

## Исследование рентгеновского излучения и развитие рентгеновского приборостроения в Санкт-Петербурге

К 125-летию открытия  
рентгеновского излучения

**\*Б.Д. Калинин**

ООО «Прецизионные Технологии»,  
Российская Федерация, 196066, Санкт-Петербург, ул. Алтайская, 12

Адрес для переписки: Калинин Борис Дмитриевич, E-mail: kalinin\_boris@mail.ru

Поступила в редакцию 10 августа 2020 г., после исправления – 31 августа 2020 г.

В работе рассмотрена история начала исследований рентгеновского излучения и развития рентгеновского приборостроения в Санкт-Петербурге. Приведены сведения из истории открытия рентгеновского излучения, сделанного профессором Вюрцбургского университета Вильгельмом Конрадом Рентгеном 8 ноября 1895 года. Описана история становления и развития основных научных центров Ленинграда по изучению рентгеновского излучения, предприятий, разрабатывающих и выпускающих рентгеновские приборы, и вклад выдающихся ученых в развитие этой области знаний. К числу таких центров отнесены: Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, созданный на базе первого в мире Государственного рентгенологического и радиологического университета; НПО «Буревестник» (в настоящее время «АО Инновационный Центр «Буревестник»); кафедра электроники твердого тела Санкт-Петербургского государственного университета; кафедра ядерной геофизики Ленинградского государственного университета; Всероссийский научно-исследовательский институт разведочной геофизики Рудгеофизика им. А.А. Логачева; Ленинградский (в настоящее время Петербургский) институт ядерной физики им. Б.П. Константинова РАН; Ленинградское объединение электронного приборостроения «Светлана» (в настоящее время АО «Светлана-Рентген»); Научно-исследовательская и производственная компания НИПК «ЭЛЕКТРОН»; Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). Названы имена и достижения выдающихся ученых и разработчиков рентгеновской аппаратуры, работающих в ВУЗах и на предприятиях города. Перечислены рентгеновские приборы, которые разработаны на Ленинградских предприятиях от первых моделей, до современного состояния рентгеновских приборов, которые разрабатываются на предприятиях Санкт-Петербурга. Больше внимание уделено рентгенофлуоресцентной аналитической технике и способам рентгенофлуоресцентного анализа.

**Ключевые слова:** рентгеновское излучение, спектрометр, анализатор, дифрактометр, сепаратор, дефектоскоп, рентгеновская трубка, кристалл-анализатор, детектор.

For citation: *Analitika i kontrol'* [Analytics and Control], 2020, vol. 24, no. 3, pp. 201-229

DOI: 10.15826/analitika.2020.24.3.005

## X-ray radiation research and the development of X-ray engineering in St. Petersburg

Dedicated to the 125th anniversary  
of the discovery of X-ray radiation

**\*B.D. Kalinin**

"Pretsizion Tekhnologies" Co. Lt,  
ul. Altai, 12, St. Petersburg, 196066, Russian Federation

Corresponding author: Boris D. Kalinin, E-mail: kalinin\_boris@mail.ru

Submitted 10 August 2020, received in revised form 31 August 2020

The history of the beginning of X-ray research and X-ray instrumentation development in St. Petersburg is summarized in the current article. The history of the discovery of X-ray radiation, made by Professor Wilhelm

Konrad Roentgen of The University of Wuerzburg on November 8, 1895 is briefly described. The history of the formation and the development of the main scientific centers in Leningrad for the study of X-rays and the contribution of outstanding scientists in the development of this field of knowledge and the history of the formation and growth of enterprises developing and producing X-ray devices is explained. These centers include A.F. Ioffe RAS Institute of Physics and Technology, created on the basis of the world's first state X-ray and radiological institute, The Department of Solid Body Electronics of St. Petersburg State University, The NGO "Burevestnik" (now the "Burevestnik" Innovation Center), The Department of Nuclear Geophysics of Leningrad State University, The All-Russian Research Institute of Exploratory Geophysics name after Rudgeophysic A.A. Logachev, The RAS Leningrad (now St. Petersburg) Institute of Nuclear Physics named after B.P. Konstantinov, The "Svetlana" (currently "Svetlana-Roentgen") Leningrad Association of Electronic Instrumentation, The NIPC ELECTRON Research and Production Company, and The "LETI" St. Petersburg State Electrical University named after V.I. Ul'yanov (Lenin). The names and achievements of the outstanding scientists and developers of X-ray equipment working in universities and enterprises of the city are named. X-ray devices, which were developed in Leningrad enterprises from the first models to the state-of-the-art X-ray devices that were being developed at the St. Petersburg plants are listed. Additional attention is paid to X-ray fluorescent analytical techniques and X-ray fluorescent analysis methods.

**Keywords:** X-ray, spectrometer, analyzer, diffractometer, separator, defector, X-ray tube, crystal analyzer, detector.

## ВВЕДЕНИЕ

28 декабря 1895 г. на собрании Вюрцбургского физико-медицинского общества ректор (с 1894 г.) Вюрцбургского университета 50-летний Вильгельм Конрад Рентген впервые сообщил о новом роде лучей, открытых им 8 ноября 1895 г., а также о первых результатах исследования их свойств. Это открытие явилось началом новой эры в развитии физических представлений о строении вещества. В заключение своего сообщения, Рентген обсуждает вопрос о возможной природе открытых им лучей и склоняется к предположению, что открытые им лучи являются продольными колебаниями в эфире, в противовес поперечным световым колебаниям. Как позднее заметил его ученик Иоффе, это была, по-видимому, единственная ошибка, которую когда-либо допустил исследователь [1].

Одновременно была выпущена брошюра [2, 3] по теме выступления (рис. 1), которая была переведена на 5 языков, в том числе на русский. Эта информация вызвала большой интерес ученых во

всем мире, и в следующем 1896 г. было опубликовано более 1000 работ, посвященных рентгеновскому излучению, в том числе 103 сообщения в журнале Российского физико-химического общества [4].

После открытия рентгеновских лучей во многих странах почти одновременно были созданы аппараты, использовавшие уникальные свойства этого излучения. В.К. Рентген занимался X-лучами немногим более года (с 8 ноября 1895 года по март 1897 года). Результаты своих исследований он изложил в трёх сообщениях: в первом (декабрь 1895 г., [2]) описал условия эксперимента и выявил значение этого открытия для медицинских целей и для производственной обработки материалов; во втором (март 1896 г.) описал появление электропроводности в газах, облучаемых рентгеновскими лучами; в третьем (март 1897 г.) описал опыты по рассеянию X-лучей [5]. В этих трёх сообщениях было дано исчерпывающее описание новых лучей. Впоследствии сотни работ его последователей, опубликованных затем на протяжении 12 лет, не могли ни прибавить, ни изменить ничего существенного. В.К. Рентген, потерявший интерес к X-лучам, говорил своим коллегам: «Я уже всё написал, не тратьте зря время» [6].

Поскольку катодные лучи были открыты ещё в 1859 г. Юлиусом Плюккером [7], многие исследователи, работающие с катодными лучами и с возникающим при этом рентгеновским излучением, ещё до В.К. Рентгена стояли на пороге открытия всепроникающих лучей, но не смогли распорядиться своими исследованиями должным образом [6]. Публикуемые работы по этим исследованиям читали все физики, кто занимался катодными лучами, и видели свечение экрана и почернение фотопластинок, а занимались ими почти все физики, и ни у кого не появилась такая «наивная» мысль, какая появилась у Рентгена: а почему экран светится? Им был сделан вывод, что не катодные лучи вызывали порчу фотопластинок, а новые, неизвестные.



**Рис. 1.** Титульный лист брошюры «О новом роде лучей».  
**Fig. 1.** Title sheet of the "About the new kind of rays" brochure.

За открытие рентгеновских лучей Рентгену в 1901 г. была присуждена первая Нобелевская премия по физике, причём Нобелевский комитет подчёркивал практическую важность его открытия. Приоритет Рентгена в открытии признаётся во всём мире, кроме короткого периода в 12 лет на территории фашистской Германии. Филипп Ленард (лауреат Нобелевской премии 1905 г. за исследовательские работы по катодным лучам) ещё до В.К. Рентгена получал X-лучи, но не принял их всерьёз и посчитал дефектом аппаратуры. Его стараниями имя Рентгена в нацистской Германии было изъято из учебников физики и появились лучи Ленарда [8].

В С.-Петербурге были проведены работы по различным применениям этого излучения [9]. Была попытка М.И. Немёновым создать Рентгенологический институт, однако следует отметить, что в дореволюционной России это направление исследований не получило широкого распространения и в целом в дореволюционной России приборостроительная отрасль как таковая отсутствовала.

## НАУЧНЫЕ ЦЕНТРЫ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И РЕНТГЕНОВСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ В ЛЕНИНГРАДЕ/САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ

### ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ. А.Ф. ИОФФЕ РАН

В 1918 г. по инициативе М.И. Немёнова и А.Ф. Иоффе при поддержке А.В. Луначарского в Петрограде был создан первый в мире Государственный рентгенологический и радиологический институт. Датой создания института считается 23 сентября 1918 г. Первым президентом института стал А.Ф. Иоффе, а вице-президентом и руководителем медико-биологического отдела – профессор М.И. Немёнов. Следует отметить, что А.Ф. Иоффе несколько лет работал под руководством В.К. Рентгена в Германии. Создание этого института в сентябре 1920 г. приветствовал В.К. Рентген в поздравительном письме к М.И. Немёнову: «*Как величественно запланирован и осуществлён Ваш институт: я этим поражён и очень обрадован, что Вам удалось в тяжёлых условиях привести к счастливому концу такое огромное предприятие*». Лауреат Нобелевских премий в области физики и химии (1911 г.) Мария Склодовская-Кюри, основательница института Радия в Париже, лично подписывала сертификаты препаратов радия, высылаемых в Институт для использования в лечебных и научных целях [10].

В дальнейшем этот институт был реорганизован: в 1921 г. из-за разного видения отцов-основателей дальнейших путей развития Института, было принято решение о его разделении. Из состава учреждения выделились Государственный физико-технический рентгенологический институт (ФТИ), под руко-



**Рис. 2.** Немёнов Михаил Исаевич 1880-1950 гг. Профессор, доктор биологических наук, доктор медицинских наук. Заслуженный деятель науки РСФСР. Награждён: орденом Ленина, 2 ордена Трудового Красного Знамени, орденом Отечественной войны II степени, 2 ордена Красной Звезды.

**Fig. 2.** Mikhail Nemonov, 1880-1950, Professor, Doctor of Biological Sciences, Doctor of Medical Sciences, Distinguished scientist of the RSFSR. Awarded: Order of Lenin, 2 Orders of the Red Banner of Labor, Order of the Patriotic War II, 2 Orders of the Red Star.

водством А.Ф. Иоффе, в задачи которого входило исследование рентгеновских лучей, строения вещества, электронных и магнитных явлений и выпуск физико-технических приборов, Радиевый институт, который возглавил вернувшийся в Петроград В.И. Вернадский, а также Государственный оптический институт. Руководить самим Государственным Рентгенологическим и Радиологическим институтом остался профессор М.И. Немёнов. В этом же году М.И. Немёнов награждается орденом Трудового Красного Знамени. Это был первый орденосец среди учёных страны [10] (рис. 2).

В декабре 1950 г., во время кампании по «борьбе с космополитизмом», А.Ф. Иоффе был снят с поста директора и выведен из состава Учёного совета института. В 1952 г. он возглавил лабораторию полупроводников АН СССР. В 1954 г. на основе данной лаборатории был организован Институт полупроводников АН СССР (ИПАН) [11] (рис. 3).

