применение рентгенофлуоресцентного анализа в биологии и медицине.** По этой проблеме опубликовано большое число обзорных работ. Это – обзоры общего характера [13, 31, 147, 158], обзоры, посвященные анализу чая, кофе, молока, напитков и других пищевых продуктов [8, 20, 27, 114, 127], применению в медицине [28, 29], исследованиям растительных материалов [30]. Основные области применения РФА в биологии и медицине: определение содержаний основных и токсичных элементов в растениях, продуктах питания, образцах костей, зубов, волос, ногтей, тканей жизненно важных органов, жидкостей организма, таких как кровь, сыворотка, плазма, слюна и др. Как правило, эти исследования являются частью прикладных программ, включающих экологические исследования и контроль метаболических процессов в организме человека.

**Применение рентгенофлуоресцентного анализа при исследовании наночастиц.** Наночастицы являются предметом изучения для нанотехнологий, бурно развивающейся в последние десятилетия. Термин “нанотехнология” впервые был использован в 1974 г. японским ученым Танигучи при обсуждении проблем обработки хрупких материалов. РФА успешно применяется при исследованиях в материаловедении и при разработке новых лекарственных препаратов, а также методов их адресной доставки. В медицинских системах термин “нано” появился в 21 веке в связи с использованием драгоценных металлов (Ag, Au и Pt). Наночастицы (НЧ) считались фундаментальными строительными блоками нанотехнологий. Синтезированные НЧ характеризуют комплексом методов, включая УФ- и инфракрасную спектроскопию с преобразованием Фурье, рентгеновскую дифракцию, динамическое рассеяние света, просвечивающую электронную микроскопию, ЭДРФА и РФА ПВО [13, 29, 262–264].

Разработки в области нанотехнологий находят применение практически в любой отрасли. Однако уже исследования начального периода показали, что наноматериалы могут неблагоприятно влиять

на здоровье человека [265]. В связи с расширением зон применения НЧ защита дыхательной системы человека от воздействия переносимых по воздуху наночастиц стала новой проблемой здравоохранения. В результате воздействия НЧ отмечается повышенная заболеваемость и смертность. Структуры наноматериалов с большей вероятностью могут быть токсичными, однако очень мало известно об их взаимодействии с биологическими системами. В обзоре [265] исследуются возможные основные механизмы токсичности наночастиц после ингаляционного воздействия. Очень важно распознать потенциальный риск воздействия НЧ, используя соответствующие методы испытаний на токсичность. Авторы обсуждают текущие достижения и ограничения методов оценки токсичности НЧ.

Рентгеновские методы визуализации НЧ, такие как РФА и просвечивающая рентгеновская микроскопия, используют реже, чем, например, варианты метода масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (МС-ИСП). Однако МС-ИСП может создавать только двумерные изображения для элементного распределения, а метод микроРФА позволяет генерировать трехмерные изображения. Рентгеновский пучок, используемый для СИРФА, может обеспечить пространственное разрешение от 1 до 10 мкм, а в некоторых случаях можно получить пространственное разрешение <100 нм (использование зонных пластинок Френеля) [266, 267]. Любек и соавт. (2013) на синхротроне Bessy использовали размер пучка 40 мкм (в вертикальной плоскости) × 140 мкм (в горизонтальной) [268].

Несмотря на отсутствие необходимого пространственного разрешения, РФА с использованием стандартных рентгеновских спектрометров с дисперсией по длине волны предоставляет важную информацию при исследованиях нанопорошков. Так, применение РФА позволило впервые оценить антибактериальную активность смесей биоактивного стекла и двухфазного фосфата кальция [269]. Нанопорошки готовили золь-гель методом. Для решения указанной задачи кроме РФА использовали рентгеновскую дифракцию и два варианта электронной микроскопии. Авторы пришли к выводу, что при определенной пропорции нанопорошков их смесь может найти применение в стоматологии и ортопедии.

Рентгеновская флуоресцентная компьютерная томография (РФКТ) — это метод, который позволяет идентифицировать, определять содержание и местонахождение элементов внутри объектов путем регистрации рентгеновской флуоресценции, возбуждаемой источником возбуждения, например синхротроном. Однако вариант с синхротроном ограничивает доступность РФКТ для рутинных приложений биомедицинского картирования. Авторы работы [270] разработали вариант выполне-

ния РФКТ на настольном приборе с обычными полихроматическими источниками рентгеновского излучения и использовали его для точного отображения распределения наночастиц золота, введенных мыши с опухолью. Распределение этих НЧ, определенное с помощью настольной РФКТ, подтверждено с помощью МС-ИСП. Это исследование продемонстрировало значительное (до двух порядков величины) повышение чувствительности и специфичности обнаружения и определения Au НЧ с помощью настольной РФКТ по сравнению с обычной рентгеновской КТ. Результаты также подтвердили уникальные возможности настольной РФКТ для одновременного определения пространственного распределения и концентрации нерадиоактивных металлических зондов, таких как Au НЧ, в контексте картирования мелких животных.

Группа специалистов из лаборатории Атомного института (Вена, Австрия) использовала микро- и нанорентгеновскую флуоресцентную спектрометрию для исследования костной ткани. В работе [271] представлены результаты изучения пространственного распределения микроэлементов в образцах костей. Работы велись по трем направлениям. В первом изучали распределение элементарных компонентов имплантатов на основе магния на различных стадиях процесса деградации в окружающей костной ткани с упором на Mg и Y. Анализ выполняли с использованием специального микроРФ-спектрометра для обнаружения элементов с малым Z. Второе направление посвящено пространственному распределению цинка в склерозирующей остеосаркоме высокой степени, картированной с помощью конфокального микроРФА, с использованием синхротронного излучения для возбуждения рентгеновской флуоресценции. Уровни цинка в опухоли сравнивали с соседними нормальными тканями. Для различения здоровой и больной кости использовали визуализацию в обратно рассеянных электронах. Третий эксперимент продемонстрировал эффективность индуцированного синхротронным излучением микроРФА с размером луча около 500 нм для исследования костной ткани. Особое внимание уделяли преимуществам микро- и микроРФА в анализе костей. Авторы отмечают, что применение нанорентгеновского картирования перспективно в анализе костей, но в настоящее время возможно только для тонких образцов. Для таких измерений настоятельно рекомендуется последовательное сканирование с уменьшающейся шириной шага (использовалось в работе [271] — от грубого сканирования к точному) или, в качестве альтернативы, система масок или маркеров для определения точного положения измерения.

В работе [272] впервые успешно получено динамическое биораспределение *in vivo* наночастиц золота для живых мышей. Разработанная система рентгеновского картирования с использованием

точечных отверстий с возбуждением полихроматическим рентгеновским излучением может быть потенциальным методом молекулярной визуализации для металлических наночастиц, которые могут выступать в качестве радиосенситизатора и агента доставки лекарств. Измеренное биораспределение Au НЧ у мышей было сопоставлено и подтверждено методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой.

С развитием новых аналитических методов и приложений при постоянно усложняющихся требованиях к аккредитации лабораторий растет спрос и повышаются требования к стандартным материалам. В статье [273] сделан обзор общих тенденций в области создания таких материалов, а также разработок в отдельных областях применения, в которых активно работает Федеральный институт исследования и испытаний материалов (БАМ), Германия. Помимо рассмотрения традиционных областей применения, обсуждаются разработки в области оптической спектроскопии и наноматериалов. На фоне быстрого развития нанотехнологий лишь небольшое число наноCRM доступны в настоящее время. Обычно это слоистые структуры и идеальные, т.е. сферические частицы разного размера, чаще всего изготавливаемые из золота или полистирола.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Игнатова Ю.А., Еритенко А.Н., Ревенко А.Г., Цветянский А.Л.* Рентгенофлуоресцентный анализ твердотельных пленок и покрытий // Аналитика и контроль. 2011. Т. 15. № 2. С. 126.
2. *Ревенко А.Г.* К 40-летию журнала "X-Ray Spectrometry" // Аналитика и контроль. 2011. Т. 15. № 4. С. 370.
3. *Alov N.V.* Total reflection X-ray fluorescence analysis: Physical foundations and analytical application (A review) // Inorg. Mater. 2011. V. 47. № 14. P. 1487. <https://doi.org/10.1134/S0020168511140020>
4. *Лаврентьев Ю.Г.* Научные совещания по рентгеновской спектроскопии и рентгеноспектральному анализу как отражение процесса становления и развития отечественного рентгеноспектрального микроанализа // Аналитика и контроль. 2013. № 3. С. 252. <https://doi.org/10.15826/analitika.2013.17.3.001>
5. *Ревенко А.Г.* Применение стандартных образцов сравнения при РФА геологических проб // Стандартные образцы. 2013. № 4. С. 3.
6. *Ревенко А.Г.* Физические и химические методы исследования горных пород и минералов в Аналитическом центре ИЗК СО РАН // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5. № 1. С. 101. <https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-1-0119>
7. *Смагунова А.Н., Ревенко А.Г.* Развитие отечественного рентгенофлуоресцентного анализа (по материалам совещаний) // Журн. аналит. химии. 2014. Т. 69. № 3. С. 316. <https://doi.org/10.7868/S0044450214010149>
8. *Ревенко А.Г., Шарыкина Д.С.* Применение РФА для исследования химического состава чая и кофе // Аналитика и контроль. 2019. Т. 23. № 1. С. 6. <https://doi.org/10.15826/analitika.2019.23.1.015>
9. *Шербаков Р.Н. В. К.* Рентген – гений простоты и точности эксперимента // Природа. 2020. № 2. С. 54. <https://doi.org/10.7868/S0032874X20020064>
10. *Ревенко А.Г.* 125 лет со дня открытия рентгеновских лучей // Аналитика и контроль. 2020. Т. 24. № 1. С. 66. <https://doi.org/10.15826/analitika.2020.24.1.008>
11. *Калинин Б.Д.* Исследование рентгеновского излучения и развитие рентгеновского приборостроения в Санкт-Петербурге // Аналитика и контроль. 2020. Т. 24. № 3. С. 201. <https://doi.org/10.15826/analitika.2020.24.3.005>
12. *Ревенко А.Г.* Развитие рентгеноспектрального анализа в г. Новосибирске (электронно-зондовый микроанализ и рентгенофлуоресцентный анализ с использованием синхротронного излучения) // Аналитика и контроль. 2021. Т. 25. № 2. С. 155. <https://doi.org/10.15826/analitika.2021.25.2.006>
13. *Ревенко А.Г.* Применение рентгенофлуоресцентного анализа в биологии и медицине // Аналитика и контроль. 2020. Т. 24. № 4. С. 1. <https://doi.org/10.15826/analitika.2020.24.4.005>
14. *Ревенко А.Г., Пашкова Г.В.* Применение рентгенофлуоресцентного метода анализа для исследования состава угля и золы // Аналитика. 2022. № 6. С. 410.
15. *Revenko A.G.* On the 40th anniversary of the journal X-Ray Spectrometry // X-Ray Spectrom. 2012. V. 41. № 3. P. 117. <https://doi.org/10.1002/xrs.2383>
16. *Bosco G.L. James L.* Waters symposium 2012. Report development and application of portable, hand-held X-ray fluorescence spectrometers // Trends Anal. Chem. 2013. V. 45. P. 121. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2013.01.006>
17. *De La Calle I., Cabaleiro N., Romero V., Lavilla I., Bendicho C.* Sample pretreatment strategies for total reflection X-ray fluorescence analysis: A tutorial review // Spectrochim. Acta B. 2013. V. 90. P. 23. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2013.10.001>
18. *Marguí E., Zawisza B., Sitko R.* Trace and ultratrace analysis of liquid samples by X-ray fluorescence spectrometry // Trends Anal. Chem. 2014. V. 53. P. 73. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2013.09.009>
19. *Pashkova G.V., Revenko A.G.* A review of application of total reflection X-Ray fluorescence spectrometry to water analysis // Appl. Spectrosc. Rev. 2015. V. 50. № 6. P. 443. <https://doi.org/10.1080/05704928.2015.1010205>
20. *Borgese L., Bilo F., Dalipi R., Bontempi E., Depero L.E.* Total reflection X-ray fluorescence as a tool for food screening // Spectrochim. Acta B. 2015. V. 113. P. 1. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2015.08.001>
21. *Kawai J.* Total reflection X-ray fluorescence / Compendium of Surface and Interface Analysis / Eds. The Surface Science Society of Japan. Springer, 2018. P. 763. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-6156-1\\_122](https://doi.org/10.1007/978-981-10-6156-1_122)