Работы по рентгеновской спектроскопии в ФТИ начались в 1918 г., когда П.Л. Капица, будущий академик АН СССР (1939 г.) и лауреат Нобелевской премии (1978 г.) предложил новый метод фокусировки рентгеновских лучей с помощью монокристаллов, изогнутых по цилиндрической поверхности. В 1919 г. руководителем рентгеновской лаборатории, а затем и рентгентехнического отдела ФТИ, становится один из пионеров практического использования лучей Рентгена в нашей стране Н.Я. Селяков. Под его руководством в течение тринадцати лет была



**Рис. 3.** Иоффе Абрам Федорович 1889-1960 гг. Доктор физико-математических наук, академик АН СССР. Заслуженный деятель науки РСФСР. Герой Социалистического труда. Лауреат Сталинской и Ленинской премий. Награждён: 3 ордена Ленина.

**Fig. 3.** Abram Ioffe, 1889-1960, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Academic of The USSR Academy of Sciences, Distinguished Scientist of the Russian Federation, Hero of Socialist Labor, Winner of the Stalin and Lenin Prizes. Awarded: 3 Orders of Lenin.

создана научная база для развития рентгенографического анализа в СССР. Широкую известность в науке приобрела рентгеновская лаборатория ФТИ исследованиями структуры стекла, природы мартенсита, процессов разгара артиллерийских орудий, изучением тонкой структуры спектров рентгеновских лучей. Здесь же были разработаны конструкции рентгеновских трубок и камер для рентгеноструктурного анализа [12].

В 60-е годы новым импульсом развития рентгенографии в нашей стране стали исследования в ИПАНе, который позднее (с 1972 г.) вошел в структуру ФТИ. Под руководством А.М. Елистратова (1903-1965 гг.) в институте сформировалось новое направление – исследование реальной структуры кристаллов. Оно было вызвано временем: в стране началось промышленное производство кристаллов полупроводников, основы будущей электроники, а методов их исследования не было. Поскольку свойства кристаллов полупроводников сильно зависят от несовершенств структуры, новое направление приобрело народно-хозяйственное значение.

Наряду с методами диффузного рассеяния, для оценки структурного несовершенства кристаллов весьма перспективным является метод, основанный на измерении толщинных зависимостей интегральных интенсивностей в условиях аномального прохождения рентгеновских лучей (АПРЛ). Данный эффект, открытый немецким ученым Х. Борманом

в 1940 г., стал физической основой изучения реальной структуры кристаллов. Эффект обладал чрезвычайной чувствительностью к дефектам структуры кристаллов и позволял оценивать структурное несовершенство кристаллов количественно. Метод АПРЛ в ФТИ был развит в работах Александра Михайловича Елистратова и О.Н. Ефимова [13] для исследования реальной структуры кристаллов. За короткие годы продуктивной работы в ИПАНе с 1956 по 1965 гг. А.М. Елистратов успел создать свою научную школу, известная не только в СССР, но и за рубежом. Ее отличает совместное использование дифракционных методов (дифрактометрии, топографии и электронной микроскопии) в исследовании реальной структуры материалов, существенно увеличивающих их эффективность.

С 1972 г. бывшая лаборатория А.М. Елистратова продолжает успешно работать в ФТИ им. А.Ф. Иоффе. К ее достижениям следует отнести циклы работ (Л.М. Сорокин, Р.Н. Кютт, Т.С. Аргунова, И.Л. Шульпина) по современной рентгеновской дифрактометрии и топографии и их применению в исследовании новых материалов (гетероструктур, композитов, наноматериалов и др.). Выполненные в лаборатории рентгенотопографические исследования внесли свой вклад в становление космического материаловедения.

В настоящее время в ФТИ работает две рентгеновские лаборатории, ведущие совместные исследования с технологами. Результатами их исследований были рекомендации по получению оптимальных соединений (в большинстве случаев полупроводниковых и полимеров), проводимых на стандартных дифрактометрах производства НПО «Буревестник», а также на дифрактометрах производства Европы и Японии. Из современных достижений ученых ФТИ следует отметить: малоугловые исследования, в основном полимеров; рентгеновские исследования пониженной симметрии в двухкомпонентных полупроводниковых кристаллах (например, галлий-мышьяк) за счет диагонального смещения атомов одного из компонентов (мышьяк) в элементарной ячейке. Был создан спектрометр для исследования тонкой структуры края поглощения рентгеновского излучения в материале путем измерения EXAFS-спектров (Extended X-ray Absorption Fine Structure). Спектрометр в сочетании с дифрактометром на отпаянных трубках или источниках с вращающимся анодом, который позволяет проводить измерения методом малоуглового рентгеновского рассеяния, дали возможность определить размеры и получить информацию об электронной и кристаллической структуре нанокластеров, образовавшихся в результате спинодального распада твердых растворов.

## КАФЕДРА ЭЛЕКТРОНИКИ ТВЁРДОГО ТЕЛА САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

История образования становления кафедры электроники твердого тела тесно связана с именами академиков Петра Ивановича Лукирского и Александра Алексеевича Лебедева, которые в 1916 г. окончили СПбГУ и были оставлены при университете для подготовки к профессорскому званию.

30 августа 1930 г. – день рождения кафедры рентгеноסקопии и электричества; с 1969 г. кафедра стала называться кафедрой электроники твердого тела (**ЭТТ**). Первым заведующим стал будущий академик АН СССР П.И. Лукирский [14] (рис. 4).

В круг научных интересов П.И. Лукирского входила физика и дифракция рентгеновского излучения (**РИ**). Используя уникальные возможности изобретенного им метода задерживающего поля в сферическом конденсаторе (конденсатор Лукирского; работы были выполнены в ФТИ под руководством А.Ф. Иоффе), Петр Иванович получил не только интегральные характеристики фотоэмиссии, но и энергетические спектры выбитых электронов, внося тем самым вклад в обоснование квантовой природы взаимодействия света с твердыми телами (1928 г.). Ему удалось заполнить существовавший до того пробел в изучении спектра электромагнитных волн – измерить спектры мягкого рентгеновского излучения углерода, алюминия и цинка. Вскоре он опубликовал работы по дисперсии РИ и эффекту Комптона.

В 1929 г. П.И. Лукирский по предложению А.Ф. Иоффе организовал отдел в ФТИ, в котором



**Рис. 4.** Лукирский Петр Иванович 1894-1954 гг. Доктор физико-математических наук, академик АН СССР, первый заведующий кафедрой электроники твердого тела СПбГУ. Награждён: орден Ленина, 2 ордена Трудового Красного Знамени.

**Fig. 4.** Piotr Lukirsky, 1894-1954, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Academic of The USSR Academy of Sciences, the first head of the Department of Solid Body Electronics of St. Petersburg State University. Awarded: Order of Lenin, 2 Orders of the Red Banner of Labor.



**Рис. 5.** Лебедев Александр Алексеевич 1893-1969 гг. Доктор физико-математических наук, академик АН СССР. Герой Социалистического Труда. Награждён: 5 орденов Ленина, 3 ордена Трудового Красного Знамени, орден Знак Почета. Ленинская премия и 2 Сталинские премии.

**Fig. 5.** Alexander Lebedev, 1893-1969, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Academic of The USSR Academy of Sciences, Hero of Socialist Labor. Awarded: 5 Orders of Lenin, 3 Orders of the Red Banner of Labor, Order of Honor, Lenin Prize and 2 Stalin Prizes.

проводились исследования дифракции рентгеновского излучения, быстрых и медленных электронов, а также изучение внешнего рентгеновского фотоэффекта. Эти исследования проводились им и в университете [15]. В 1938 г. П.И. Лукирский арестовали по обвинению в контрреволюционной деятельности. Он был осуждён и реабилитирован только в 1942 г. После освобождения он работал в ФТИ и заведовал кафедрой в Политехническом институте. В годы Великой Отечественной войны кафедра практически прекратила своё существование. Возрождение кафедры связано с приходом нового заведующего кафедрой академика А.А. Лебедева в 1947 г. (рис. 5).

Большинство работ, выполнявшихся А.А. Лебедевым, носили закрытый характер и были строго засекречены. Известны его работы по исследованию коротковолнового оптического излучения Солнца и рентгеновского излучения за пределами земной атмосферы с помощью космической аппаратуры. Академией наук СССР учреждена премия имени А.А. Лебедева.

В 1954 г. на кафедру пришел Андрей Петрович Лукирский, сын П.И. Лукирского. Первые работы А.П. Лукирского посвящены разработке принципов построения спектральной аппаратуры (дифракционные решётки и детекторы) для работы в области между ультрафиолетовым и рентгеновским диапазонами (излучение с энергией фотонов от десятков до сотен эВ). Это направление исследований получило название ультрамягкой рентгеновской спектроскопии (**УМРС**) и имело решающее значение

для формирования современных представлений об электронной структуре многоатомных систем. Мировым сообществом признано, что основной вклад в развитие методов мягкой и УМРС внесли ученые С.-Петербургского университета и, прежде всего, доктор физико-математических наук А.П. Лукирский [16].

Под руководством А.П. Лукирского в НПО «Буревестник» началось производство уникальных рентгеновских приборов, ориентированных на фундаментальные физические исследования свойств твёрдого тела и свойств поверхности, в исследованиях высокотемпературной плазмы и космического пространства. В НПО «Буревестник» эти работы проводились под руководством И.А. Брытова, защитившим по этой тематике на кафедре кандидатскую (1969 г.) и докторскую (1981 г.) диссертации. Работы по детекторам в НПО «Буревестник» продолжил выпускник кафедры Д.А. Гоганов, защитивший по этой тематике на кафедре кандидатскую (1970 г.) и докторскую (1991 г.) диссертации. При изучении спектров поглощения РИ газами были созданы эффективные газоразрядные детекторы и открыто «Явление аномального распределения спектральной плотности сил осцилляторов в атомах в области ультрамягкого рентгеновского излучения» (зарегистрировано Госкомитетом СССР по изобретениям под № 297 в 1984 г.; авторы А.П. Лукирский и Т.М. Зимкина). В 1989 г. А.П. Лукирскому, Т.М. Зимкиной и В.А. Фомичёву присуждена Государственная премия РСФСР «За развитие техники и методики рентгеновской спектроскопии».

В лаборатории проводились работы по развитию теоретических основ и аппаратуры для рентгенофлуоресцентного анализа под руководством профессора М.А. Румша и доцента Л.А. Смирнова в сотрудничестве со специалистами НПО «Буревестник». Было создано несколько вариантов многоканальных рентгеновских спектрометров. В НПО «Буревестник» этими работами руководил выпускник кафедры, заведующий отделом А.Н. Межевич (с 1987 по 2006 гг. генеральный директор НПО «Буревестник»).

Под руководством А.П. Лукирского на кафедре выполнены первые работы по изучению зеркального отражения УМРС. В конце 80-х – начале 90-х годов на кафедре радиохимии химического факультета ЛГУ В.Г. Семеновым начаты первые экспериментальные работы по изучению явления полного внешнего отражения жесткого рентгеновского и гамма-излучений для анализа ультратонких поверхностных слоев. В сотрудничестве с Институтом аналитического приборостроения (ИАП РАН) был создан промышленный образец многофункционального спектрометра SM1101TER, который реализует в одном приборе сразу три поверхностно-чувствительных метода: рентгеновской рефлектометрии (TXREF), ядерного гамма-резонанса (TERMS) и полного внешнего отражения рентгеновской флуоресценции (TXRF)

[17]. Данный подход ориентирован на проведение фундаментальных исследований поверхностных явлений в конденсированных средах, физики и технологии элементов квантовой электроники, рентгеновской и синхротронной оптики.

На кафедре проводилось изучение предельных плотностей тока автоэлектронной эмиссии, физического механизма вакуумного пробоя и катодного пятна вакуумной дуги. Перспективными оказались результаты изучения явления в области напряжений, близких к пробую: было «Установлено неизвестное ранее явление взрывной электронной эмиссии, обусловленное взрывным переходом конденсированного вещества катода в плотную плазму при разогреве локальных областей катода собственным эмиссионным током» – формула открытия (зарегистрировано Госкомитетом СССР по изобретениям под № 176 от 18 марта 1975 г.; приоритет от 2 июля 1966 г.). В числе авторов открытия от кафедры П.Н. Воронцов-Вельяминов, кандидат физико-математических наук и Г.Н. Фурсей, доктор физико-математических наук [18]. Открытие взрывной электронной эмиссии позволило создать рентгеновские трубки, имеющие большой срок службы (более 1 млн. включений), и послужило научной основой работ по созданию в НПО «Буревестник» принципиально нового класса приборов – импульсных рентгеновских аппаратов для исследования быстротекущих процессов и неразрушающего контроля (рентгеновская дефектоскопия).

Открытие взрывной электронной эмиссии послужило научной основой работ в НПО «Буревестник» по созданию принципиально нового класса приборов – импульсных рентгеновских аппаратов для исследования быстротекущих процессов и неразрушающего контроля (рентгеновская дефектоскопия).

Рентгеновская эмиссионная и абсорбционная спектроскопия используется для получения информации об энергетическом распределении плотности занятых и свободных электронных состояний. Для УМРС одной из важных задач были исследования физики процессов взаимодействия ультрамягкого рентгеновского излучения с атомами, молекулами и твердыми телами. Основное направление исследований – получение информации об электронной структуре новых синтезированных материалов (графена, углеродных нанотрубок, графеновых нанолент и других углеродных материалов (исходных и функционализированных), различных тонкопленочных материалов), что можно отнести к исследованиям в области современного материаловедения. На кафедре применяются следующие методы: спектроскопия характеристических полос РИ, спектроскопия поглощения РИ, спектроскопия полного внешнего отражения РИ, спектроскопия выхода фотоэффекта, спектроскопия обращённой фотоэмиссии; разрабатывается квазиатомная теория рентгеновского поглощения и фотоионизации.

## АО «ИННОВАЦИОННЫЙ ЦЕНТР «БУРЕВЕСТИК»

### ИСТОРИЯ ПРЕДПРИЯТИЯ

В конце 1924 г. в Петрограде была организована мастерская для сборки и ремонта импортных рентгеновских аппаратов. Уже в 1928 г. в Петрограде на заводе Бенуа (впоследствии – завод «Буревестник») был создан первый отечественный рентгеновский аппарат медицинского назначения. Одновременно на заводе «Светлана» было налажено производство рентгеновских трубок. Начиная с 30-х годов, кроме медицины, стали развиваться направления, связанные с использованием рентгеновских лучей в других областях науки и техники.

За первую пятилетку завод «Буревестник» выпустил 930 рентгеновских медицинских аппаратов. В пятой пятилетке завод поставил более 3600 аппаратов для медицинских целей и 800 установок для структурного анализа. Сразу после снятия блокады завод возобновил выпуск рентгеновских установок для медицины, а с 1948 г. было начато производство аппаратов для структурного анализа с фоторегистратией УРС-70. В начале 50-х годов были разработаны новые рентгеноструктурные аппараты с ионизационной регистрацией: УРС-50И и УРС-25И.

В 1959 г. Ленинградским советом народного хозяйства было организовано Специальное конструкторское бюро рентгеновской аппаратуры (**СКБ РА**) с целью обеспечения хозяйственного комплекса страны современными и



**Рис. 6.** Комяк Николай Иванович 1928-2000 гг. Доктор технических наук, профессор. Заслуженный деятель науки РФ, лауреат государственной премии. С 1974 по 1980 гг. Генеральный директор НПП «Буревестник». Награждён: 2 ордена Трудового Красного Знамени, орден Октябрьской Революции.

**Fig. 6.** Nikolai Komyak, 1928-2000, Doctor of Technical Sciences, Professor, Distinguished Scientist of the Russian Federation, winner of the State Prize. From 1974 to 1980, General Director of NPP «Burevestnik». Awarded: 2 Orders of the Red Banner of Labor, Order of the October Revolution.

эффективными рентгеновскими приборами для науки и промышленности; активно содействовали созданию СКБ РА профессора М.А. Блохин и Н.Ф. Лосев. Создавая это предприятие, государство решало проблему замещения импорта и обеспечения национальной безопасности в ключевых областях науки и промышленного производства. Инициатором соответствующего Постановления явилась Комиссия по рентгенографии АН СССР. Специальное конструкторское бюро частично разместили на территории ленинградского завода «Буревестник». 7 мая 1959 г. принято считать днём рождения НПО «Буревестник» [19-21].

Руководителем СКБ РА в самый плодотворный период его развития (1960-1974 гг.) был Николай Иванович Комяк [22] (рис. 6), результаты деятельности которого трудно переоценить. Талантливый, энергичный и волевой учёный создал творческий коллектив, обеспечил эффективное взаимодействие предприятия с академическими и другими научными организациями страны.

В 1964 г. завод «Буревестник» прекратил выпуск рентгеновских медицинских аппаратов и был переведён на производство рентгеноспектральных и рентгеноструктурных аппаратов. Следует отметить, что внедрение новых разработок на заводах иногда встречало определённое сопротивление, связанное с существовавшей в тот период системой хозяйствования. Чтобы преодолеть эти трудности, Министерство в 1974 г. создало предприятие полного цикла – Ленинградское научно-производственное объединение «Буревестник». Его первым генеральным директором был Н.И. Комяк (1974-1981 гг.). В состав ЛНПО «Буревестник» были включены Одесский завод «Красный Октябрь», завод «Ужгородприбор», которому было поручено производство электронных блоков и устройств для приборов, выпускавшихся по разработкам СКБ РА, Орловский завод «Научприбор», ГСКБ средств контроля и автоматики, опытный завод «Лентеплоприбор», завод «Ленэмальер», Таллиннский завод «Дельта». В этот же период организованы и включены в состав ЛНПО «Буревестник» отраслевые лаборатории, созданные при Уральском политехническом институте (Свердловск) и Ереванском государственном университете. Для координации всех работ по рентгеновской тематике в рамках Минприбора СССР главным конструктором рентгеновского аналитического приборостроения был назначен д.ф.-м.н. И.А. Брытов [23] (рис. 7).

Применение импортных комплектующих изделий до начала 90-х годов было недоступно, поэтому организация серийного выпуска важнейших составных частей приборов (рентгеновских трубок, высоковольтных источников питания, детекторов) являлась важнейшим условием серийного выпуска отечественных приборов. Все эти устройства создавались как в ЛНПО «Буревестник», так и на других ленинградских предприятиях, таких как объ-



**Рис. 7.** Брытов Игорь Александрович. Доктор физико-математических наук, профессор. С 1980 по 1993 г. главный конструктор рентгеновского и аналитического приборостроения Минприбора СССР. Лауреат Государственной премии, лауреат премии Научного совета РАН по аналитической химии. Награжден: орден Трудового Красного Знамени.

**Fig. 7.** Igor Brytov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor. From 1980 to 1993, Chief Designer of X-ray and analytical instrumentation of the USSR Ministry of Appliances, winner of the State Prize, winner of the RAS Scientific Council Award on Analytical Chemistry. Awarded: Order of the Red Banner of Labor.

единение «Светлана» и ЛОМО. В 1978 г. в состав ЛНПО «Буревестник» был включён Всесоюзный научно-исследовательский и конструкторский институт научного приборостроения (**ВНИИ НП**); произошло слияние двух направлений: научного и рентгеновского аналитического приборостроения. Общая численность сотрудников головного института доходила в этот период до 3400 человек, а работников объединения в Ленинграде – до 7600 человек.

В 1989 г. упраздняется Минприбор, и объединение передаётся в Минэлектротехприбор СССР. В конце 1989 г. состав головного института характеризуется следующими показателями: количество сотрудников – более 1700 человек, из них – 118 кандидатов и 4 доктора наук. В это время была принята новая структура объединения и головного института, в рамках которой был создан ряд научно-производственных комплексов – «Импульс», «Проба», «Кристалл», «Детектор», «Источник», «Эхо», «Электроника», а при институте организовано собственное опытное производство. В 1991 г. создаётся «Научно-производственная ассоциация приборостроения», и все предприятия, входившие в ЛНПО «Буревестник», получают самостоятельность. Ряд активных сотрудников института организуют малые предприятия, связанные с объединением по научной тематике, но независимые от него в хозяйственном отношении: НПО «Спектрон» во главе с К.В. Анисовичем, ООО «НТЦ Радикон» во главе с П.В. Петрошениным, «Рентгеновская лаборатория» во главе А.В. Грудским, АО «Рентген» – руководи-

тель Н.Н. Завадский, «Комфизлаб» во главе с М.С. Нахмансоном, ООО «Элион» – руководитель Д.А. Гоганов, Научно-технического управления ЗАО «Комита» – руководитель А.С. Серебряков, «Синтез» во главе с С.Б. Красильниковым, ООО «Прецизионные технологии» – руководитель С.К. Савельев, НПО «Полюс» – научный руководитель Е.М. Лукьянченко. «Спектрофлэш» было создано Е.А. Пеликсом и В.М. Курбатовым в 1990 г. на базе НПК «Импульс» НПО «Буревестник» и немецких компаньонов. Наиболее успешные из них продолжают работу и в настоящее время.

Генеральным директором с 1987 по 2006 гг. был Анатолий Николаевич Межевич, выпускник кафедры ЭТТ физического факультета ЛГУ. Под его руководством и с его участием разработаны многоканальные рентгеновские спектрометры общепромышленного и специального назначения. На предприятия страны и за рубежом была поставлены различные рентгеновские спектрометры (от одноэлементных до автоматизированных многоканальных комплексов), являющихся датчиками количественного состава в автоматизированных системах управления технологическими процессами. А.Н. Межевич (рис. 8) сумел в трудных экономических условиях сохранить предприятие, продолжить разработки и производство научных приборов, рентгеновских спектрометров, дифрактометров и сепараторов. Главное, что работоспособность предприятия была сохранена, финансовое положение оставалось стабильным, оборудование обновлялось, корпуса ремонтировались. И это на



**Рис. 8.** Межевич Анатолий Николаевич. Генеральный директор НПО «Буревестник» с 1987 по 2006 гг. Заслуженный машиностроитель РФ. Лауреат премии Совета Министров СССР, лауреат Государственной премии СССР. Награждён: орден Трудового Красного Знамени, Знак Почёта.

**Fig. 8.** Anatoly Mezhevich, Director-general of the NPP «Burevestnik» from 1987 to 2006, distinguished mechanical Engineer of the Russian Federation, winner of the Council of Ministers Award, winner of the USSR State Prize. Awarded: Order of the Red Banner of Labor, Badge of Honor.



фоне того, что многие предприятия в тот период безвозвратно исчезли.