22. *Schmeling M.* Total reflection X-ray fluorescence // *Phys. Sci. Rev.* 2019. V. 4. № 7. Article 20170161. <https://doi.org/10.1515/psr-2017-0161>
23. *Ridolfi S.* Portable systems for energy-dispersive X-ray fluorescence analysis / *Encyclopedia of Analytical Chemistry.* John Wiley & Sons, Ltd, 2017. P. 1. <https://doi.org/10.1002/9780470027318.a6803.pub3>
24. *De Almeida E., Duran N.M., Gomes M.H.F., Savassa S.M., da Cruz T.N.M., Migliavacca R.A., de Carvalho H.W.P.* EDXRF for elemental determination of nanoparticle related agricultural samples // *X-Ray Spectrom.* 2019. V. 48. № 2. P. 151. <https://doi.org/10.1002/xrs.3001>
25. *Dhara S., Misra N.L.* Elemental characterization of nuclear materials using total reflection X-ray fluorescence spectrometry // *Trends Anal. Chem.* 2019. V. 116. P. 31. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2019.04.017>
26. *Revenko A.G., Tsvetyansky A.L., Eritenko A.N.* X-ray fluorescence analysis of solid-state films, layers, and coatings // *Rad. Phys. Chem.* 2022. V. 197. Article 10157. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2022.110157>
27. *Revenko A.G., Sharykina D.S.* X-ray fluorescence studies of tea and coffee / *X-Ray Fluorescence in Biological Sciences: Principles, Instrumentation, and Applications* / Eds. Singh V.K., Kawai J., Tripathi D.K. Wiley, 2022. Ch. 3. P. 37.
28. *Chuparina E.V., Revenko A.G.* X-ray fluorescence analysis of medicinal plants / *X-Ray Fluorescence in Biological Sciences: Principles, Instrumentation, and Applications* / Eds. Singh V.K., Kawai J., Tripathi D.K. Wiley, 2022. Ch. 23. P. 341.
29. *Revenko A.G.* X-ray fluorescence analysis in Pharmacology / *X-Ray Fluorescence in Biological Sciences: Principles, Instrumentation, and Applications* / Eds. Singh V.K., Kawai J., Tripathi D.K. Wiley, 2022. Ch. 31. P. 475.
30. *Singh V.K., Sharma N., Singh V.K.* Application of X-ray fluorescence spectrometry in plant science: Solutions, threats, and opportunities // *X-Ray Spectrom.* 2022. V. 51. № 3. P. 304. <https://doi.org/10.1002/xrs.3260>
31. *Fernández-Ruiz R.* TXRF spectrometry in the bioanalytical sciences: A brief review // *X-Ray Spectrom.* 2022. V. 51 № 3. P. 279. <https://doi.org/10.1002/xrs.3243>
32. *Zhang Y., He Y., Zhou W., Mo G., Chen H., Xu T.* Review on the elemental analysis of polymetallic deposits by total-reflection X-ray fluorescence spectrometry // *Appl. Spectrosc. Rev.* 2022. <https://doi.org/10.1080/05704928.2022.2130350>
33. *Schramm R.* X-ray Fluorescence Analysis: Practical and Easy. Bedburg-Nau: Fluxana, 2012. P. 97.
34. *Павлинский Г.В.* Рентгеновская флуоресценция. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2013. С. 85.
35. *Haschke M.* Laboratory Micro-X-ray Fluorescence Spectroscopy: Instrumentation and Applications. Cham-Heidelberg-N.Y.; Dordrecht-London: Springer, 2013. P. 356.
36. *Willis J., Feather C., Turner K.* Guidelines for XRF Analysis. Setting up Programmes for WDXRF and EDXRF. Cape Town: James Willis Consultants cc., 2014. P. 519.
37. *Бахтияров А.В., Савельев С.К.* Рентгенофлуоресцентный анализ минерального сырья. СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2014. С. 132.
38. *Осколок К.В.* Основы аналитической химии. Практическое руководство по рентгенофлуоресцентному методу анализа: Уч. пособие. М.: Макс Пресс, 2015. С. 88.
39. *Klockenkämper R., von Bohlen A.* Total-Reflection X-ray Fluorescence Analysis and Related Methods. 2nd Ed. Hoboken, N.J.: John Wiley & Sons, Inc., 2015. P. 519.
40. *Дуймакаев Ш., Дуймакаева Т., Потыкало М.* Теория и способы рентгеноспектрального флуоресцентного анализа. Гомогенные и гетерогенные среды. LAP LAMBERT Academic Publishing RU, 2019. С. 387.
41. *Haschke M., Flock J., Haller M.* Laboratory Applications of X-ray Fluorescence. Wiley, 2021. P. 464.
42. *Kawai J.* X-ray Spectroscopy for Chemical State Analysis. Singapore: Springer, 2023. P. 238.
43. Кто есть кто в российской аналитической химии. Доктора наук. Изд. 2-е / Ред.-сост. Золотов Ю.А., Широкова В.И. М.: Изд-во ЛКИ, 2011. С. 208.
44. *Ильин Н.П.* Рентгеноспектральные методы микроанализа / *Химики-аналитики о себе и своей науке* / Под ред. Золотова Ю.А., Шапошник В.А. М.: Книжный дом "ЛИБРОКОМ", 2011. С. 320
45. *Смагунова А.Н.* Развитие рентгенофлуоресцентного анализа / *Химики-аналитики о себе и своей науке* / Под ред. Золотова Ю.А., Шапошник В.А. М.: Книжный дом "ЛИБРОКОМ", 2011. С. 238.
46. К 90-летию Романа Львовича Баринского // *Разведка и охрана недр.* 2014. № 4. С. 61.
47. *Ревенко А.Г.* Павлинский Гелий Вениаминович (80 лет со дня рождения) // *Аналитика и контроль.* 2015. Т. 19. № 1. С. 94. <https://doi.org/10.15826/analitika.2015.19.1.013>
48. *Калинин Б.Д.* Памяти ученого (Р.И. Плотников, 1928–2015) // *Аналитика и контроль.* 2016. Т. 20. № 2. С. 175. <https://doi.org/10.15826/analitika.2016.20.2.006>
49. *Ревенко А.Г.* Карманов Валерий Иванович (5.07.1941–19.08.2010 гг.). К 75-летию со дня рождения // *Аналитика и контроль.* 2016. Т. 20. № 3. С. 242. <https://doi.org/10.15826/analitika.2016.20.3.005>
50. *Ревенко А.Г.* Метеор на небосклоне / *Мурадин Кумахов: Опередивший время. Жизнь и творчество* / Под ред. Кумахова М.Г., Кумахова А.М. Нальчик: Эльбрус, 2016. С. 216.
51. *Золотов Ю.А.* Российский вклад в аналитическую химию. М.: ИП Лысенко А.Д. PRESS-BOOK.RU, 2017. С. 190.
52. *Брытов И.А.* Николай Иванович Комяк, организатор отечественного рентгеновского приборостроения, ученый и человек (к 90-летию юбилею) // *Научное приборостроение.* 2018. Т. 28. № 4. С. 5. <https://doi.org/10.18358/np-28-4-i57>

53. *Ревенко А.Г., Дуймакаев Ш.И.* Смагунова Антонина Никоновна — к 85-летию со дня рождения // Аналитика и контроль. 2019. Т. 23. № 2. С. 274.
54. *Брытов И.* Рулевой “Буревестника” // Экономические стратегии. 2019. № 2. С. 94.
55. *Ревенко А.Г.* 80-летие со дня рождения профессора Мурадина Абубекировича Кумахова (1941–2014 гг.) // Аналитика и контроль. 2021. Т. 25. № 3. С. 241.
56. *Калинин Б.Д.* Памяти Дмитрия Алексеевича Гоганова (07.05.1936–15.02.2020) // Аналитика и контроль. 2020. Т. 24. № 2. С. 152.
57. *Revenko A.G., Finkelstein A.L., Duymakaev Sh.I.* Pavlinsky Geliy Veniaminovich (1935–2023) // X-Ray Spectrom. 2023. V. 52. P. 1. <https://doi.org/10.1002/xrs.3342>
58. *Коржова Е.Н., Ставицкая М.В., Белозерова О.Ю., Хаптагаева Е.А., Смагунова А.Н.* Изучение эффекта микроабсорбционной неоднородности при рентгенофлуоресцентном анализе ультрамельких частиц // Журн. аналит. химии. 2011. Т. 66. № 2. С. 175. (*Korzhova E.N., Staviitskaya M.V., Khabtagaeva E.A., Smagunova A.N., Belozerova O.Yu.* Effect of microabsorption heterogeneity in the X-Ray fluorescence analysis of ultrafine particles // J. Anal. Chem. 2011. V. 66. № 2. P. 171.) <https://doi.org/10.1134/S1061934811020092>
59. *Дуймакаев Ш.И., Потькало М.В., Шполянский А.Я.* К элементному РФА гетерогенных порошковых образцов сложного фазового состава // Евразийский Союз Ученых. Физ.-мат. науки. 2015. Т. 4. № 13. С. 73.
60. *Волков А.И., Алов Н.В.* О влиянии расстояния между спектрометром и образцом на интенсивность рентгеновской флуоресценции // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия. 2011. Т. 52. № 1. С. 53. (*Volkov A. I., N. V. Alov.* Influence of the distance between a spectrometer and sample on the intensity of X-ray fluorescence // Moscow Univ. Chem. Bull. 2011. V. 66. № 1. P. 47.) <https://doi.org/10.3103/S0027131411010123>
61. *Портной А.Ю., Павлинский Г.В., Горбунов М.С., Сидорова Ю.И.* Об особенностях фона, обусловленных переносом и сбором электронов в Si-детекторе // Научное приборостроение. 2011. Т. 21. № 4. С. 145.
62. *Pavlinisky G.V., Gorbunov M.S., Vladimirova L.I.* Contribution of bremsstrahlung of free electrons to formation of the background component for NaK X-ray fluorescence // X-Ray Spectrom. 2012. V. 41. № 4. P. 247. <https://doi.org/10.1002/xrs.2388>
63. *Павлинский Г.В., Горбунов М.С., Владимиров Л.И.* О формировании фоновой составляющей аналитического сигнала в длинноволновой области рентгеновского спектра флуоресценции // Журн. аналит. химии. 2012. Т. 67. № 3. С. 265. (*Pavlinskii G.V., Gorbunov M.S., Vladimirova L.I.* Formation of the background component of the analytical signal in the long-wavelength region of X-Ray fluorescence spectrum // J. Anal. Chem. 2012. V. 67. № 3. P. 226.) <https://doi.org/10.1134/S1061934812030094>
64. *Чупарина Е.В., Смагунова А.Н., Елисеева Л.А.* Исследование процессов образования фона в длинноволновой области рентгеновского спектра // Журн. аналит. химии. 2015. Т. 70. № 8. С. 828. (*Chuparina E.V., Smagunova A.N., Eliseeva L.A.* Study of the processes of background formation in the long-wavelength region of x-ray spectrum // J. Anal. Chem. 2015. V. 70. № 8. P. 949.) <https://doi.org/10.7868/S0044450215080058>
65. *Zhang Q., Ge L., Gu Y., Ya. Lin, Zeng G., Yang J.* Background estimation based on Fourier Transform in the energy-dispersive X-ray fluorescence analysis // X-Ray Spectrom. 2012. V. 41. № 2. P. 75. <https://doi.org/10.1002/xrs.2360>
66. *Zhao F., Wang A.* A background subtraction approach based on complex wavelet transforms in EDXRF // X-Ray Spectrom. 2015. V. 44. № 2. P. 41. <https://doi.org/10.1002/xrs.2576>
67. *Кузьмина Т.Г., Рощина И.А., Хохлова И.В.* Эффект дополнительного возбуждения при рентгенофлуоресцентном определении благородных металлов в ненасыщенных слоях // Журн. аналит. химии. 2012. Т. 67. № 5. С. 511. (*Kuz'mina T.G., Roshchina I.A., Khokhlova I.V.* Effect of additional excitation in the X-ray fluorescence determination of noble metals in unsaturated beds // J. Anal. Chem. 2012. V. 67. № 5. P. 455.) <https://doi.org/10.1134/S1061934812050097>
68. *Дуймакаев Ш.И., Сорочинская М.А.* К вопросу оценки вклада избирательного возбуждения при рентгеноспектральном флуоресцентном анализе // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Естеств. науки. 2014. № 1. С. 53.
69. *Борходоев В.Я.* Дополнительное возбуждение рентгеновской флуоресценции аналита в ненасыщенном слое с помощью подложки // Аналитика и контроль. 2015. Т. 19. № 1. С. 40. <https://doi.org/10.15826/analitika.2015.19.1.009>
70. *Дуймакаев Ш.И., Потькало М.В.* К оценке избирательного возбуждения при рентгенофлуоресцентном анализе // Аналитика и контроль. 2016. Т. 20. № 1. С. 23. <https://doi.org/10.15826/analitika.2015.20.1.002>
71. *Guerra M., Manso M., Pessanha S., Longelin S., Carvalho M.L.* Theoretical and experimental study on the angular dependence of scattering processes in X-ray fluorescence systems // X-Ray Spectrom. 2013. V. 42. № 5. P. 402. <https://doi.org/10.1002/xrs.2491>
72. *Pavlinisky G.V., Portnoy A.Yu.* The role of Compton scattering in the low-Z elements X-ray fluorescence formation // X-Ray Spectrom. 2014. V. 43. № 2. P. 118. <https://doi.org/10.1002/xrs.2525>
73. *Цветянский А.Л., Еристенко А.Н., Полев А.А.* Сопоставление способов расчета сечений рассеяния в рентгеновской области спектра // Аналитика и контроль. 2015. Т. 19. № 2. С. 115. <https://doi.org/10.15826/analitika.2015.19.2.003>
74. *Pavlinisky G.V.* Ratio of incoherent and coherent scattering intensities of X-ray and  $\gamma$ -radiation // X-Ray Spectrom. 2021. V. 50. № 2. P. 454. <https://doi.org/10.1002/xrs.3233>
75. *Павлинский Г.В.* Рентгенофлуоресцентный аналитический сигнал элементов с малым атомным номером как функция энергии первичных фотонов // Журн. аналит. химии. 2016. Т. 71. № 1. С. 23. (*Pav-*