Ряд сотрудников НПО «Буревестник» по исследованиям и разработкам рентгеновской тематики защитили диссертации на соискание ученой степени кандидата и доктора наук. Некоторые сотрудники пришли в объединение уже дипломированными учеными или защитились по рентгеновской тематике перейдя в другие организации, в том числе д.т.н. Э.А. Аб, д.т.н. К.В. Анисович, д.ф.-м.н. И.А. Брытов, д.х.н. А.М. Воронцов, д.т.н. Д.А. Гоганов, д.т.н. А.Н. Жуковский, д.т.н. Б.Д. Калинин, д.т.н. Н.И. Комяк, д.ф.-м.н. М.В. Круглов, д.т.н. Ю.Г. Мясников, к.т.н. А.Г. Антошульский, к.т.н. Б.Э. Блехер, к.т.н. А.С. Вандер, к.т.н. Е.Н. Владимиров, к.ф.-м.н. Ю.Б. Владимирский, к.т.н. А.Д. Гоганов, к.х.н. С.И. Голоудина, к.ф.-м.н. С.А. Грибовский, к.т.н. А. Грязнов, к.т.н. А.А. Евграфов, к.г.-м.н. А.П. Касаткин, к.ф.-м.н. М.Т. Коган, к.т.н. Л.В. Козаков, к.ф.-м.н. Ю.С. Крекнин, к.т.н. А.И. Левитин, к.т.н. Е.М. Лукьянченко, к.ф.-м.н. О.С. Маренков, к.ф.-м.н. Л.Е. Мстибовская, к.ф.-м.н. М.С. Нахмансон, к.т.н. Е.А. Пеликс, к.ф.-м.н. П.В. Петрашень, к.т.н. Р.И. Плотников, к.ф.-м.н. И.М. Рогачев, к.ф.-м.н. Ю.Н. Ромащенко, к.ф.-м.н. А.В. Руднев, к.т.н. С.К. Савельев, к.ф.-м.н. А.С. Серебряков, к.т.н. Р.М. Хатапова.

Работы сотрудников НПО «Буревестник» отмечены государственными наградами и в том числе государственными премиями. Постановлением ЦК КПСС и Совета Министров СССР от 27.10.1977 г. присуждена Государственная премия СССР за работу «Рентгеновское излучение солнца» коллективу ученых, в т.ч. сотруднику ЛНПО «Буревестник» Гоганову Д.А. Постановлением ЦК КПСС и Совета Министров СССР от 24.09.1978 г. присуждена Государственная премия СССР «За цикл фундаментальных исследований взрывной электронной эмиссии и инициирующих её автоэлектронных процессов, разработку на этой основе принципиально нового класса рентгеновских приборов, организацию их серийного производства и эффективного использования в народном хозяйстве» коллективу ученых, в т.ч. сотрудникам ЛНПО «Буревестник» Комяку Н.И., Пеликсу Е.А., Курбатову В.М., сотрудникам ЛОЭП «Светлана» Дронь Н.А., Слоевой Г.Н., сотруднику ЛЭИС им. М.А. Бонч-Бруевича Фурсею Г.Н., сотруднику ФТИ им. А.Ф. Иоффе АН СССР Средняку В.Н.

Постановлением ЦК КПСС и Совета Министров СССР от 27.10.1986 г. присуждена Государственная премия СССР «За создание и внедрение технологии обогащения алмазосодержащих руд и россыпей Якутии на основе методов рентгенолюминесцентной сепарации» коллективу ученых, в т.ч. сотрудникам ЛНПО «Буревестник» Баранову А.Т., Межевичу А.Н., Левитину А.И. Постановлением Совета Министров РСФСР от 12.04.1989 г. присуждена Государственная премия РСФСР «За разработку теории методов и



Рис. 9. Главное здание «АО ИЦ «Буревестник».

Fig. 9. The main building of the «Burevestnik».

приборов для рентгеноспектральных исследований химической связи» коллективу ученых, в т.ч. сотруднику ЛНПО «Буревестник» Брытову И.А.

В июле 2018 г. АО НПП «Буревестник» реорганизован в АО «Инновационный Центр «Буревестник». Новый центр размещается во вновь построенном современном производственном здании (рис. 9).

### РАЗВИТИЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ НА ПРЕДПРИЯТИИ

С 1962 по 1992 гг. история развития приборов для рентгеноспектрального анализа в СССР фактически определялась деятельностью СКБ РА – НПО «Буревестник» и связанных с ними заводов [19-21]. Эту историю можно восстановить по публикациям в сборнике «Аппаратура и методы рентгеновского анализа», который издавался с 1967 по 1992 гг.; всего был выпущен 41 сборник. Главным редактором сборника был Н.И. Комяк, в состав редколлегии входили М.А. Блохин (научный редактор) и Н.Ф. Лосев.

### Рентгеновские приборы для научных исследований.

Для фундаментальных физических исследований, проводимых в академических и отраслевых НИИ в НПО «Буревестник» разработаны уникальные рентгенофизические приборы, применявшиеся в исследованиях твердого тела, высокотемпературной плазмы, космического пространства, поверхностных свойств. Часто такого рода аппаратура создавалась непосредственно по заданиям институтов-заказчиков и при их участии. В НПО «Буревестник» этими работами руководил И.А. Брытов.

Под руководством проф. ЛГУ А.П. Лукирского в лаборатории И.А. Брытова были созданы вакуумные рентгеновские спектрометры для области мягкого рентгеновского излучения. Специально для таких приборов в ГОИ им. С.И. Вавилова разработаны и изготовлены дифракционные решетки, работающие при скользких углах падения и имеющие высокое разрешение и эффективность. Первым был создан спектрометр монохроматор РСМ-500, который выпускался в течение пятнадцати лет (серия более 40 приборов).

По заданию ИАЭ им. И.В. Курчатова в 1970 г. был разработан спектрометр «Плазма» для диагностики высокотемпературной плазмы. Этот аппарат предназначался для регистрации излучения в широком диапазоне длин волн и обеспечивал удобное сопряжение с плазменными установками различного типа («Токамак», «Плазменный фокус»). За несколько лет было выпущено 10 таких универсальных спектрометров. Полученные при этом экспериментальные данные позволили исследовать механизм миграции примесей на установках «Токамак» и тем самым углубить понимание протекающих в плазме процессов.

В 1974 г. совместно с ФТИ им. А.Ф. Иоффе, был разработан рентгеновский электронный спектрометр СЭР-1 на основе энергоанализатора «цилиндрическое зеркало». СЭР-1 стал первым отечественным аппаратом в новой на тот момент области физических исследований – электронной спектроскопии для химического анализа (ЭСХА). Позднее на базе данной разработки в 1987 г. создан Оже-электронный спектрометр ЭСО-3, для которого в Германии создали вакуумную систему, а в Венгрии для совместного применения разработали вторично-эмиссионный масс-спектрометр. Было выпущено более 30 таких уникальных установок, половина которых было экспортирована.

Совместно с Институтом неорганической химии Сибирского отделения АН СССР в 1987 г. завершились работы над автоматическим флуоресцентным спектрометром с фокусирующим кристаллом на область спектра 2-90 ангстрем (САРФ-1). Было выпущено 8 приборов, половина которых была поставлена на экспорт.

В эти же годы у заказчиков были внедрены уникальные единичные экземпляры рентгеновских прецизионных спектрометров – например, обзорный спектрометр для диагностики плазмы РАД, трёхкристальный вакуумный спектрометр и ряд других приборов.

## Рентгеновские приборы для количественного анализа

**Кристалл-дифракционные сканирующие спектрометры.** Первый сканирующий коротковолновый спектрометр по рентгенооптической схеме Кошуа ФРС-1 был разработан в НПО «Буревестник» в 1965 г. В развитие этого направления выпускались спектрометры ФРС-2 и ФРС-4.

Дальнейшее развитие сканирующих спектрометров связано с разработками выпускника кафедры ЭТТ д.т.н. К.В. Анисовича (рис. 10), который разработал светосильную рентгенооптическую схему, основанную на найденных соотношениях расстояний в рентгенооптической схеме и размеров кристалла [24]. С учётом этого по рентгенооптической схеме Иоганссона построен портативный сканирующий спектрометр с ручным управлением СПАРК [25].



**Рис. 10.** Анисович Климент Владиславович 1939-1996 гг. Доктор технических наук. Награжден знаком «Лучший изобретатель приборостроения».

**Fig. 10.** Kliment Anisovich, 1939-1996, Doctor of Technical Sciences. Awarded the «Best Inventor of Instrumentation» badge.

Острофокусная маломощная рентгеновская трубка с прострельным анодом приближена к пробе, которая в свою очередь расположена близко к входной щели спектрометра, чем достигается высокая плотность потока излучения на кристалл-анализатор при мощности трубки порядка 5-10 Вт. Этот прибор позволил проводить количественный анализ для определения состава проб на элементы от Sc до U. В дальнейшем в НПП «Буревестник» спектрометр был модернизирован и состыкован с управляющей ЭВМ (СПАРК-1М). Было выпущено 25 спектрометров, которые в основном поставлены на арматурные заводы и станции экологического контроля Минприроды РФ. Для расширения аналитических возможностей спектрометра разработан энергодисперсионный блок для определения содержаний 4-х элементов в длинноволновой области спектра. Дальнейшее развитие направление светосильной рентгенооптической схемы получило в НПО «Спектрон».

**Кристалл-дифракционные многоканальные рентгеновские спектрометры.** Первый отечественный вакуумный многоканальный спектрометр ФРК-1, разработанный СКБ РА совместно с учёными кафедры ЭТТ ЛГУ, был поставлен в опытную эксплуатацию в 1965 г. В 1965-1973 гг. в лаборатории Р.А. Двиновой были разработаны и выпущены заводом 14 моделей многоканальных спектрометров, отличающихся различным числом каналов, степенью автоматизации и решаемыми задачами. В 1972 г. появился первый отечественный прибор, управляемый ЭВМ. Накопленный опыт позволил перейти к выпуску универсального спектрометра СРМ-18. В 1975-1982 гг. на опытном заводе «Буревестник» было выпущено около ста спектрометров СРМ-18. Прибор был предназначен для анализа монокристаллов

или прессованных из порошка проб на любые 12 элементов в диапазоне от Mg до U. Этот прибор управлялся отечественной ЭВМ СМ-1.

В конце семидесятых годов производство многоканальных спектрометров для анализа дискретных проб было передано Орловскому ПО «НАУЧПРИБОР». Объединение обеспечило выпуск моделей КРФ-1Б, СРМ-20, СРМ-20М, СРМ-25 в количестве более ста штук в год. В 1993 г. был разработан 32-канальный спектрометр СРМ-27 (или 28 фиксированных каналов и 1 сканирующий), параметры которого не уступали лучшим зарубежным образцам многоканальных спектрометров [26]. Диапазон определяемых элементов был расширен и интенсивность флуоресценции увеличена за счёт применения рентгеновской трубки РХВ-1 (заземлённый катод, Ве-окно толщиной 0.125-0.2 мм.). Трубка была разработана и выпускалась Ленинградским объединением «СВЕТЛАНА». На базе этого спектрометра ПО «НАУЧПРИБОР» (в настоящее время НПАО «НАУЧПРИБОР») разработало и в настоящее время выпускает спектрометр СРМ-35. Всего было выпущено более 2000 многоканальных спектрометров.

**Кристалл-дифракционные рентгеновские анализаторы.** Специально для геологических и геохимических определений ряда редких и рассеянных элементов в НПО «Буревестник» были разработаны несколько вариантов приборов серии АРФ по схеме Кошуа с кристаллом-анализатором кварца ( $10\bar{1}1$ ), при использовании которого достигалось высокое разрешение в коротковолновом диапазоне. При измерении излучение аналитической линии определяемого элемента и некогерентно рассеянного излучения анода рентгеновской трубки выделялись одновременно на фокальном круге приёмными щелями и последовательно регистрируется сцинтилляционным счётчиком. Набор сменных щелевых устройств и рентгеновских трубок с различными анодами (Mo, W, Ag) позволял эффективно проводить количественный анализ [27]. Приборы подобного класса, по-видимому, не имели зарубежных коммерческих аналогов. В настоящее время выпускается анализатор АРФ-7 [28].

**Кристалл-дифракционные рентгеновские анализаторы для анализа пульпы в потоке.** Для проведения экспрессного анализа пульпы, суспензий и растворов на любые восемь элементов от Сг до U непосредственно в потоке в 1975 г. в лаборатории И.М. Рогачева был разработан и выпущен заводом спектрометр КРФ-13 [29]. Он имел 12 измерительных кювет оригинальной конструкции, в которые подаются пробы технологических продуктов. Спектрометрическое устройство перемещается вдоль измерительных кювет и выполняет измерения. За 1975-1992 гг. выпущено более 50 экземпляров спектрометров КРФ-13 (позднее названных СРМ-13). Эти приборы были поставлены на отечественные и зарубежные обогатительные фабрики цветной металлургии для контроля и управления процессом флотации в со-

ставе автоматизированных систем аналитического контроля. После модернизации выпускается АР-31.

**Кристалл-дифракционные рентгеновские спектрометры с монохроматическим возбуждением.** К.В. Анисовичем была предложена светосильная схема кристалл-дифракционного спектрометра, в котором монохроматизация первичного излучения осуществляется фокусирующим кристаллом-монохроматором по Иоганссону, на фокальном круге которого находятся: источник излучения – острофокусная рентгеновская трубка и поверхность анализируемого образца, а фокальный круг кристалла-анализатора (также по Иоганссону) проходит как через поверхность анализируемого образца, так и через входную щель детектора. При этом флуоресценция возбуждается характеристическим излучением анода рентгеновской трубки, выделяемым кристаллом-монохроматором. Предлагаемая схема не вызывает потери общей светосилы спектрометра благодаря тому, что кристалл-монохроматор и кристалл-анализатор находятся в оптимальных условиях отражения, так как линейчатый фокус трубки и линейчатая зона флуоресценции образца расположены на их фокальных кругах и излучение от этих зон отбирается практически всей поверхностью кристаллов (в отличие от обычных кристалл-дифракционных схем). Поэтому светосила двукристалльного спектрометра с монохроматором одного порядка со светосилой спектрометра по Иоганссону. Эксперимент показал, что контрастность при определении Со в водных растворах в среднем на два порядка выше максимальной контрастности для традиционных спектрометров [30, 31].

**Энергодисперсионные спектрометры и анализаторы.** В 1965 г. НПП «Буревестник» приступило к созданию светосильных энергодисперсионных рентгеновских спектрометров и анализаторов на базе пропорциональных счетчиков и других детекторов, использующих для возбуждения рентгеновской флуоресценции рентгеновские трубки малой мощности или радиоизотопы. Это позволяет существенно снизить габариты, энергопотребление и стоимость оборудования.

Работы и изобретения Р.И. Плотникова [32] показали, что при соответствующем спектральном составе возбуждающего излучения и использовании селективных фильтров возможно применение таких приборов для количественного определения любых химических элементов, начиная с Mg или даже с Na. Причем, в отличие от приборов с волновой дисперсией, для получения количественных результатов в случае энергодисперсионных приборов не требуется жесткая фиксация положения образца относительно источника первичного излучения, определение элементов с малыми атомными номерами Z возможно без откачки камеры образцов и объема спектрометрической камеры спектрометра.

К первым серийным приборам этого типа, выпущенным объединением, относятся полевой

рентгенофлуоресцентный анализатор с радиоизотопным возбуждением БРА-6 и анализатор цемента и цементных сырьевых смесей БРА-7. Подобные приборы производились для лабораторных исследований, полевых измерений на стенках горных выработок, анализа нефти на содержание серы, как в лабораторных условиях, так и в потоке, анализа цементов и других продуктов в потоке с использованием для возбуждения, как радиоизотопов, так и специальных рентгеновских трубок с регулируемым спектром (СРМ-30, серия приборов БАРС и др.). На основе созданных в НПП «Буревестник» полупроводниковых детекторов впервые в стране были разработаны промышленные спектрометры АРСР-1 и АРСР-2 — лабораторные анализаторы элементного состава для использования в геологии и водоохранной практике [21].

Научные работы и изобретения сотрудника НПО «Буревестник» К.В. Анисовича в 1965-1978 г. привели к созданию нескольких групп приборов, не имевших аналогов в мировой практике. На основе его работ созданы портативные многоканальные энергодисперсионные анализаторы БАРС-3 (переносной) и КРАБ-3 (портативный настольный с узкополосным детектором). Спектральная избирательность узкополосного детектора основана на использовании для выделения нужного участка спектра селективного фильтра и вторичного излучателя. Подбирая материалы фильтра и излучателя, можно обеспечить выделение любого интервала длин волн шириной порядка 0,5-1 кэВ и менее. Для возбуждения в этих приборах используются рентгеновские трубки мощностью 5-10 Вт [33, 34].

В сложные кризисные 90-е годы и затем, в период оживления экономики страны в начале нынешнего века, предприятие не оставляло усилий по разработке востребованных рынком рентгеноспектральных приборов для химического элементного анализа. Выведенная на рынок серия универсальных энергодисперсионных анализаторов БРА была создана трудом коллектива разработчиков предприятия под руководством Е.М. Лукьянченко. Плодотворным в современной истории предприятия оказалось и создание ряда специализированных рентгенофлуоресцентных анализаторов серы, предложенных по инициативе Д.А. Гоганова [20].

### Рентгеновские приборы для структурного анализа

К этой серии приборов следует отнести, прежде всего, установки рентгеновские структурные (УРС) различных модификаций, дифрактометры общего назначения (ДРОН) для исследования поликристаллических материалов, специализированные и монокристалльные дифрактометры, а также камеры малоугловые и камеры-приставки к дифрактометрам. В разработке аппаратов для структурного анализа существенную помощь НПП «Буревестник» оказали такие крупные учёные, как М.М. Уманский

и Д.М. Хейкер. Гониометрическое устройство для дифрактометра было создано Ленинградским оптико-механическим объединением; специальные рентгеновские трубки сконструированы и серийно освоены объединением «Светлана». Каждые 3-5 лет разрабатывалась новая модель дифрактометра: от ДРОН-3 (1979 г.) до ДРОН-8 (2009 г.). В этот период было выпущено около пяти тысяч дифрактометров, которые используются практически во всех академических институтах страны, в вузах, на промышленных предприятиях и ряде зарубежных стран.

Совместно с Институтом кристаллографии АН СССР в 1979 году был создан уникальный дифрактометр для исследования больших биологических кристаллов с системой локальных пропорциональных счётчиков ДАРК-2.0. Особый вклад в эту работу внесли Г.Д. Дмитриев и Д.А. Гоганов.

Для неразрушающего контроля металлоконструкций была выпущена гамма приборов по определению остаточных напряжений серии РАДОН, ДАРН, ПРОН. Первый дифрактометр этой группы проектировался под научным руководством профессора Ленинградского политехнического института Д.М. Васильева. В ЛНПО «Буревестник» этими работами руководил Ю.Г. Мясников (рис. 11).

Совместно с Институтом кристаллографии в 1980 г. был создан специализированный высокопрецизионный монокристалльный дифрактометр ДАРЧ, а для ориентации монокристаллических слитков и разбраковки монокристаллических пластинок разработаны и поставлены институту ГИРЕДМЕТ дифрактометры РДР-201 (1988 г.). Для тех же целей выпускались автоматизированные разбраковщицы пьезокварцевых пластин АДР-5, АДР-6. Для расширения функциональных возможностей диф-



**Рис. 11.** Юрий Гиларьевич Мясников 1929-2001 гг. Доктор технических наук. Награжден знаком «Лучший изобретатель Министерства», премия им. С.И. Вавилова по итогам конкурса по созданию приборов для научных исследований.

**Fig. 11.** Yuri Myasnikov, 1929-2001, Doctor of Technical Sciences. Awarded the «Best Inventor of the Ministry», S.I.Vavilov Prize after the competition to create instruments for scientific research.

рактометров общего назначения в 80-е годы была разработана серия камер-приставок, позволяющих проводить исследования металлических структур в диапазоне температур от -180 до +2000 °С и вакууме до 104 мм рт. ст. Их серийное производство, а также выпуск новых установок для исследования текстильных материалов и биологических объектов обеспечивало Орловское производственное объединение «Научприбор».

В конце 90-х годов перед предприятием встала задача возобновления серийного выпуска дифрактометров общего назначения для удовлетворения растущего спроса промышленности, науки и высшей школы. В этих условиях в кратчайшие сроки была проведена глубокая модернизация четвертой модели ДРОН и с 1999 г. освоено серийное производство ДРОН-6 (выпущено 43 дифрактометра). В 2003 г. завершилась разработка и с 2004 г. выпускается производством первая промышленная партия дифрактометров ДРОН-7 с прецизионным гониометром оригинальной конструкции, созданной на предприятии. В 2009 г. выпущена первая партия дифрактометров ДРОН-8 с так называемым двукружным гониометром вертикальной конструкции и развитым набором дополнительно поставляемых приставок и приспособлений [20].

### Рентгеновские микроанализаторы и микроскопы

В 1973 г. в СКБ РА был выпущен отечественный серийный микроанализатор «Зонд». В разработке микроанализатора существенную помощь НПП «Буревестник» оказали такие крупные учёные, как И.Б. Боровский и Н.П. Ильин. Прибор проектировался в сотрудничестве с ГОИ им. С.И. Вавилова, где была разработана и изготовлена электронно-оптическая система микроанализатора с размером сфокусированного электронного зонда 1 мкм. Остальные функциональные элементы прибора создавались в НПП «Буревестник». Один из «Зондов» был установлен в Киеве, в Институте материаловедения АН УССР, и успешно эксплуатировался в течение четверти века.

Дальнейшее развитие микроанализа в НПП шло по линии исследования и аппаратурной реализации эффектов, возникающих при взаимодействии электронного пучка с веществом. Среди приставок, использующих микрозонд как источник рентгеновского излучения, наиболее удачными были камера Косселя и приставка для исследования катодолюминесценции, возникающей при взаимодействии электронного зонда с некоторыми минералами и полупроводниковыми материалами. Камера Косселя, разработанная в сотрудничестве с проф. С.А. Ивановым (ЛПИ им. М.И. Калинина), обладала уникальными возможностями перемещения образца и его независимого поворота в трёх плоскостях.

В микроанализаторе «Зонд» использовалось наклонное падение пучка на образец, поэтому стала актуальной разработка методики количественного

анализа, особенно в модификации факторов поглощения и фактора тормозной способности и обратного рассеяния электронов в области 10-50 кэВ. Этому посвящены оригинальные работы, обобщающие экспериментальные данные по угловому и энергетическому распределению рассеянных электронов.