- linskii G.V.* X-Ray fluorescence analytical signal of elements with small atomic numbers as a function of the energy of primary photons // *J. Anal. Chem.* 2016. V. 71. № 1. P. 22.)  
<https://doi.org/10.7868/S0044450215120142>
76. *Борходоев В.Я.* О пределе обнаружения в рентгенофлуоресцентном анализе // *Журн. аналит. химии.* 2014. Т. 69. № 11. С. 1141. (*Borkhodoev V.Ya.* About the limit of detection in X-ray fluorescence analysis // *J. Anal. Chem.* 2014. V. 69. № 11. P. 1041.)  
<https://doi.org/10.1134/S1061934814110021>
  77. *Борходоев В.Я.* О связи пределов обнаружения и определения в рентгенофлуоресцентном анализе // *Журн. аналит. химии.* 2015. Т. 70. № 11. С. 1143. (*Borkhodoev V.Ya.* About a correlation between the limits of detection and determination in X-Ray fluorescence analysis // *J. Anal. Chem.* 2015. V. 70. № 11. P. 1307.)  
<https://doi.org/10.7868/S0044450215090042>
  78. *Beckhoff B., Jach T., Jeynes C., Lépy M.-C., Sakurai K., Santos J.P.* International initiative on X-ray fundamental parameters. Roadmap document on atomic Fundamental Parameters for X-ray methodologies. Version 2.0. 2017. 71 p. Available online: [https://www.exsa.hu/news/wp-content/uploads/IIFP\\_Roadmap\\_V2.pdf](https://www.exsa.hu/news/wp-content/uploads/IIFP_Roadmap_V2.pdf) (accessed on 5 May 2022).
  79. *Kolbe M., Hönicke P., Müller M., Beckhoff B.* L-subshell fluorescence yields and Coster-Kronig transition probabilities with a reliable uncertainty budget for selected high- and medium-Z elements // *Phys. Rev.* 2012. V. 86 A. № 4. P. 042512.
  80. *Hönicke P., Kolbe M., Müller M., Mantler M., Krämer M., Beckhoff B.* Experimental verification of the individual energy dependencies of the partial L-shell photoionization cross sections of Pd and Mo // *Phys. Rev. Lett.* 2014. V. 113. № 16. P. 163001.
  81. *Hönicke P., Kolbe M., Krumrey M., Unterumsberger R., Beckhoff B.* Experimental determination of the oxygen K-shell fluorescence yield using thin SiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> foils // *Spectrochim. Acta B.* 2016. V. 124. P. 94.  
<https://doi.org/10.1016/j.sab.2016.08.024>
  82. *Ménesguen Y., Lépy M.C., Hönicke P., Müller M., Unterumsberger R., Beckhoff B., Hoszowska J., Dousse J.-Cl., Błachucki W., Ito Y.* Experimental determination of the X-ray atomic fundamental parameters of nickel // *Metrologia.* 2017. V. 55. № 1. P. 56.  
<https://doi.org/10.1088/1681-7575/aa9b12>
  83. *Kolbe M., Hönicke P.* Fundamental parameters of Zr and Ti for a reliable quantitative X-ray fluorescence analysis // *X-Ray Spectrom.* 2015. V. 44. № 4. P. 217.  
<https://doi.org/10.1002/xrs.2603>
  84. *Krishnananda S., Mirji M., Hosamani N.M., Badiger M.K., Tiwari G.S.* Measurement of L subshell fluorescence yields of some rare earth elements using synchrotron radiation // *X-Ray Spectrom.* 2016. V. 45. № 2. P. 72.  
<https://doi.org/10.1002/xrs.2655>
  85. *Hönicke P., Kolbe M., Beckhoff B.* What are the correct L-subshell photoionization cross sections for quantitative X-ray spectroscopy? // *X-Ray Spectrom.* 2016. V. 45. № 4. P. 207.  
<https://doi.org/10.1002/xrs.2691>
  86. *Ganly B., Van Haarlem Y., Tickner J.* Measurement of relative line intensities for L-shell X-rays from selected elements between Z=68 (Er) and Z=79 (Au) // *X-Ray Spectrom.* 2016. V. 45. № 4. P. 233.  
<https://doi.org/10.1002/xrs.2695>
  87. *Mukoyama T.* M-X-ray satellite lines of heavy elements due to multiple ionization // *X-Ray Spectrom.* 2016. V. 45. № 5. P. 263.
  88. *Ménesguen Y., Gerlach M., Pollakowski B., Unterumsberger R., Haschke M., Beckhoff B., Lépy M.-C.* High accuracy experimental determination of copper and zinc mass attenuation coefficients in the 100 eV to 30 keV photon energy range // *Metrologia.* 2016. V. 53. P. 7.  
<https://doi.org/10.1088/0026-1394/53/1/7>
  89. *Duggal H., Sharma V., Kainth H.S., Kumar S., Shahi J.S., Mehta D.* Measurement of L XRF cross sections for elements with  $33 \leq Z \leq 51$  and their interpretation in terms of L<sub>i</sub> (i = 1–3) subshell vacancy decay parameters // *Nucl. Instrum. Methods. B.* 2018. V. 429. P. 19.  
<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2018.05.013>
  90. *Unterumsberger R., Hönicke P., Colaun J.L., Jeynes C., Wansleben M., Müller M., Beckhoff B.* Accurate experimental determination of Gallium K- and L<sub>3</sub>-shell XRF fundamental parameters // *J. Anal. At. Spectrom.* 2018. V. 33. № 6. P. 1003.  
<https://doi.org/10.1039/C8JA00046H>
  91. *Kaur R., Kumar A., Czyzycki M., Migliori A., Karydas A.G., Puri S.* Synchrotron radiation induced X-ray production cross sections of <sup>66</sup>Dy at energies across its L<sub>i</sub> (i = 1–3) subshell absorption edges // *X-Ray Spectrom.* 2018. V. 47. № 1. P. 11.  
<https://doi.org/10.1002/xrs.2800>
  92. *Ménesguen Y., Lépy M.-C.* Experimental determination of L fluorescence yields of gadolinium // *X-Ray Spectrom.* 2020. V. 49. № 5. P. 596.  
<https://doi.org/10.1002/xrs.3157>
  93. *Fernandez-Ruiz R.* Quantitation of the production cross-section and transition probabilities of the L and M X-ray series in the Au(0) and Au(3+) atomic environments using Total-reflection X-ray fluorescence // *Spectrochim. Acta B.* 2021. V. 180. Article 106207.  
<https://doi.org/10.1016/j.sab.2021.106207>
  94. *Hiremath G.B., Bennal A.S., Hosamani M.M., Badiger N.M., Trivedi A., Tiwari M.K.* Measurement of L subshell fluorescence yield ratios of some high Z elements by selective excitation method // *X-Ray Spectrom.* 2021. V. 50. № 1. P. 37.  
<https://doi.org/10.1002/xrs.3191>
  95. *Unterumsberger R., Hönicke P., Wauschkuhn N., Beckhoff B., Krämer M., Sampaio J., Parente F., Indelicato P., Marques J.P., Santos J.P.* Experimental and theoretical approaches for determining the K-shell fluorescence yield of carbon // *Radiat. Phys. Chem.* 2022. V. 202. Article 110501.  
<https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2022.110501>
  96. *Kaur S., Ayri V., Kumar A., Czyzycki M., Karydas A.G., Puri S.* Experimental production cross sections for synchrotron radiation induced L-series X-rays of Sn and Sb at energies across their L<sub>i</sub> (i = 1–3) absorption edges // *X-Ray Spectrom.* 2022. V. 51. № 1. P. 15.  
<https://doi.org/10.1002/xrs.3247>
  97. *Kayser Y., Hönicke P., Wansleben M., Wählich A., Beckhoff B.* Experimental determination of the gadolinium L subshells fluorescence yields and Coster-Kronig transition probabilities // *X-Ray Spectrom.*