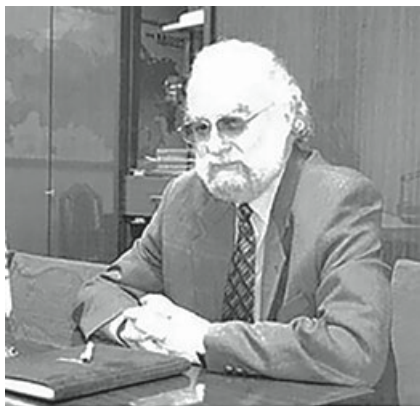
Работы по электронно-зондovому микроанализу в НПП «Буревестник» завершились в конце 80-х годов разработкой микроанализатора с двумя углами выхода рентгеновского излучения и дальнейшее развитие этого направления в НПП «Буревестник» было закрыто [20].

Микрофокусные рентгеновские аппараты и рентгеновские микроскопы разрабатывались как приборы для научных исследований. Совместно с Государственным институтом машиноведения им. акад. А.А. Благонравова (лаборатория проф. В.Г. Лютцау) в НПП «Буревестник» были созданы светосильные микрофокусные аппараты МАРС-1, МАРС-2, рентгеновские микроскопы МИР-1 и МИР-2 и рентгенотелевизионные микроскопы МИКРОН-1, МИКРОН-2. В НПП «Буревестник» этой тематикой руководил В.А. Гущин. Производство этих приборов было передано на завод «Красный Октябрь» (г. Одесса), где ежегодно выпускалось по 80-120 приборов [20].

### Рентгенолюминесцентные сепараторы

В 1966 г. было положено начало многолетнему стратегическому партнёрству СКБ рентгеновской аппаратуры (затем НПП «Буревестник»), треста «Якуталмаз» (предшественника АК «ААРОСА») и института «Якутнипроалмаз» по созданию и внедрению рентгенолюминесцентных (РЛ) сепараторов алмазного сырья. Решение об участии в этих работах, принятое руководителем СКБ РА Н.И. Комяком по предложению института «Якутнипроалмаз», оказалось фактически судьбоносным для предприятия.

Приоритет в использовании рентгенолюминесценции алмазов для их извлечения и в создании необходимой для этого аппаратуры принадлежит СССР (России). В 1939 г. метод был предложен сотрудником Всесоюзного института минерального сырья (ВИМС) М.Е. Богословским, и им же был сконструирован первый в мире РЛ-сепаратор для доводки сухих алмазосодержащих гравитационных концентратов. Следующий этап, кардинально изменивший отношение к РЛ-методу, связан с институтом треста «Якуталмаз» и талантливым исследователем и инженером В.В. Новиковым. Ряд остроумных технических новинок, решение задачи обработки мокрого материала позволили в 1964-1965 гг. создать и успешно испытать в эксплуатационных условиях экспериментальный образец люминесцентного сепаратора ЛС-20. Работа коллектива, который организовал и затем многие годы возглавлял В.В. Новиков, открыла путь к становлению нового направления в рентгеновской аппаратуре промышленного назначения.



**Рис. 12.** Левитин Анатолий Исаидорович. Кандидат технических наук. Главный конструктор сепараторов. Лауреат Государственной премии, «Заслуженный машиностроитель РФ». Награждён: орден Знак Почёта.

**Fig. 12.** Anatoly Levitin, Candidate of Technical Sciences, Chief Separators Designer, winner of the State Award, «Honored Mechanical Engineer of the Russian Federation». Awarded: Order of honor.

В 1966 г. специалисты НПП «Буревестник» приступили к разработке промышленного образца сепаратора ЛС-20, предназначенного для обогащения мокрой исходной алмазосодержащей руды крупных классов, первой в мировой практике промышленной модели РЛ-сепаратора алмазного сырья. В НПП «Буревестник» общее руководство работами было поручено А.И. Левитину (рис. 12).

В 1969 г., после корректировки конструкторской документации, была выпущена установочная партия ЛС-20. Всего за период с 1969 по 1971 г. изготовлено и поставлено на обогатительные фабрики «Якуталмаза» 30 сепараторов этой модели. Так были заложены основы интенсивного внедрения РЛ-технологии в отечественной алмазодобывающей отрасли, сформирована новая технологическая концепция обогащения алмазного сырья. Вскоре была развернута программа создания комплекса сепараторов, ориентированных на обработку материала разных классов крупности в диапазоне от 50 до 1 мм на всех стадиях технологического процесса. Эти работы были поддержаны рядом специальных постановлений Правительства и Госкомитета по науке и технике СССР, определявших развитие алмазодобывающей промышленности страны.

К 2009 г. на различных объектах алмазодобычи в России и за рубежом находилось в эксплуатации около 500 РЛ-сепараторов, выпущенных НПП «Буревестник». В целом же, за 40 с лишним лет, предприятием было поставлено алмазодобывающей промышленности более 1400 экземпляров сепараторов различных моделей. НПП «Буревестник», несомненно, занимает ведущие позиции в мире по разработке и произ-

водству РЛ-сепараторов алмазосодержащего материала [20].

### Импульсные рентгеновские дефектоскопы

Развитие импульсной рентгенографии в нашей стране связано с именем выдающегося советского физика, д.т.н., проф. В.А. Цукермана. Начав исследования в этой области еще в довоенные годы и успешно их развивая, В.А. Цукерман создал ряд импульсных установок оригинальной конструкции, послуживших основой для разработки серии малогабаритных импульсных аппаратов для научных, промышленных и медицинских целей [19].

В 1960 г. НПП «Буревестник» начал работы по созданию принципиально нового класса приборов – импульсных рентгеновских аппаратов для исследования быстродействующих процессов и неразрушающего контроля. Научной основой этого направления были работы В.А. Цукермана и открытие взрывной электронной эмиссии [18]. Работа аппаратов основана на возможности использования очень коротких наносекундных импульсов напряжения. Кратковременность приложения напряжения обеспечивает высокую электрическую прочность всех узлов аппаратов и таким образом позволяет на порядки (в 10-100 раз) уменьшить их габариты. Большие токи взрывной эмиссии в свою очередь позволяют осуществить регистрацию рентгеновского изображения при наносекундных экспозициях. Руководителем этого направления в НПП «Буревестник» стал Е.А. Пеликс (рис. 13) разработал и внедрил в серийное производство и в практику народного хозяйства серию импульсных рентгеновских аппаратов. Ежегодное производство аппаратов этого класса превышало 1000 штук. В 1964 г. начались поставки этой аппаратуры за рубеж.



**Рис. 13.** Евгений Абрамович Пеликс. Кандидат технических наук. Лауреат Государственной премии. Награждён: 2 ордена Трудового Красного Знамени, Золотая медаль Лейпцигской ярмарки.

**Fig. 13.** Eugene Pelix, Candidate of Technical Sciences, winner of the State Award. Awarded: 2 Orders of the Red Banner of Labor, Gold Medal of the Leipzig Fair.

## Детекторы рентгеновского излучения

Начатое в шестидесятые годы в НПП «Буревестник» развитие нового поколения научных и промышленных приборов для рентгеновского анализа потребовало создания современной измерительной техники для регистрации излучения, важнейшим элементом которой является детектор. Решить данную проблему с использованием фотоплёнки и счётчика Гейгера невозможно. Поэтому при создании рентгеновских дифрактометров и многоканальных спектрометров была поставлена задача разработки и серийного освоения отечественных пропорциональных и сцинтилляционных детекторов, обладающих высоким быстродействием, энергетическим разрешением и низким собственным фоном. Это направление на предприятии возглавил Дмитрий Алексеевич Гоганов [35] (рис. 14).

За время своей работы в НПП «Буревестник» Д.А. Гоганов активно проводил работы по созданию систем регистрации рентгеновского излучения и разработал несколько десятков конструкций рентгеновских отпаянных и проточных газоразрядных детекторов (ГПД) и блоков детектирования, сцинтилляционные блоки детектирования, детекторы для космических исследований, полупроводниковые детекторы, позиционно-чувствительные детекторы, электролюминесцентные детекторы и рентгеновские детекторы для исследования биологических объектов. На основе разработанных с участием Д.А. Гоганова детекторов рентгеновского излучения были сконструированы и внедрены в серийное производство для нужд промышленности рентгеновские спектрометры и дифрактометры, анализаторы и квантометры, а также иная рентгеновская аппаратура.



**Рис. 14.** Гоганов Дмитрий Алексеевич 1938-2020 гг. Доктор технических наук. Лауреат государственной премии. Награждён: ордена За заслуги перед Отечеством и Знак Почета.

**Fig. 14.** Dmitri Goganov, 1938-2020, Doctor of Technical Sciences, winner of the State Award. Awarded: Orders of Merit to the Fatherland and the Badge of Honor.

## Кристалл-дифракционные диспергирующие элементы

Поставленная в 1959 г. при образовании СКБ РА (в последствии НПП «Буревестник») задача создания отечественного рентгеновского аналитического приборостроения потребовала разработки и освоения в производстве кристалл-дифракционных диспергирующих элементов (КДЭ), которые наряду с рентгеновскими трубками и детекторами определяют аналитические параметры волновых (кристалл-дифракционных) спектрометров и расширяют возможности рентгеноструктурной аппаратуры. В 1973 г. был образован отдел кристаллов под руководством А.П. Касаткина. В состав отдела входили: участок кристаллооптики, сектор рентгенофизики, технологический сектор, сектор выращивания кристаллов, группа пленочных КДЭ и группа механиков.

К концу 70-х годов в НПП «Буревестник» был освоен выпуск КДЭ почти всех наименований, применявшихся в рентгеновской аппаратуре фирм-производителей различных стран, что позволило полностью обеспечить ими приборы выпускаемые предприятием, а также всеми изготовителями рентгеновской аппаратуры в стране.

В начале 80-х годов были разработаны КДЭ и налажены их поставки для рентгеновских спектрометров, выпускаемых в ГДР на предприятии Карл Цейс Йена. К концу этого периода относятся пробные поставки КДЭ ведущим мировым производителям рентгеновской аппаратуры. Начиная с образования группы кристаллооптики также осуществлялись разработка и изготовление экспериментальных КДЭ для ведущих отечественных исследовательских центров и институтов. Объемы годового выпуска достигли нескольких тысяч КДЭ десятков наименований и типоразмеров. В 80-х годах усилия разработчиков и производителей КДЭ были объединены в Научно-производственный комплекс «Кристалл» (руководитель – А.П. Касаткин, с 1983 г. М.Т. Коган), образованный в рамках НПП «Буревестник».

С началом «шоковых» реформ в 1991 г. потребности отечественного приборостроения в КДЭ многократно сократились. Тем не менее, благодаря сохранившемуся костяку коллектива разработчиков и рабочих, почти полувековой опыт и традиции производства сохранились. Были постепенно восстановлены связи внутри страны, проведена разработка и начались поставки КДЭ зарубежным производителям рентгеновской техники и научным центрам [20].

## ЛЕНИНГРАДСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР ЯДЕРНОЙ ГЕОФИЗИКИ

В конце пятидесятых – начале шестидесятых годов в СССР возникла потребность в новых эффективных (менее затратных) методах поисков, разведки и добычи месторождений полезных ископаемых, что неизбежно привело к сближению



**Рис. 15.** Мейер Владимир Александрович 1924-1995 гг. Доктор геолого-минералогических наук, профессор. Заслуженный деятель науки и техники, лауреат Государственной премии и премии Совета Министров.

**Fig. 15.** Vladimir Meyer, 1924-1995, Doctor of Geological and Mineral Sciences, Professor, Distinguished Scientist and Technologist, winner of the State Prize and the Council of Ministers Award.

приборостроителей прикладной атомной и ядерной физики с геологической наукой. Сотрудничество приборостроителей с геологической наукой наиболее ярко проявилось в геологоразведочной и горнодобывающей отраслях, где ядерно-физические методы анализа элементного состава горных пород и руд успешно заменили применяемые прежде методы при геологических исследованиях. Эти работы выполнялись на кафедре ядерной геофизики ЛГУ и во Всероссийском научно-исследовательском институте разведочной геофизики Рудгеофизика им. А.А. Логачева.