2022. V. 51. № 1. P. 1.  
<https://doi.org/10.1002/xrs.3313>
98. *Cornaby S., Kozaczek K.* X-ray Sources for Handheld X-ray Fluorescence Instruments. Encyclopedia of Analytical Chemistry. John Wiley & Sons, Ltd., 2016.  
<https://doi.org/10.1002/9780470027318.a9460>
99. *Revenko A.G.* Specific features of X-ray fluorescence analysis techniques using capillary lenses and synchrotron radiation // *Spectrochim. Acta B.* 2007. V. 62. № 6–7. P. 567.  
<https://doi.org/10.1016/j.sab.2007.04.019>
100. *Болотоков А., Зайцев Д., Шербаков А., Лютцау А.* Поликапиллярная оптика Кумахова и аналитические приборы на ее основе // *Аналитика.* 2012. Т. 4. № 5. С. 14.
101. *Дарьин Ф.А.* Развитие метода конфокальной рентгеновской микроскопии исследования микровключений в различные геологические матрицы. Дис. ... канд. хим. наук. Новосибирск: Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, 2022. 141 с.
102. *Ревенко А.Г., Суворова Д.С., Худогова Е.В.* Исследование возможности применения фильтров при рентгенофлуоресцентном анализе в длинноволновой области // *Аналитика и контроль.* 2018. Т. 22. № 2. С. 117.  
<https://doi.org/10.15826/analitika.2018.22.2.009>
103. *Zhalsaraev B.Z.* The scattering suppression of X-rays with energy of 20–200 keV in spectrometers with Barkla polarizers // *X-ray Spectrom.* 2019. V. 48. № 6. P. 628.  
<https://doi.org/10.1002/xrs.3046>
104. *Zhalsaraev B.Z.* X-ray scattering and polarization in wavelength-dispersive spectrometers // *X-ray Spectrom.* 2020. V. 49. № 4. P. 480.  
<https://doi.org/10.1002/xrs.3142>
105. *Zhalsaraev B.Zh.* The influence of polarization and filtration of beams on the ED spectrometers sensitivity // *X-Ray Spectrom.* 2021. V. 50. № 1. P. 28.  
<https://doi.org/10.1002/xrs.3187>
106. *Tiwari M.K.* Ch. 14. Recent Developments in X-Ray fluorescence for characterization of nano-structured materials / *X-Ray Fluorescence in Biological Sciences: Principles, Instrumentation, and Applications* / Eds. Singh V.K., Kawai J., Tripathi D.K. Wiley, 2022. P. 219.
107. *Portnoy A. Yu., Pavlinsky G.V., Gorbunov M.S., Sidorova Yu.I.* An estimation of EDXRF spectrometer properties, based on a two-layer composite Si-Ge detector // *X-Ray Spectrom.* 2012. V. 41. № 5. P. 298.  
<https://doi.org/10.1002/xrs.2396>
108. *Samedov V.V.* Fluctuations in the processes of charge induction in ionization-type detectors // *X-Ray Spectrom.* 2015. V. 44. № 3. P. 183.  
<https://doi.org/10.1002/xrs.2598>
109. *Hampai D., Liedl A., Polese C., Cappuccio G., Dabagov S.B.* RXR: A new X-ray facility at XLab Frascati // *X-Ray Spectrom.* 2015. V. 44. № 4. P. 243.  
<https://doi.org/10.1002/xrs.2614>
110. *Kitov B.I., Mukhachyov Y.S., Ryabov Y.V.* Time lag as a characteristic feature in the identification of a moving object by a two-detector X-ray sensor // *X-Ray Spectrom.* 2016. V. 45. № 1. P. 48.  
<https://doi.org/10.1002/xrs.2654>
111. *Ревенко А.Г.* Особенности методик анализа геологических образцов с использованием рентгенофлуоресцентных спектрометров с полным внешним отражением (TXRF) // *Аналитика и контроль.* 2010. Т. 14. № 2. С. 42.
112. *Pashkova G.V., Revenko A.G., Finkelshtein A.L.* Study of factors affecting the results of natural water analyses by total reflection X-ray fluorescence // *X-Ray Spectrom.* 2013. V. 42. № 6. P. 524.  
<https://doi.org/10.1002/xrs.2513>
113. *Pashkova G.V., Chubarov V.M., Akhmetzhanov T.F., Zhilicheva A.N., Mukhamedova M.M., Finkelshtein A.L., Belozeroва O.Y.* Total-reflection X-ray fluorescence spectrometry as a tool for the direct elemental analysis of ores: Application to iron, manganese, ferromanganese, nickel-copper sulfide ores and ferromanganese nodules // *Spectrochim. Acta B.* 2020. V. 168. Article 105856.  
<https://doi.org/10.1016/j.sab.2020.105856>
114. *Pashkova G.V., Maltsev A.S.* X-Ray fluorescence analysis of milk and dairy products / *X-Ray Fluorescence in Biological Sciences: Principles, Instrumentation, and Applications* / Eds: Singh V.K., Kawai J., Tripathi D.K. Wiley, 2022. Ch. 22. P. 327.
115. *Мальцев А.С., фон Болен А., Юсупов Р.А., Бахтеев С.А.* Оценка аналитических возможностей рентгенофлуоресцентной спектрометрии с полным внешним отражением при анализе напитков с матрицей сахарозы // *Аналитика и контроль.* 2019. Т. 23. № 4. С. 483.  
<https://doi.org/10.15826/analitika.2019.23.4.009>
116. *Maltsev A.S., Yusupov R.A., Bakhteev S.A.* Overcoming absorption effects in the determination of light elements in beverages by total-reflection X-ray spectrometry // *X-Ray Spectrom.* 2022. Special Issue Article. P. 1.  
<https://doi.org/10.1002/xrs.3283>
117. *Marguí E., Jablan J., Queralt I., Bilo F., Borgese L.* Potential of total-reflection X-ray spectrometry for multielement analysis of biological samples using dilution or suspension sample preparation techniques // *X-Ray Spectrom.* 2022. V. 51. № 3. P. 230.  
<https://doi.org/10.1002/xrs.3230>
118. *Takahara H., Ohbuchi A., Murai K.* Method development for the analysis of poorly soluble solids by total reflection X-ray fluorescence spectrometry // *Spectrochim. Acta B.* 2018. V. 149. P. 276.  
<https://doi.org/10.1016/j.sab.2018.07.008>
119. *Haberl J., Fromm S., Schuster M.* Digestions vs. suspensions: The influence of sample preparation on precision and accuracy in total-reflection X-ray fluorescence analysis by the example of waste incineration fly ash // *Spectrochim. Acta B.* 2019. V. 154. P. 82.  
<https://doi.org/10.1016/j.sab.2019.02.004>
120. *Matsuyama T., Tanaka Y., Nakae M., Furusato T., Tsuji K.* High-accuracy determination of trace elements by total reflection X-ray fluorescence spectrometry using freeze-dried specimens // *Analyst.* 2022. V. 147. № 22. P. 5130.  
<https://doi.org/10.1039/D2AN01290A>

121. *Sugioka T., Umeda H., Kunimura S.* Effects of mechanical vibration during drying of solution sample in enhancing the sensitivity of total reflection X-ray fluorescence analysis // *Anal. Sci.* 2020. V. 36. № 4. P. 465. <https://doi.org/10.2116/analsci.19P372>
122. *Kunimura S., Shinkai T.* Trace elemental determination using a portable total reflection X-ray fluorescence spectrometer with a collodion film sample holder // *Anal. Sci.* 2017. V. 33. № 5. P. 635. <https://doi.org/10.2116/analsci.33.635>
123. *Tsuji K., Yomogita N., Konyuba Y.* Sample preparation for total reflection X-ray fluorescence analysis using resist pattern technique // *Spectrochim. Acta B.* 2018. V. 144. P. 68. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2018.03.005>
124. *Smagunova A.N., Pashkova G.V.* Choice of optimal conditions for X-ray fluorescence analysis of milk products with varying fat content // *X-Ray Spectrom.* 2013. V. 42. № 6. P. 546. <https://doi.org/10.1002/xrs.2519>
125. *Regadio M., Riaño S., Binnemans K., Vander Hoogerstraete T.* Direct analysis of metal ions in solutions with high salt concentrations by total reflection X-ray fluorescence // *Anal. Chem.* 2017. V. 89. № 8. P. 4595. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.7b00097>
126. *Von Bohlen A., Fernández-Ruiz R.* Experimental evidence of matrix effects in total-reflection X-ray fluorescence analysis: Coke case // *Talanta.* 2020. V. 209. Article 120562. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2019.120562>
127. *Maltsev A.S., Yusupov R.A., Bakhteev S.A.* Ch. 15. Total-reflection x-ray fluorescence analysis of alcoholic and non-alcoholic beverages / *X-Ray Fluorescence in Biological Sciences: Principles, Instrumentation, and Applications* / Eds: *Singh V.K., Kawai J., Tripathi D.K.* Wiley, 2022. P. 249.
128. *Fernández-Ruiz R., Friedrich K.E.J., Redrejo M.J.* Effect of modulation of the particle size distributions in the direct solid analysis by total-reflection X-ray fluorescence // *Spectrochim. Acta B.* 2018. V. 140. P. 76. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2017.12.007>
129. *Pashkova G.V., Zhilicheva A.N., Chubarov V.M., Artem S. Maltsev A.S., Ukhova N.N., Pellinen V.A., Sokolnikova J.V., Kirsanov D.O., Panchuk V.V., Marfin A.E.* Improvement of suspension-assisted total reflection X-ray fluorescence analysis of ores using wet grinding and empirical calibrations // *Spectrochim. Acta B.* 2022. V. 198. Article 106549. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2022.106549>
130. *Шаранов П.Ю., Алов Н.В., Золотов Ю.А.* Неводные суспензии в твердотельном рентгенофлуоресцентном анализе с полным внешним отражением // *Докл. АН. Химия.* 2016. Т. 467. № 3. С. 308. (*Sharanov P.Y., Alov N.V., Zolotov Y.A.* Nonaqueous suspensions in total reflection X-ray fluorescence analysis of solids // *Doklady Chemistry.* 2016. Т. 467. № 1. P. 91.) <https://doi.org/10.7868/S0869565216090140>
131. *Maltsev A.S., Ivanov A.V., Pashkova G.V., Marfin A.E., Bishaev Y.A.* New prospects to the multi-elemental analysis of single microcrystal of apatite by total-reflection X-ray fluorescence spectrometry // *Spectrochim. Acta B.* 2021. V. 184. Article 106281. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2021.106281>
132. *Осколок К.В., Моногарова О.В., Алов Н.В.* Определение ртути(II) в воде методом рентгенофлуоресцентного анализа с полным внешним отражением в сочетании с жидкостно-жидкостной микроэкстракцией // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия.* 2017. Т. 58. № 4. С. 178. (*Oskolok K.V., Monogarova O.V., Alov N.V.* TXRF determination of mercury(II) in water in combination with liquid-liquid microextraction // *Moscow Univ. Chem. Bull.* 2017. V. 72. № 4. P. 174.) <https://doi.org/10.3103/S002713141704006X>
133. *Musielak M., Serda M., Sitko R.* Ultrasensitive and selective determination of mercury in water, beverages and food samples by EDXRF and TXRF using graphene oxide modified with thiosemicarbazide // *Food Chem.* 2022. V. 390. Article 133136. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133136>
134. *Marguí E., Queralt I., Guerra M., Kallithrakas-Kontos N.* Mercury determination at trace levels using membrane preconcentration and benchtop total reflection X-ray fluorescence analysis // *Spectrochim. Acta, Part B.* 2018. V. 149. P. 84. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2018.07.020>
135. *Sanyal K., Dhara S., Gumber N., Pai R.V.* A highly sensitive method for uranium quantification in water samples at ultra-trace level by total reflection X-ray fluorescence, after its direct pre-concentration on the surface of amidoxime functionalized quartz sample supports // *Talanta.* 2023. V. 254. Article 124129. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2022.124129>
136. *Kocot K., Pytlakowska K., Talik E., Krafft C., Sitko R.* Sensitive determination of uranium using  $\beta$ -cyclodextrin modified graphene oxide and X-ray fluorescence techniques: EDXRF and TXRF // *Talanta.* 2022. V. 246. Article 123501. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2022.123501>
137. *Takahashi H., Izumoto Y., Matsuyama T., Yoshii H.* Trace determination of uranium preconcentrated using graphene oxide by total reflection X-ray fluorescence spectrometry // *X-Ray Spectrom.* 2019. V. 48. № 5. P. 366. <https://doi.org/10.1002/xrs.3032>
138. *Sanyal K., Chappa S., Bahadur J., Pandey A.K., Mishra N.L.* Arsenic quantification and speciation at trace levels in natural water samples by total reflection X-ray fluorescence after pre-concentration with: N-methyl-D-glucamine functionalized quartz supports // *J. Anal. At. Spectrom.* 2020. V. 35. № 11. P. 2770. <https://doi.org/10.1039/D0JA00385A>
139. *Majumder S., Marguí E., Roman-Ross G., Chatterjee D., Hidalgo M.* Hollow fiber liquid phase microextraction combined with total reflection X-ray fluorescence spectrometry for the determination of trace level inorganic arsenic species in waters // *Talanta.* 2020. V. 217. Article 121005. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2020.121005>
140. *Малков А.В., Кожевников А.Ю., Косяков Д.С., Кошелева А.Е.* Определение Ni, Co и Cu в морской воде методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии полного внешнего отражения // *Журн. аналит. химии.* 2017. Т. 72. № 6. С. 521. (*Malkov A.V., Kozhevnikov A.Y., Kosyakov D.S., Kosheleva A.E.* De-

- termination of Ni, Co, and Cu in seawater by total external reflection X-ray fluorescence spectrometry // *J. Anal. Chem.* 2017. V. 72. № 6. P. 608.)  
<https://doi.org/10.7868/S004445021706010X>
141. *Осколок К.В., Моногарова О.В., Алов Н.В.* Рентгенофлуоресцентный анализ с полным внешним отражением природных и питьевых вод // *Журн. аналит. химии.* 2018. Т. 73. № 11. С. 877.  
<https://doi.org/10.1134/S0044450218110087>
142. *Maksimova Y.A., Dubenskiy A.S., Garmash A.V., Pashkova G.V., Shigapov I.V., Seregina I.F., Pavlova L.A., Sharanov P.Y., Bolshov M.A.* Simultaneous determination of Os, Ir, Pt and Au in sorbent phases by total reflection X-ray fluorescence // *Spectrochim. Acta B.* 2022. V. 196. Article 106521.  
<https://doi.org/10.1016/j.sab.2022.106521>
143. *Pashkova G.V., Aisueva T.S., Finkelshstein A.L., Cherkashina T.Y., Shchetnikov A.A.* Quantitative approaches to the determination of elements in lake sediments by total reflection X-ray fluorescence // *Microchem. J.* 2018. V. 143. P. 264.  
<https://doi.org/10.1016/j.microc.2018.08.020>
144. *Towett E.K., Shepherd K.D., Cadisch G.* Quantification of total element concentrations in soils using total X-ray fluorescence spectroscopy (TXRF) // *Sci. Total Environ.* 2013. V. 463-464. P. 374.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.05.068>
145. *Bilo F., Borgese L., Pardini G., Margui E., Zacco A., Dalipi R., Federici S., Bettinelli M., Volante M., Bontempi E., Depero L.E.* Evaluation of different quantification modes for a simple and reliable determination of Pb, Zn and Cd in soil suspensions by total reflection X-ray fluorescence spectrometry // *J. Anal. At. Spectrom.* 2019. V. 34. № 5. P. 930.  
<https://doi.org/10.1039/C9JA00040B>
146. *Marguí E., Queralt I., Andrey D., Perring L.* Analytical potential of total reflection X-ray fluorescence (TXRF) instrumentation for simple determination of major and trace elements in milk powder samples // *Food Chem.* 2022. V. 383. Article 132590.  
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132590>
147. *Dalipi R., Marguí E., Borgese L., Depero L.E.* Multi-element analysis of vegetal foodstuff by means of low power total reflection X-ray fluorescence (TXRF) spectrometry // *Food Chem.* 2017. V. 218. P. 348.  
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.09.022>
148. *Kirsanov D., Panchuk V., Goydenko A., Khaydukova M., Semenov V., Legin A.* Improving precision of X-ray fluorescence analysis of lanthanide mixtures using partial least squares regression // *Spectrochim. Acta B.* 2015. V. 113. Article 4973. P. 126.  
<https://doi.org/10.1016/j.sab.2015.09.013>
149. *Shulyumova A., Maltsev A., Umarova N.* Multivariate calibration in TXRF analysis of water // *X-Ray Spectrom.* 2018. V. 47. № 5. P. 396.  
<https://doi.org/10.1002/xrs.2958>
150. *Akhmetzhanov T.F., Pashkova G.V., Chubarov V.M., Labutin T.A., Popov A.M.* Three calibration techniques combined with sample-effective design of experiment based on Latin hypercube sampling for direct detection of lanthanides in REE-rich ores using TXRF and WDXRF // *J. Anal. At. Spectrom.* 2021. V. 36. № 1. P. 224.  
<https://doi.org/10.1039/D0JA00264J>
151. *González G.M., Castillo R.P., Neira J.Y.* Multivariate calibration for the improvement of the quantification of cadmium in the presence of potassium as interferent by total reflection X-ray fluorescence // *X-Ray Spectrom.* 2019. V. 48. № 6. P. 700.  
<https://doi.org/10.1002/xrs.3113>
152. *Mennickent D., Castillo R.D.P., Araya J., Neira J.Y.* Analytical performance of Compton/Rayleigh signal ratio by total reflection X-ray fluorescence (TXRF): A potential methodological tool for sample differentiation // *X-Ray Spectrom.* 2022. V. 51. № 2. P. 142.  
<https://doi.org/10.1002/xrs.3273>
153. *Shao J., Jia W., Zhang X., Liu Y., Tang X., Xiong G., Shan Q.* Analysis of plant samples by low-power total reflection X-ray fluorescence spectrometry applying argon-peak normalization // *J. Anal. At. Spectrom.* 2020. V. 35. № 4. P. 746.  
<https://doi.org/10.1039/C9JA00419J>
154. *Floor G.H., Queralt I., Hidalgo M., Marguí E.* Measurement uncertainty in total reflection X-ray fluorescence // *Spectrochim. Acta B.* 2015. V. 111. P. 30.  
<https://doi.org/10.1016/j.sab.2015.06.015>
155. *Maltsev A.S., Ivanov A.V., Chubarov V.M., Pashkova G.V., Panteeva S.V., Reznitskii L.Z.* Development and validation of a method for multielement analysis of apatite by total-reflection X-ray fluorescence spectrometry // *Talanta.* 2020. V. 214. Article 120870.  
<https://doi.org/10.1016/j.talanta.2020.120870>
156. *Devi P.S.R., Chavan T.A., Ghosh M., Swain K.K.* Total reflection X-ray fluorescence analysis of high purity quartz: A bottom-up approach of uncertainty evaluation // *Spectrochim. Acta B.* 2021. V. 178. Article 106127.  
<https://doi.org/10.1016/j.sab.2021.106127>
157. *Kowalkiewicz Z., Urbaniak W.* Determination of fluorine by total reflection X-ray fluorescence in fluoride fluxes // *Spectrochim. Acta B.* 2020. V. 164. Article 105736.  
<https://doi.org/10.1016/j.sab.2019.105736>
158. *Mishra N.L., Dhara S.* Total reflection X-Ray fluorescence analysis of some biological samples / *X-Ray Fluorescence in Biological Sciences* / Eds. Singh V.K., Kawai J., Tripathi D.K. 2022. P. 203.  
<https://doi.org/10.1002/9781119645719.ch13>
159. *Dalipi R., Borgese L., Zacco A., Tsuji K., Sangiorgi E., Piro R., Bontemp E., Depero L.E.* Determination of trace elements in Italian wines by means of total reflection X-ray fluorescence spectroscopy // *Int. J. Environ. Anal. Chem.* 2015. V. 95. № 13. P. 1208.  
<https://doi.org/10.1080/03067319.2015.1036861>
160. *Obhodas J., Valković V., Vinković A., Sudac D., Čanadžija I., Pensa T., Fiket Z., Turjanskaya A., Bretschneider T., Wilhelm C., Gunchin G., Kregsamer P., Wobrauschek P., Strelci C.* X-ray fluorescence techniques for element abundance analysis in wine // *ACS Omega.* 2021. V. 6. № 35. P. 22643.  
<https://doi.org/10.1021/acsomega.1c02731>
161. *Čepo D.V., Karoglan M., Borgese L., Depero L.E., Marguí E., Jablan J.* Application of benchtop total-reflection X-ray fluorescence spectrometry and chemometrics in classification of origin and type of Croatian wines // *Food Chem.: X.* 2022. V. 13. Article 100209.  
<https://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100209>