**Кафедра ядерной геофизики геологического факультета ЛГУ (ЯГФ)**, организованная в 1968 г., была первой в нашей стране. Её создал и возглавил Владимир Александрович Мейер (с 1998 г. кафедра экологической геологии) [36] (рис. 15).

Работы в области рудной геофизики были связаны с исследованием горных пород и руд ядерно-геофизическими методами. Под руководством В.А. Мейера был создан датчик, позволявший проводить в полевых и скважинных условиях определение одновременно до 80 элементов в рудах цветных и редких металлов. По существу В.А. Мейером было создано и развито новое научное направление – как самого ядерно-физического метода, так и ядерной геофизики в целом, нашедшее отражение в практике геологических и горных работ.

На кафедре, помимо ее основателя В.А. Мейера, работал большой коллектив известных ученых: д.т.н., проф. Г.А. Пшеничный, д.т.н., проф. В.С. Нахабцев, д.т.н., проф. Г.А. Иванюкович, д.т.н., проф. А.Н. Жуковский (ранее работавший в НПО «Буревестник»), д.г.-м.н. проф. П.А. Ваганов, к.ф.-м. н., доцент А.В. Бахтиаров (впоследствии д.т.н., проф. кафедры аналитической химии химического факультета СПбГУ).

Основные направления исследований на кафедре: взаимодействия гамма и рентгеновского излучения с веществом, гамма-спектральные и рентгеновские методы анализа, методы РФА, рентгенорадиометрический и гамма-гамма каротаж, многоэлементный нейтронно-активационный анализ, а также другие ядерно-физические методы анализа, разработка полупроводниковых детекторов излучения для ядерно-физического анализа горных пород и руд. За учебник «Основы ядерной геофизики» [37], написанный В.А. Мейером и П.А. Вагановым, авторы были удостоены в 1988 г. Государственной премии СССР. Учебник получил широкое признание за рубежом и был переведен на многие европейские языки.

**Всероссийский научно-исследовательский институт разведочной геофизики Рудгеофизика им. А.А. Логачева» (ФГУП «ВИРГ-Рудгеофизика»).** Разработка рентгеновских и рентгенорадиометрических лабораторных и переносных приборов осуществлялась в ФГУП «ВИРГ-Рудгеофизика». В разработке и внедрении в практику геологических и горных предприятий рентгеновских, рентгенорадиометрических и гамма-гамма методов с целью опробования скважин и горных выработок, сортировки и сепарации руд, прогнозной оценки продуктов добычи и переработки минерального сырья, подсчета запасов твердых полезных ископаемых принимали участие д.г.-м.н. Е.П. Леман [38], д.т.н. А.П. Очкур [39], д.т.н. М.М. Соколов [40].

## ПЕТЕРБУРГСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ ИМ. Б.П. КОНСТАНТИНОВА РАН

Ленинградский (теперь Петербургский) институт ядерной физики им. Б.П. Константинова АН СССР (**ПИЯФ РАН им. Б.П. Константинова**) образован в 1971 г. С момента образования до 1985 г. его директором был Олег Игоревич Сумбаев (рис. 16).

Основные работы Олега Игоревича были в области атомной и ядерной физики. Он обнаружил эффекты химического и изотопического смещения рентгеновских линий в спектрах элементах с высоким  $Z$ , а также явление сверхтонкого уширения. Начиная с работ по применению кристалл-дифракционного гамма-спектрометра «по Кошуа» в 1956 г., Олег Игоревич является основателем и руководителем целой научной школы дифракционных исследований, а также применения дифракционных методов в физических исследованиях. В настоящее время рентгеновские спектрометры высокой светосилы успешно применяются в молекулярной физике, в физике конденсированного состояния вещества, в ядерной физике для измерения зарядовых радиусов и моментов ядер по изотопическим и сверхтонким смещениям рентгеновских линий. В ряде научных центров (в России, США, Швейцарии, Германии, Франции) построены кристалл-дифракционные спектрометры, в которых используются рекомендованные О.И. Сумбаевым кристаллографические





**Рис. 16.** Сумбаев Олег Игоревич 1930-2002 гг. Доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент АН СССР. Награжден: ордена Знак почета, Трудового Красного Знамени, Октябрьской революции.

**Fig. 16.** Oleg Sumbayev, 1930-2002, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Member-Correspondent of the USSR Academy of Sciences. Awarded: Order of Honor, Red Banner of Labor, October Revolution.

плоскости, вырезки и радиусы изгиба кристаллов, дающие уникальную возможность регулировать в пределах нескольких порядков светосилу и разрешение этих приборов. С их помощью, в частности, проводились исследования химических и изотопических смещений рентгеновских линий, измерялись сверхтонкие смещения возбуждаемых при  $K$ -захвате рентгеновских линий по методике О.И. Сумбаева. В 1985 г. О.И. Сумбаеву была присуждена академическая премия им. Б.П. Константинова за цикл работ, связанных с обнаружением и исследованием эффекта химических смещений рентгеновских линий в элементах с высоким  $Z$  и его использования для изучения кристаллохимических связей. Приоритет научных результатов школы О.И. Сумбаева признан во всем мире [41].

В 1992 г. отдел полупроводниковых ядерных детекторов ПИЯФ возглавил к. ф.-м. наук Абдурахман Хусаинович Хусаинов. Он расширил круг решаемых отделом задач, создал коллектив разработчиков и исследователей и направил его усилия на решение важной для прикладной науки проблемы – разработка физических основ и технологии изготовления полупроводниковых детекторов ядерного и рентгеновского излучений. В результате была предложена оригинальная технология изготовления блоков детектирования с термоэлектрическим охлаждением на основе кремния и теллурида кадмия. С использованием этих блоков детектирования были созданы спектрометрические системы и портативные анализаторы вещественного состава образцов. В настоящее время эти системы в России применяются для решения практически важных задач: на постах таможенного контроля и контроля окружающей среды, на предприятиях Минатома

РФ, на горнорудных предприятиях РФ, а также за рубежом (МАГАТЭ, США).

Правительством Российской Федерации в области науки и техники за 2003 г. за «Разработку, организацию производства и внедрение в практику ядерно-физических комплексов экспрессного много-элементного анализа веществ и материалов» была присуждена премия коллективу авторов, включающих представителей ВНИИТФА (Минатом), ПИЯФ РАН (А.Х. Хусаинов), ЗАО «Южполиметалл - Холдинг», Уральского государственного технического университета, Государственного таможенного комитета РФ. Указанные выше исследования выполнены в период с 1980 по 2003 гг., а данные измерительные комплексы разработаны на базе германиевых детекторов, созданных А.Х. Хусаиновым [42].

#### АО «СВЕТЛАНА-РЕНТГЕН»

На заводе, созданном в 1910 г. «Русским обществом беспроводных телеграфов и телефонов» (**РОБТИТ**), был осуществлён выпуск радиоламп. В августе 1922 г. на базе РОБТИТ был организован Электровакуумный завод, ориентированный на массовый выпуск радиоламп, а через год при этом заводе создана Центральная радиолaborатория (**ЦРЛ**). В этой лаборатории был отдел рентгеновских трубок под руководством Ф.Н. Хараджи. Отделение осветительных электроламп «Светлана» (Это аббревиатура: **СВЕТ**овые **ЛАМ**пы **Нака**ливания) было создано в машиностроительном акционерном обществе «Я.М. Айваз» в 1913 г. [43].

В 1928 г. Электровакуумный завод объединили с заводом «Светлана» и ЦРЛ. Отдельный цех специализировался на выпуске рентгеновских трубок; на территории цеха разместилась лаборатория рентгеновских трубок. Эта лаборатория использовала технологические и физические достижения Отраслевой вакуумной лаборатории и результаты теоретических и экспериментальных исследований по вакуумной электронике Физико-технического, Политехнического и Электротехнического институтов. В Электротехническом институте в 1938 г. организовали кафедру рентгенотехники (Заведующий кафедрой Хараджа Ф.Н.) и была организована подготовка инженеров вакуумщиков [44].

Фирма «Светлана-Рентген» основана в 1949 г. как подразделение Ленинградского объединения электронного приборостроения «Светлана» (с 1992 г. ПАО «Светлана»), крупнейшего отечественного производителя электронных компонентов. В 1993 г. фирма преобразована в АО «Светлана-Рентген», являясь дочерним предприятием ПАО «Светлана», и осуществляет разработку, производство и сбыт рентгеновских трубок для различных областей применения, таких как структурный и спектральный анализ материалов, криминалистика, медицинская диагностика, неразрушающий контроль материалов, контроль багажа и грузов [45].

## ЛЕНИНГРАДСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР МЕДИЦИНСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Созданная в 1989 г. научно-исследовательская и производственная компания НИПК «ЭЛЕКТРОН» является крупнейшим на Северо-Западе России производителем, выпускающим всю номенклатуру современной медицинской рентгеновской аппаратуры, директор А.М. Элисон [46]. В АО «ЦНИИ «ЭЛЕКТРОН» разработана уникальная рентгеновская трубка с фотокатодом, технические возможности которой открывают новые области применения рентгеновских технических средств.

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) с 1938 г. проводит исследования и разработки в области рентгенотехники и методик ее применения. Создана и успешно развивается технология микрофокусной рентгенографии. Ее приложение в медицинской диагностике является, бесспорно, признанным международным приоритетом. Разработаны и освоены в серийном производстве микрофокусные источники рентгеновского излучения, аппаратов на их основе, а также цифровые рентгенографические комплексы для получения двух- и трех-мерных изображений объекта диагностики, которые успешно эксплуатируются на промышленных предприятиях, в медицинских учреждениях и научных организациях России, а также за рубежом [47].

## СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ПРОМЫШЛЕННОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ

### «АО Инновационный Центр «Буревестник»

В настоящее время «АО ИЦ «БУРЕВЕСТИК» выпускает рентгеновские сепараторы, дифрактометры, спектрометры/анализаторы и кристалл-дифракционные диспергирующие элементы (КДЭ) [48].

Линейка рентгенолюминесцентных сепараторов АО «ИЦ «Буревестник» охватывает все стадии обогащения алмазосодержащих материалов: сепараторы первичного обогащения исходной руды и сепараторы доводки. Кроме этого выпускаются рентгенографические сепараторы, портативные сепараторы для геологоразведки и установки для анализа характеристик люминесценции минералов. Первый в мире промышленный рентгенолюминесцентный сепаратор для обогащения алмазосодержащей руды был произведен на предприятии в 1967 г. За годы работы предприятие выпустило более 1600 сепараторов, которые успешно эксплуатируются на алмазодобывающих предприятиях Анголы, ЮАР, Лесото, Зимбабве и России.

Для рентгенодифракционного анализа выпускаются две модели многофункциональных рентгеновских дифрактометров ДРОН-8 и ДРОН-7М, настольный дифрактометр КОЛИБРИ. Всего с начала

разработки и серийного производства (1959-1965 гг.) было выпущено более 10 000 дифрактометров.