162. *Shand C.A., Wendler R.R., Dawson L., Yates K., Stephenson H.* Multivariate analysis of Scotch whisky by total reflection X-ray fluorescence and chemometric methods: A potential tool in the identification of counterfeits // *Anal. Chim. Acta.* 2017. V. 976. P. 14. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2017.04.041>
163. *Gama E.M., Nascentes C.C., Matos R.P., Rodrigues G.D.C., Rodrigues G.D.* A simple method for the multi-elemental analysis of beer using total reflection X-ray fluorescence // *Talanta.* 2017. V. 174. P. 274. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2017.05.059>
164. *Georgieva R.H., Datcheva A.K., Karadjov M.G., Mitsiev S.E., Jordanov J.H., Ivanova E.H.* Determination of the trace element content in Bulgarian bottled potable waters by total reflection X-ray fluorescence analysis // *Bulg. Chem. Commun.* 2014. V. 46. № 4. P. 840.
165. *Siviero G., Cinosi A., Monticelli D., Seralessandri L.* Determination of trace metals in spirits by total reflection X-ray fluorescence spectrometry // *Spectrochim. Acta B.* 2018. V. 144. P. 15. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2018.03.006>
166. *Dalipi R., Borgese L., Tsuji K., Bontempi E., Depero L.E.* Elemental analysis of teas, herbs and their infusions by means of total reflection X-ray fluorescence // *J. Food Compos. Anal.* 2018. V. 67. P. 128. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2018.01.010>
167. *Marguí E., Voutchkov M.* Multielement Analysis of tea and mint infusions by total reflection X-ray fluorescence spectrometry // *Food Anal. Methods.* 2018. V. 11. № 1. P. 282. <https://doi.org/10.1007/s12161-017-0998-8>
168. *Мальцев А.С., Шарыкина Д.С., Чупарина Е.В., Пашкова Г.В., Ревенко А.Г.* Многоэлементный анализ чая методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии с полным внешним отражением // *Аналитика и контроль.* 2019. Т. 23. № 2. С. 247. <https://doi.org/10.15826/analitika.2019.23.2.009>
169. *Winkler A., Rauwolf M., Sterba J. H., Wobrauschek P., Strelci C., Turyanskaya A.* Total reflection X-ray fluorescence analysis of elemental composition of herbal infusions and teas // *J. Sci. Food Agric.* 2020. V. 100. № 11. P. 4226. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10463>
170. *Maltsev A.S., Chuparina E.V., Pashkova G.V., Sokol'nikova J.V., Zarubina O.V., Shuliumova A.N.* Features of sample preparation techniques in the total-reflection X-ray fluorescence analysis of tea leaves // *Food Chem.* 2021. V. 343. Article 128502. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128502>
171. *Zhang X., Jia W., Tang X., Shan Q., Chen Q., Cheng C., Shao J., Ling Y., Hei D.* Geographical discrimination of puerh tea by the determination of elements by low-power total reflection X-ray fluorescence (TXRF) and caffeine and polyphenols by spectrophotometry // *Anal. Lett.* 2023. V. 56. № 4. P. 556. <https://doi.org/10.1080/00032719.2022.2093891>
172. *Marguí E., Dalipi R., Sangiorgi E., Bival Štefan M., Sladonja K., Rogga V., Jablan J.* Determination of essential elements (Mn, Fe, Cu and Zn) in herbal teas by TXRF, FAAS and ICP-OES // *X-Ray Spectrom.* 2022. V. 51. № 3. P. 204. <https://doi.org/10.1002/xrs.3241>
173. *Dalipi R., Berneri R., Curatolo M., Borgese L., Depero L.E., Sangiorgi E.* Total reflection X-ray fluorescence used to distinguish mechanically separated from non-mechanically separated meat // *Spectrochim. Acta B.* 2018. V. 148. P. 16. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2018.06.002>
174. *Machado I., Mondutey S., Pastorino N., Arce V., Pistón M.* A green analytical method for the determination of Cu, Fe, Mn, and Zn in wheat flour using total reflection X-ray fluorescence // *J. Anal. At. Spectrom.* 2018. V. 33. № 7. P. 1264. <https://doi.org/10.1039/C8JA00144H>
175. *Marguí E., De Fátima Marques A., De Lurdes Prisal M., Hidalgo M., Queralt I., Carvalho M.L.* Total reflection X-ray spectrometry (TXRF) for trace elements assessment in edible clams // *Appl. Spectrosc.* 2014. V. 68. № 11. P. 1241. <https://doi.org/10.1366/13-073>
176. *Allegretta I., Squeo G., Gattullo C.E., Porfido C., Cicchetti A., Caponio F., Cesco S., Nicoletto C., Terzano R.* TXRF spectral information enhanced by multivariate analysis: A new strategy for food fingerprint // *Food Chem.* 2023. V. 401. Article 134124. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134124>
177. *Данилов Д.В., Шаранов П.Ю., Алов Н.В.* Определение элементного состава витаминно-минеральных комплексов методом рентгенофлуоресцентного анализа с полным внешним отражением // *Журн. аналит. химии.* 2020. Т. 75. № 6. С. 521. (*Danilov D.V., Sharanov P.Yu., Alov N.V.* Determination of the elemental composition of dietary supplements by total reflection X-ray fluorescence spectrometry // *J. Anal. Chem.* 2020. V. 75. № 6. P. 764.) <https://doi.org/10.1134/S1061934820060040>
178. *Данилов Д.В., Шаранов П.Ю., Алов Н.В.* Разработка способов пробоподготовки витаминно-минеральных комплексов и определение их элементного состава методом рентгенофлуоресцентного анализа с полным внешним отражением // *Хим.-фарм. журн.* 2023. Т. 57. № 2. С. 52.
179. *Shaltout A.A., Abd-Elkader O.H., Lassen P., Fittschen U.A.E.* Elemental and statistical analysis of small individual urinary stones using TXRF spectrometry // *X-Ray Spectrom.* 2023. <https://doi.org/10.1002/xrs.3331>
180. *Carvalho P.M., Marguí E., Kubala-Kukuś A., Banaś D., Machado J., Casal D., Pais D., Santos J.P., Pessanha S.* Evaluation of different analytical approaches using total reflection X-ray fluorescence systems for multielemental analysis of human tissues with different adipose content // *Spectrochim. Acta B.* 2022. V. 198. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2022.106548>
181. *Chubarov V., Cherkashina T., Maltsev A., Chuparina E., Amosova A., Prosekin S.* Investigation of soils and pine needles using WDXRF and TXRF techniques for assessment of the environmental pollution of Shelekhov district, Eastern Siberia, by the aluminum industry and heat power engineering // *Agron.* 2022. V. 12. № 2. Article 454. <https://doi.org/10.3390/agronomy12020454>
182. *Kayser Y., Osán J., Hönicke P., Beckhoff B.* Reliable compositional analysis of airborne particulate matter beyond the quantification limits of total reflection X-ray

- fluorescence // *Anal. Chim. Acta*. 2022. V. 1192. Article 339367.  
<https://doi.org/10.1016/j.aca.2021.339367>
183. *Lara-Almazán N., Zarazúa-Ortega G., Ávila-Pérez P., Carreño-De León C., Barrera-Díaz C.E.* Multielemental analysis by total reflection X-ray fluorescence spectrometry and phytochelatin determination in aquatic plants // *X-Ray Spectrom.* 2021. V. 50. № 5. P. 414.  
<https://doi.org/10.1002/xrs.3220>
184. *Bilo F., Borgese L., Dalipi R., Zacco A., Federici S., Masperi M., Leonasio P., Bontempi E., Depero L.* Elemental analysis of tree leaves by total reflection X-ray fluorescence: New approaches for air quality monitoring // *Chemosphere*. 2017. V. 178. P. 504.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.03.090>
185. *Мальцев А.С., Пашкова Г.В.* Применение метода рентгенофлуоресцентной спектрометрии с полным внешним отражением (TXRF) к геологическим объектам: опыт лаборатории TXRF (ЦКП “Геодинамика и геохронология”) // *Геодинамика и тектонофизика*. 2022. Т. 13. № 2. Статья 0601.  
<https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2s-0601>
186. *Шаранов П.Ю., Алов Н.В.* Рентгенофлуоресцентный анализ с полным внешним отражением твердотельных объектов металлургической промышленности // *Журн. аналит. химии*. 2018. Т. 73. № 11. С. 868. (*Sharanov P.Y., Alov N.V.* Total reflection X-ray fluorescence analysis of solid metallurgical samples // *J. Anal. Chem.* 2018. V. 73. № 11. P. 1085.)  
<https://doi.org/10.1134/S0044450218110129>
187. *Filatova D.G., Alov N.V., Vorobyeva N.A., Rumyantseva M.N., Sharanov P.Y., Seregina I.F., Gaskov A.M.* Quantification of modifiers in advanced materials based on zinc oxide by total reflection X-ray fluorescence and inductively coupled plasma mass spectrometry // *Spectrochim. Acta B*. 2016. V. 118. P. 62.  
<https://doi.org/10.1016/j.sab.2016.02.008>
188. *Филатова Д.Г., Чижов А.С., Румянцева М.Н.* Определение состава нанокompозитов CsPbBr<sub>2</sub>X (X = Cl, I) методом рентгенофлуоресцентного анализа с полным внешним отражением // *Заводск. лаборатория. Диагностика материалов*. 2022. Т. 88. № 4. С. 5.  
<https://doi.org/10.26896/1028-6861-2022-88-4-5-9>
189. *Rodríguez C.M.C., Andreano V., Custo G., Vázquez C.* Potentialities of total reflection X-ray fluorescence spectrometry in environmental contamination: Hair of owned dogs as sentinel of arsenic exposure // *Microchem. J.* 2013. V. 110. P. 402.  
<https://doi.org/10.1016/j.microc.2013.05.009>
190. *Marguí E., Dalipi R., Borgese L., Depero L.E., Queralt I.* Possibilities and drawbacks of total reflection X-ray fluorescence spectrometry as a fast, simple and cost-effective technique for multielement analyses of cosmetics // *Anal. Chim. Acta*. 2019. V. 1075. P. 27.  
<https://doi.org/10.1016/j.aca.2019.05.005>
191. *Shaltout A.A., Abdel-Hameed E.-S.S., Bilo F., Borgese L., Depero L.E.* Direct analysis of essential oils by means of TXRF spectrometry // *X-Ray Spectrom.* 2020. V. 49. № 2. P. 322.  
<https://doi.org/10.1002/xrs.3131>
192. *Fernández-Ruiz R., Redrejo M.J., Pérez-Aparicio R., Saiz-Rodríguez L.* Quantification of recycled rubber content of end-of-life tyres in asphalt bitumen by total-reflection X-ray fluorescence spectrometry // *Spectrochim. Acta B*. 2020. V. 166. Article 105803.  
<https://doi.org/10.1016/j.sab.2020.105803>
193. *Sarapura P., Gonzalez M.F., Gonzalez F., Morzan E., Cerchietti L., Custo G.* Application of total X-Ray fluorescence to gunshot residue determination // *Appl. Radiat.* 2019. V. 153. Article 108841.  
<https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2019.108841>
194. *Gong S.A., Homburger N., Huang, L.* Elemental profiling of total gunshot residue using total reflection X-ray fluorescence spectrometry. // *J. Forensic Sci.* 2022. V. 67. № 3. P. 1198.  
<https://doi.org/10.1111/1556-4029.14988>
195. *Dhara S.* Direct assessment of the variations in the intensity ratios of M and L X-ray lines of U in various compounds by total reflection X-ray fluorescence spectrometry // *Spectrochim. Acta B*. 2023. V. 201. Article 106625.  
<https://doi.org/10.1016/j.sab.2023.106625>
196. *Gazulla M.F., Vicente S., Orduna M., Ventura M.J.* Chemical analysis of very small-sized samples by wavelength-dispersive X-ray fluorescence // *X-Ray Spectrom.* 2012. V. 41. № 3. P. 176–185.  
<https://doi.org/10.1002/xrs.2381>
197. *Пантеева С.В., Черкашина Т.Ю., Ревенко А.Г., Финкельштейн А.Л.* Оценка возможности применения рентгеновского спектрометра с полным внешним отражением S2 PICOFOX для анализа горных пород // *Аналитика и контроль*. 2011. Т. 15. № 3. С. 344.
198. *Амосова А.А., Пантеева С.В., Татаринов В.В., Чубаров В.М., Финкельштейн А.Л.* Рентгенофлуоресцентное определение основных пороодообразующих элементов из образцов массой 50 и 110 мг // *Аналитика и контроль*. 2015. Т. 19. № 2. С. 130.  
<https://doi.org/10.15826/analitika.2015.19.2.009>
199. *Ichikawa S., Onuma H., Nakamura T.* Development of undersized (12.5 mm diameter) low-dilution glass beads for X-ray fluorescence determination of 34 components in 200 mg of igneous rock for applications with geochemical and archeological silicic samples // *X-Ray Spectrom.* 2016. V. 45. № 1. P. 34.  
<https://doi.org/10.1002/xrs.2652>
200. *Кузьмина Т.Г., Тронева М.А., Ромашова Т.В.* Роль петрогенных элементов в возбуждении рентгеновской флуоресценции фтора // *Журн. аналит. химии*. 2020. Т. 75. № 7. С. 636. (*Kuz'mina T.G., Troneva M.A., Romashova T.V.* Role of petrogenic elements in the excitation of X-ray fluorescence of fluorine // *J. Anal. Chem.* 2020. V. 75. № 7. P. 896.)  
<https://doi.org/10.31857/S0044450220070130>
201. *Li X., Yu Z., Xu J., Pan Y., Bo W., Liu B., Zhang P., Bai J., Zhang Q.* The technique of high-pressure powder pressing with polyester film covering for XRF of geochemical samples // *X-Ray Spectrom.* 2023. V. 52. № 1. P. 2.  
<https://doi.org/10.1002/xrs.3147>
202. *Суворова Д.С., Худоногова Е.В., Ревенко А.Г.* Разработка методики рентгенофлуоресцентного определения содержания Та в горных породах различного состава // *Аналитика и контроль*. 2014.

- Т. 18. № 1. С. 23.  
<https://doi.org/10.15826/analitika.2014.181.002>
203. *Shtel'makh S.I., Khudonogova E.V., Revenko A.G.* X-ray fluorescence determination of As and Br concentrations in rocks and soils / Proc. IV Conf. on X-Ray Analysis. Ulaanbaatar, 2015. P. 54.
204. *Худоногова Е.В., Суворова Д.С., Ревенко А.Г.* Рентгенофлуоресцентное определение содержаний Cs, Ba, La, Ce и Nd в горных породах разнообразного состава // Аналитика и контроль. 2015. Т. 19. № 4. С. 347.  
<https://doi.org/10.15826/analitika.2015.19.4.00>
205. *Суворова Д.С., Худоногова Е.В., Ревенко А.Г.* Разработка методики рентгенофлуоресцентного определения содержания Ga, Hf и Ta в редкоземельных рудах // Аналитика и контроль. 2016. Т. 20. № 4. С. 344.  
<https://doi.org/10.15826/analitika.2016.20.4.009>
206. *Suvorova D., Khudonogova E., Revenko A.* X-ray fluorescence determination of Cs, Ba, La, Ce, Nd, and Ta concentrations in rocks of various composition // X-Ray Spectrom. 2017. V. 46. № 3. P. 200.  
<https://doi.org/10.1002/xrs.2747>
207. *Finkelshtein A.L., Chubarov V.M.* X-ray fluorescence determination of the  $\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{tot}}$  ratio in igneous rocks // X-ray Spectrom. 2010. V. 39. P. 17.  
<https://doi.org/10.1002/xrs.1224>
208. *Чубаров В.М., Финкельштейн А.Л.* Рентгенофлуоресцентное определение отношения  $\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{tot}}$  в горных породах // Журн. аналит. химии. 2010. V. 65. № 6. С. 634 (*Chubarov V.M., Finkelshtein A.L.* X-ray fluorescence determination of the  $\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{tot}}$  ratio in rocks // J. Anal. Chem. 2010. V. 65. № 6. P. 620.)  
<https://doi.org/10.1134/S1061934810060122>
209. *Чубаров В.М., Финкельштейн А.Л., Мухетдинова А.В.* Определение соотношения двух- и трехвалентного железа в карбонатных горных породах по эмиссионным линиям К-серии рентгеновского флуоресцентного спектра // Аналитика и контроль. 2011. Т. 15. № 3. С. 339.
210. *Chubarov V., Suvorova D., Mukhetdinova A., Finkelshtein A.* X-ray fluorescence determination of the manganese valence state and speciation in manganese ores // X-Ray Spectrom. 2015. V. 44. № 6. P. 436.  
<https://doi.org/10.1002/xrs.2619>
211. *Симаков В.А., Кордюков С.В., Мошкова М.В.* Обеспечение достоверности и сопоставимости результатов анализа железомарганцевых конкреций и кобальтоносных марганцевых корок // Разведка и охрана недр. 2013. № 6. С. 54.
212. *Cherkashina T.Yu., Bolortuya D., Revenko A.G., Zuzaan P.* Development of X-ray fluorescence technique for the uranium determination in Mongolian coal, coal ash, and phosphate ore // Аналитика и контроль. 2014. Т. 18. № 4. С. 404.
213. *Uhlig S., Möckel R., Pleßow A.* Quantitative analysis of sulphides and sulphates by WD-XRF: Capability and constraints // X-Ray Spectrom. 2016. V. 45. № 3. P. 133.  
<https://doi.org/10.1002/xrs.2679>
214. *Чубаров В.М., Амосова А.А., Финкельштейн А.Л.* Рентгенофлуоресцентное определение рудных элементов железомарганцевых образований // Заводск. лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85. № 12. С. 5.  
<https://doi.org/10.26896/1028-6861-2019-85-12-5-13>
215. *Китов Б.И.* Способ контроля содержания алмазов в пробе // Аналитика и контроль. 2019. Т. 23. № 1. С. 78.  
<https://doi.org/10.15826/analitika.2019.23.1.013>
216. *Чубаров В.М., Борхонова Е.И., Амосова А.А.* Сопоставление способов подготовки проб и коррекции матричных эффектов для рентгенофлуоресцентного определения общего железа и породообразующих элементов в железных рудах // Аналитика и контроль. 2020. Т. 24. № 2. С. 107.  
<https://doi.org/10.15826/analitika.2020.24.2.005>
217. *Прилуцкий О.Ф., Герасимов М.В., Евланов Е.Н.* Анализ космических объектов. Исследование Солнечной системы методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии / Проблемы аналитической химии. Т. 13. Внелабораторный химический анализ / Под ред. Золотова Ю.А. М.: Наука, 2010. С. 422.
218. *Smit Z., Ježersek D., Pelicon P., Vavpetic P., Jersek M., Mirtic B.* Analysis of a chondrite meteorite from Slovenia // X-Ray Spectrom. 2011. V. 40. № 3. P. 205.  
<https://doi.org/10.1002/xrs.1307>
219. *Zurfluh F.J., Hofmann B.A., Gnos E., Eggenberger U.* Evaluation of the utility of handheld XRF in meteoritics // X-Ray Spectrom. 2011. V. 40. № 6. P. 449.  
<https://doi.org/10.1002/xrs.1369>
220. *Stracke A., Palme H., Gellissen M., Münker C., Kleine T., Birbaum K., Günther D., Bourdon B., Zipfel J.* Refractory element fractionation in the Allende meteorite: Implications for solar nebula condensation and the chondritic composition of planetary bodies // Geochim. Cosmochim. Acta. 2012. V. 85. P. 114.  
<https://doi.org/10.1016/j.gca.2012.02.006>
221. *Buchner E., Schmieder M., Kurat G., Brandstätter F., Krautmar U., Ntaflou T., Krochert J.* Buddha from space – An ancient object of art made of a Chinga iron meteorite fragment // Meteorit. Planet. Sci. 2012. V. 47. № 9. P. 1491.  
<https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2012.01409.x>
222. *Антипин В.С., Кузьмин М.И., Печерский Д.М., Цельмович В.А., Язев С.А.* Вещество метеорита “Челябинск”: результаты геохимических и термомангнитных исследований // Докл. АН. 2014. Т. 458. № 1. С. 57. (*Antipin V.S., Kuz'min M.I., Pecherskii D.M., Tsel'movich V.A., Yazev S.A.* The substance of the Chelyabinsk meteorite: Results of geochemical and thermomagnetic studies // Dokl. Earth Sci. 2014. V. 458. № 1. P. 1082.)  
<https://doi.org/10.7868/S0869565214250136>
223. *Gemelli M., D'Orazio M., Folco L.* Chemical analysis of iron meteorites using a hand-held X-ray fluorescence spectrometer // Geostand. Geoanal. Res. 2014. V. 39. № 1. P. 55.  
<https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.2014.00291.x>
224. *Neuland M.B., Meyer S., Mezger K., Riedo A., Tulej M., Würz P.* Probing the Allende meteorite with a miniature laser-ablation mass analyser for space application // Planet. Space Sci. 2014. V. 101. P. 196.  
<https://doi.org/10.1016/j.pss.2014.03.009>

225. *Cesnek M., Štefánek M., Kmječ T., Miglierini M.* Iron meteorite fragment studied by atomic and nuclear analytical methods // AIP Conf. Proc. 2016. V. 1781. Article 020015. <https://doi.org/10.1063/1.4966011>
226. *Антипин В.С., Кузьмин М.И., Мехоношин А.С., Язев С.А.* Вариации химического состава и особенности распределения редких элементов в хондритах фрагментов метеорита Челябинск // Литосфера. 2019. Т. 19. № 2. С. 293. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2019-19-2-293-303>
227. *Дарьин Ф.А., Ракишун Я.В., Сороколетов Д.С., Дарьин А.В., Ращенко С.В., Шарыгин В.В., Сенин Р.А., Гогин А.А.* Распределение германия и других элементов в образцах метеорита Челябинск по данным сканирующего рентгенофлуоресцентного микроанализа на источнике синхротронного излучения // Известия РАН. Сер. Физ. 2019. Т. 83. № 11. С. 1568. <https://doi.org/10.1134/S0367676519110073>
228. *Fendrich K.V., Ebel D.S.* Comparison of the Murchison CM2 and Allende CV3 chondrites // Meteorit. Planet. Sci. 2021. V. 56. № 1. P. 77. <https://doi.org/10.1111/maps.13623>
229. *Goyal S.K., Shanmugam M., Vadawale S., Banerjee D., Acharya Y.B., Murty S.V.S.* Laboratory XRF measurements using alpha particle X-ray spectrometer of Chandrayaan-2 rover: comparison with geant4 simulation results / Proc. 2013 IEEE Nucl. Sci. Symp. and Med. Imaging Conf. (2013 NSS/MIC). Seoul, 2013. P. 1. <https://doi.org/10.1109/NSSMIC.2013.6829708>
230. *Narendranath S., Athiray P.S., Sreekumar P., Radhakrishna V., Tyagi A., Kellett B.J.* Mapping lunar surface chemistry: New prospects with the Chandrayaan-2 large area soft X-ray spectrometer (CLASS) // Adv. Space Res. 2014. V. 54. № 10. P. 1993. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.04.008>
231. *Shanmugam M., Murty S.V.S., Acharya Y.B., Goyal S.K., Patel A.R., Shah B., Hait A.K., Patinge A., Subrahmanyam D.* Alpha particle X-ray spectrometer (APXS) on-board Chandrayaan-2 rover // Adv. Space Res. 2014. V. 54. № 10. P. 1974. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.03.011>
232. *Athiray P.S., Narendranath S., Sreekumar P., Grande M.* C1XS results – First measurement of enhanced sodium on the lunar surface // Planet. Space Sci. 2014. V. 104. P. 279. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2014.10.010>
233. *Vadawale S.V., Shanmugam M., Acharya Y.B., Patel A.R., Goyal S.K., Shah B., Hait A.K., Patinge A., Subrahmanyam D.* Solar X-ray Monitor (XSM) on-board Chandrayaan-2 orbiter // Adv. Space Res. 2014. V. 54. № 10. P. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.06.002>
234. *Колесников Е.К.* Метод дистанционного рентгено-спектрального анализа поверхностных пород безатмосферных небесных тел, основанный на искусственном возбуждении характеристического излучения электронным пучком // Космические исследования. 2016. Т. 54. № 6. С. 524. <https://doi.org/10.1134/S0010952516060058>
235. *Reiss P., Kerscher F., Grill L.* Thermogravimetric analysis of chemical reduction processes to produce oxygen from lunar regolith // Planet. Space Sci. 2020. V. 181. Article 104795. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2019.104795>
236. *Kolesnikov E.K., Zelensky A.G.* Remote X-ray spectral elemental analysis of lunar surface rocks using artificial electron-beam excited characteristic X-ray emission // Planet. Space Sci. 2020. V. 193. Article 105065. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2020.105065>
237. *Heinicke C., Adeli S., Baque M., Correale G., Fateri M., Jaret S., Kopacz N., Ormoh J., Poulet L., Verseux C.* Equipping an extraterrestrial laboratory: Overview of open research questions and recommended instrumentation for the Moon // Adv. Space Res. 2021. V. 68. № 6. P. 2565. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.04.047>
238. *Маров М.Я., Хантпресс У.Т.* Советские роботы в Солнечной системе. Технологии и открытия. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. 612 с.
239. *Campbell J.L., Perrett G.M., Maxwell J.A., Nield E., Gellert R., King P.L., Lee M., O'Meara J.M., Pradler I.* Refinement of the Compton-Rayleigh scatter ratio method for use on the Mars science laboratory alpha particle X-ray spectrometer // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2013. V. 302. P. 24. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2013.03.006>
240. *Berger J.A., King P.L., Gellert R., Campbell J.L., Boyd N.I., Pradler I., Perrett G.M., Edgett K.S., Van Bommel S.J.V., Schmid M.E., Lee R.E.H.* MSL-APXS titanium observation tray measurements: Laboratory experiments and results for the Rocknest fines at the Curiosity field site in Gale Crater, Mars // J. Geophys. Res.: Planets. 2014. V. 119. № 5. P. 1046. <https://doi.org/10.1002/2013je004519>
241. *Campbell J.L., Perrett G.M., Gellert R., Andrushenko S.M., Boyd N.I., Maxwell J.A., King P.L., Schofield C.D.M.* Calibration of the Mars science laboratory alpha particle X-Ray spectrometer // Space Sci. Rev. 2012. V. 170. P. 319. <https://doi.org/10.1007/s11214-012-9873-5>
242. *Campbell J.L., King P.L., Burkemper L., Berger J.A., Gellert R., Boyd N.I., Perrett G.M., Pradler I., Thompson L., Edgett K.S., Yingst R.A.* The Mars science laboratory APXS calibration target: Comparison of Martian measurements with the terrestrial calibration // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B. 2014. V. 323. P. 49. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2014.01.011>
243. *Perrett G.M., Campbell J.L., Glasauer S., Pardo R.* Quantitative determination of mineral phase effects observed in APXS analyses of geochemical reference materials // X-Ray Spectrom. 2014. V. 43. № 6. P. 359. <https://doi.org/10.1002/xrs.2563>
244. *De Angelis S., De Sanctis M.C., Ammannito E., Carli C., Di Iorio T., Altieri F.* The Ma\_Miss instrument performance, I: Analysis of rocks powders by Martian VNIR spectrometer // Planet. Space Sci. 2014. V. 101. P. 89. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2014.06.010>
245. *Van Bommel S.J., Gellert R., Berger J.A., Campbell J.L., Thompson L.M., Edgett K.S., McBride M.J., Minitti M.E., Pradler I., Boyd N.I.* Deconvolution of distinct lithology chemistry through oversampling with the Mars science laboratory alpha particle X-ray spectrometer // X-Ray

- Spectrom. 2016. V. 45. №. 3. P. 155.  
<https://doi.org/10.1002/xrs.2681>
246. *Perrett G.M., Campbell J.L., Gellert R., King P.L., Nield E., O'Meara J.M., Pradler I.* Refinement of the Compton-Rayleigh scatter ratio method for use on the Mars science laboratory alpha particle X-ray spectrometer: II – extraction of invisible element content // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2016. V. 368. P. 129.  
<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2015.10.076>
247. *Perrett G.M., Maxwell J.A., Campbell J.L.* Combined X-ray diffraction and alpha particle X-ray spectrometer analysis of geologic materials // X-ray Spectrom. 2017. V. 46. P. 171.  
<https://doi.org/10.1002/xrs.2743>
248. *Flannigan E.L., Campbell J.L.* Emulation of the Curiosity rover alpha particle X-ray spectrometer with accelerator-based PIXE: Implications for calibration // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2017. V. 413. P. 19.  
<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2017.10.002>
249. *Cloutis Ed, Stromberg J., Applin D., Connell S., Kubanek K., Kuik J., Lechowicz A., Parkinson A., Ramirez M., Turenne N., Cieszecki J., Germinario M., Kum R., Parson R., Walker R., Wiens E., Wiens J., Mertzman S.* The Lake St. Martin impact structure (Manitoba, Canada): A simulated rover exploration of a sulfate-bearing impact crater // Planet. Space Sci. 2021. V. 208. Article 105336.  
<https://doi.org/10.1016/j.pss.2021.105336>
250. *Kerber L., Head J.W., Blewett D.T., Solomon S.C., Wilson L., Murchie S.L., Robinson M.S., Denevi B.W., Domingue D.L.* The global distribution of pyroclastic deposits on Mercury: The view from MESSENGER flybys 1–3 // Planet. Space Sci. 2011. V. 59. P. 1895.  
<https://doi.org/10.1016/j.pss.2011.03.020>
251. *Solomon S.C., McNutt Jr. R.L., Prockter L.M.* Mercury after the MESSENGER flybys: An introduction to the special issue of Planetary and Space Science // Planet. Space Sci. 2011. V. 59. P. 1827.  
<https://doi.org/10.1016/j.pss.2011.08.004>
252. *Nittler L.R., Starr R.D., Weider S.Z., McCoy T.J., Boynton W.V., Ebel D.S., Ernst C.M., Evans L.G., Goldsten J.O., Hamara D.K., Lawrence D.J., McNutt Jr. R.L., Schlemm II C.E., Solomon S.C., Sprague A.L.* The major-element composition of Mercury's surface from MESSENGER X-ray spectrometry // Science. 2011. V. 333. P. 1847.  
<https://doi.org/10.1126/science.1211567>
253. *Starr R.D., Schriver D., Nittler L.R., Weider S.Z., Byrne P.K., Ho G.C., Rhodes E.A., Schlemm II C.E., Solomon S.C., Trávníček P.M.* MESSENGER detection of electron-induced X-ray fluorescence from Mercury's surface // J. Geophys. Res.: Planets. 2012. V. 117. № E12.  
<https://doi.org/10.1029/2012JE004118>
254. *Bannister N.P., Fraser G.W., Lindsay S.T., Martindale A., Talboys D.L.* Astrophysical objects observed by the MESSENGER X-ray spectrometer during Mercury flybys // Planet. Space Sci. 2012. V. 69. P. 28.  
<https://doi.org/10.1016/j.pss.2012.05.006>
255. *Weider S.Z., Nittler L.R., Starr R.D., McCoy T.J., Solomon S.C.* Variations in the abundance of iron on Mercury's surface from MESSENGER X-ray Spectrometer observations // Icarus. 2014. V. 235. P. 170.  
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2014.03.002>
256. *Starr R.D., Schlemm II C.E., Ho G.C., Nittler L.R., Gold R.E., Solomon S.C.* Calibration of the MESSENGER X-ray spectrometer // Planet. Space Sci. 2016. V. 122. P. 13.  
<https://doi.org/10.1016/j.pss.2016.01.003>
257. *Nittler L.R., Frank E.A., Weider Sh.Z., Crapster-Prengont E., Vorburger A., Starr R.D., Solomon S.C.* Global major-element maps of Mercury from four years of MESSENGER X-Ray Spectrometer observations // Icarus. 2020. V. 345. Article 113716.  
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2020.113716>
258. *Korablev O., Gerasimov M., Brad Dalton J., Hand K., Lebreton J.-P., Webster C.* Methods and measurements to assess physical and geochemical conditions at the surface of Europa // Adv. Space Res. 2011. V. 48. P. 702.  
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.12.010>
259. *Duffard R., Kumar K., Pirrotta S., Salatti M., Kubinyi M., Derz U., Armitage R.M.G., Arloth S., Donati L., Duricic A., Flahaut J., Hempel S., Pollinger A., Poulsen S.* A multiple-rendezvous, sample-return mission to two near-Earth asteroids // Adv. Space Res. 2011. V. 48. P. 120.  
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.02.013>
260. *Bridges J.C., Burchell M.J., Changela H.C., Foster N.J., Creighton J.A., Carpenter J.D., Gurman S.J., Franchi I.A., Busemann H.* Iron oxides in comet 81P/Wild 2 // Meteorit. Planet. Sci. 2010. V. 45. № 1. P. 55.  
<https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2009.01005.x>
261. *Grun E., Sternovsky Z., Horanyi M., Hoxie V., Robertson S., Xi J., Auer S., Landgraf M., Postberg F., Price M.C., Srama R., Starkey N.A., Hillier J.K., Franchi I.A., Tso P., Westphal A., Gainsforth Z.* Active cosmic dust collector // Planet. Space Sci. 2012. V. 60. P. 261.  
<https://doi.org/10.1016/j.pss.2011.09.006>
262. *Meyer A., Grotfeld S., Gross A., Wätzig H., Ott I.* TXRF as a tool for the quantification of Au and Pt metallodrugs: Determination of recovery rates and precision in the ppb concentration range // J. Pharm. Biomed. Anal. 2012. V. 70. P. 713.
263. *Marguí E., Queralt I., Hidalgo M.* Determination of platinum group metal catalyst residues in active pharmaceutical ingredients by means of TXRF // Spectrochim. Acta B. 2013. V. 86. P. 50.
264. *Nevolova S., Skladal P.* Nanomaterials for biomedical imaging and targeting // Microchim. Acta. 2022. V. 189. P. 163.  
<https://doi.org/10.1007/s00604-022-05215-7>
265. *Bakand S., Hayes A., Dechsakulthorn F.* Nanoparticles: A review of particle toxicology following inhalation exposure // Inhal. Toxicol. 2012. V. 24. № 2. P. 125.  
<https://doi.org/10.3109/08958378.2010.642021>
266. *Lombi E., Scheckel K.G., Kempson I.M.* In situ analysis of metal(loid)s in plants: State of the art and artefacts // Environ. Exp. Bot. 2011. V. 72. P. 3. doi: . 2010.04.005  
<https://doi.org/10.1016/j.envexpbot>
267. *Bertoni M.I., Sarau G., Fenning D.P., Rinio M., Rose V., Maser J., Buonassisi T.* Nano-XRF and micro-Raman studies of metal impurity decoration around dislocations in multicrystalline silicon / 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conf. Austin, TX, USA, 2012. P. 001613.  
<https://doi.org/10.1109/PVSC.2012.6317904>

268. *Lubeck J., Beckhoff B., Fliegauf R., Holfelder I., Hönicke P., Müller M., Pollakowski B., Reinhardt F., Weser J.* A novel instrument for quantitative nanoanalytics involving complementary X-ray methodologies // *Rev. Sci. Instrum.* 2013. V. 84. Article 045106. <https://doi.org/10.1063/1.4798299>
269. *Nazemi Z., Mehdikhani-Nahrkhalaji M., Haghbin-Nazarpak M., Staji M., Kalani M.M.* Antibacterial activity evaluation of bioactive glass and biphasic calcium phosphate nanopowders mixtures // *Appl. Phys. A.* 2016. V. 122. P. 1063. <https://doi.org/10.1007/s00339-016-0587-5>
270. *Manohar N., Reynoso F.J., Diagaradjane, Krishnan S., Cho S.H.* Quantitative imaging of gold nanoparticle distribution in a tumorbearing mouse using benchtop X-ray fluorescence computed tomography // *Sci. Rep.* 2016. V. 6. Article 22079. <https://doi.org/10.1038/srep22079>
271. *Streli C., Rauwolf M., Turyanskaya A., Ingerle D., Wobrauschek P.* Elemental imaging of trace elements in bone samples using micro and nanoX-ray fluorescence spectrometry // *Appl. Radiat. Isot.* 2019. V. 149. P. 200. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2019.04.033>
272. *Jung S.* Monte Carlo modeling of gold nanoparticles detection limits of benchtop three-dimensional L- and K-shell X-ray fluorescence mapping systems // *X-Ray Spectrom.* 2023. V. 52. № 1. P. 28. <https://doi.org/10.1002/xrs.3302>
273. *Recknagel S., Bresch H., Kipphardt H., Koch M., Rosner M., Resch-Genger U.* Trends in selected fields of reference material production // *Anal. Bioanal. Chem.* 2022. V. 414. P. 4281. <https://doi.org/10.1007/s00216-022-03996-7>