Для РФА выпускаются настольные лабораторные приборы с малой потребляемой мощностью: универсальный рентгенофлуоресцентный энергодисперсионный спектрометр БРА-135F с полупроводниковым детектором, энергодисперсионный анализатор АСЭ-2 для определения S в нефтепродуктах с газовым пропорциональным счетчиком, волнодисперсионный анализатор S в нефтепродуктах АСВ-2 с газовым пропорциональным счетчиком с измерениями в воздушной атмосфере и в режиме гелиевой продувки вакуумной камеры и приборы с потребляемой мощностью до 5 кВт: рентгенофлуоресцентный волнодисперсионный анализатор АР-35 для анализа пульп, суспензий и растворов в потоке и специализированный волнодисперсионный анализатор АРФ-7, построенный по схеме Кошуа, для проведения высокоточного количественного определения U, Th, Mo, Au, W, Tl, As и Pb, а также других элементов в рудах, горных породах и при разработках техногенных месторождений.

Выпускаются кристалл-дифракционные диспергирующие элементы: фтористый литий (200), (220), (420); германий (111), (220), (422); кремний (111), (220), (422); кварц (10 $\bar{1}$ 1), (10 $\bar{1}$ 0), (1340); графит (002); пентаэритрит РЕТ (002); бифталат калия КАР (001); бифталат рубидия RbAP (001); многослойные покрытия разных типов. Доступны и другие различные ориентации отражающих плоскостей: параллельно рабочей поверхности (дифракция на отражение); перпендикулярно рабочей поверхности (дифракция на прохождение; под произвольным углом к рабочей поверхности. КДЭ сложной формы: с одинарным изгибом (цилиндрические, конические); с двойным изгибом (сферические, тороидальные); со сложным контуром (треугольным, эллиптическим и т.д.); с вышлифовкой по Иоганссону; с изгибом по логарифмической спирали; с пазами для многократного отражения и интерференции.

### НПО «Спектрон»

В 1989 г. группа специалистов, ранее работавших в НПО «Буревестник», во главе с д.т.н. К.В. Анисовичем организовала малое предприятие НПО «СПЕКТРОН» [49]. В основе разработки рентгеновских спектрометров и анализаторов была применена светосильная рентгенооптическая схема для волнодисперсионных спектрометров [24, 25] и дифференциальный детектор, включающий селективный/краевой фильтр и вторичный излучатель, для энергодисперсионных спектрометров и анализаторов [25, 33, 34]. В конструкции приборов применены собственные разработки НПО «СПЕКТРОН», такие как детекторы, кристаллы анализаторы, высокоточные механические устройства – гониометры, высоковольтные блоки питания и спектрометрические электронные узлы. Аппаратура оснащена современным программным обеспечением. Кроме

того, по желанию заказчика может сопровождаться необходимым методическим обеспечением. В приборах применяются рентгеновские трубки прострельного типа и с массивным анодом.

Линейка рентгеновских анализаторов состоит из четырех волнодисперсионных приборов, трёх энергодисперсионных приборов и одного рентгено-абсорбционного анализатора серы в потоке нефти. Эти анализаторы специализированы в основном для решения аналитических задач нефтехимии и позволяют определять содержание серы, хлора и некоторых металлов в нефтепродуктах и автомобильном топливе. Линейка волнодисперсионных рентгеновских спектрометров содержит вакуумный спектрометр и воздушные спектрометры, которые могут комплектоваться одним или двумя энергодисперсионными каналами. Разработан портативный рентгенофлуоресцентный энергодисперсионный спектрометр с SDD-детектором с термоэлектрическим охлаждением. Поставки приборов комплектуются дополнительными устройствами для подготовки проб к анализу и методиками.

С 1989 г. в НПО «Спектрон» было выпущено более 3000 спектрометров и анализаторов. Кроме России приборы НПО «Спектрон» поставлялись и поставляются в Казахстан, Украину, Туркменистан, Белоруссию, Узбекистан, Киргизию, Филиппины, Индонезию, Китай, Индию, Алжир, Экваториальную Гвинею, Нигерию, Колумбию, Польшу, Чехию, Румынию, Грецию.

### ООО «Спектрофлэш»

Фирма «Спектрофлэш» была создана Е.А. Пеликсом и В.М. Курбатовым в 1990 г. на базе НПК «Импульс» НПО «Буревестник» и немецких компаньонов [50]. Фирма на протяжении 25 лет занимается разработкой и серийным выпуском портативных рентгеновских дефектоскопов, предназначенных для контроля качества различных металлоконструкций в труднодоступных местах. Наибольшая часть из них, получившая при создании название АРИНА, работает в импульсном режиме на принципе взрывной электронной эмиссии, содержит 6 моделей, отличающихся друг от друга напряжением на рентгеновской трубке и мощностью излучения. Данные аппараты выгодно отличаются от приборов постоянного потенциала малыми габаритами и весом, возможностью применения как панорамного, так и направленного просвечивания, возможностью питания от аккумуляторов и простотой в обслуживании и при производстве ремонтных работ. На этом принципе работают аппараты серий ПАМИР и АРИНА. Приборы серии МАРТ работают на рентгеновских трубках с постоянным анодным напряжением. С начала разработки этого направления было выпущено более 10000 приборов.

### ООО «Радикон»

Предприятие было создано в 1991 г. на базе лаборатории количественных дифракционных методов НПО «Буревестник» [51]. Первым директором предприятия стал к.ф.-м.н. П.В. Петрашень, а в 1996 г. директором стал А.Ю. Разумовский, оба выпускники кафедры ЭТТ. Основной вид деятельности предприятия – разработка, производство и поставка специализированных дифрактометров по техническим заданиям заказчиков. Для управления дифрактометрами была разработана универсальная легко расширяемая система управления на базе персонального компьютера. Программное обеспечение верхнего уровня содержит простой язык программирования RDPL, который дает возможность пользователю менять стандартные программы работы с приборами под свои задачи. В первые годы это были многокристальные системы – двух-, трехкристальные приборы. Позднее был разработан настольный дифрактометр МД-10 на базе позиционно-чувствительного детектора. Этот дифрактометр оптимален для использования в учебных лабораториях. В последние годы есть спрос на приборы для определения ориентации различных кристаллов. Особенность в том, что кристаллы либо очень маленькие (0.2-0.3 мм), либо очень большие – до 100 кг. И в том, и в другом случае приходится делать специализированный прибор. Разработаны приборы для определения ориентации кварца, сапфира, карбида кремния, лангасита, алмаза, кремния и т.д. В настоящий момент разработан дифрактометр для определения ориентации больших слитков кремния – весом до 100 кг.

Предприятие разработало и поставило следующие приборы:

- автоматизированный гониометр Киркпатрика-Баеза (первый кристалл – 5 степеней свободы, второй кристалл – 6 степеней свободы, диафрагма – 2 линейных подвижки) - Синхротрон LURE, Orsay, Франция;
- трехкристальный дифрактометр - Aviv University (Израиль), BESSY, (Берлин, Германия), Monash University (Австралия);
- системы управления различными рентгеновскими приборами – Словакия, Корея, Германия, Россия;
- двухкристальный дифрактометр – Россия;
- минидифрактометр МД-10 – 38 приборов поставлено в различные организации США, Европы, Азии, Африки и России;
- сцинтилляционные детекторы (7 моделей) - 199 штук в различные организации США, Европы, Азии, Австралии и России;
- дифрактометры для определения ориентации монокристаллов: 21 прибор в России, 2 – в США.

### «Элион», ООО

Предприятие было создано Д.А. Гогановым на базе НПК «Детектор» НПО «Буревестник» [52]. Предприятие работает уже более 10 лет и занимается разработкой и мелкосерийным производством газоразрядных спектрометрических и позиционно-чувствительных детекторов рентгеновского излучения (более 20 типов) и блоков детектирования на их основе. ГПД по-прежнему находят широкое применение при анализе материалов в науке и технике. Они используются в аппаратуре рентгеновского анализа для определения структуры и элементного состава материалов – рентгеновских дифрактометрах и спектрометрах, специализированных датчиках состава вещества. Разработаны и серийно выпускаются несколько типов ГПД для диапазона энергий 1-30 кэВ.

### ЗАО «Комита»

Научно-техническое управление ЗАО было создано в 1997 г.; заместитель генерального директора по науке к.ф.-м.н. А.С. Серебряков (1947-2020 гг.). Предприятие выпускает две модели рентгенофлуоресцентных энергодисперсионных анализаторов состава вещества: универсальный анализатор X-Арт М и конвейерный анализатор X-Соп [53]. Кроме традиционного применения анализатора X-Арт М для анализа состава материалов, анализатор успешно применяется для анализа произведений искусства: состава пигментов, грунтов, гравюр, скульптур, бумаги, металлов и драгметаллов, изделий декоративно-прикладного искусства и археометрия (анализ древностей) [54]. Анализатор X-Соп применяется для определения состава материалов, движущихся по конвейеру.

### АО «Научные приборы»

АО «Научные приборы» (АО «НП») было создано на базе СКБ аналитического приборостроения АН СССР (в настоящее время Институт аналитического приборостроения РАН). АО «НП» выпускает приборы для элементного и рентгенофазового анализа макро- и микрообъектов, рентгенофлуоресцентной микроскопии, определения состава и толщины плёнок и нанопокровов, контроля кристаллографических параметров пластин и монокристаллов. В рентгеновских спектрометрах, микроскопе и портативном анализаторе используется кремниевый дрейфовый детектор с электроохлаждением, в дифрактометрах серии Дифрей используется изогнутый газонаполненный позиционно-чувствительный детектор [55].

### ЗАО «НПО «РИВС»

Компания РИВС (Разработка, Изготовление, Внедрение, Сервис) создана в 1991 году к.т.н. А.В. Зиминим (1951-2017 гг.). Ядро коллектива составила группа конструкторов и технологов экспе-

риментально-конструкторской части Всесоюзного научно-исследовательского и проектного института «Механобр» [56]. Основное направление работ – это производство обогатительного оборудования, в первую очередь, флотационных машин, проектирование локальных систем автоматического контроля и регулирования технологических параметров, автоматизированных систем аналитического контроля (АСАК) и комплексных систем автоматического управления технологическими процессами (АСУ ТП) отдельных переделов и фабрик в целом.

Основным элементом любой АСАК является анализатор; компания применяет различные анализаторы и в т.ч. рентгенофлуоресцентные различных производителей. В 2016 г. компания разработала и провела испытание автоматического рентгенофлуоресцентного пульпового анализатора РФА-РИВС; отличительной особенностью этого анализатора является использование маломощной рентгеновской трубки (4 Вт) и полупроводникового детектора [57].

### АО «Светлана-Рентген»

АО «Светлана-Рентген» выпускает рентгеновские трубки промышленного и медицинского применения [58]. Линейка рентгеновских трубок промышленного применения включает трубки для неразрушающего контроля материалов, для контроля багажа и грузов, для структурного анализа с массивным анодом, для спектрального анализа с массивным анодом, для структурного анализа с анодом «прострельного» типа, для спектрального анализа с анодом «прострельного» типа. Линейка рентгеновских трубок медицинского применения включает трубки для диагностики с вращающимся анодом, для диагностики со стационарным анодом, для стоматологии и для специального медицинского применения.

В настоящее время более 30000 единиц рентгеновского оборудования работает в России и странах СНГ с рентгеновскими трубками, изготовленными в АО «Светлана-Рентген». Фирма экспортирует более 40 % объема выпускаемых ежегодно рентгеновских трубок и уже более 500 рентгеновских аппаратов в 25 странах мира работает с трубками, изготовленными в АО «Светлана-Рентген».

### ООО «Полюс»

В ООО «Полюс» разрабатывается рентгеновский спектрометр в геометрии полного внешнего отражения в схеме с волноводом-резонатором [59]. В рентгенооптической схеме РФА ПВОВР исследуемый образец располагается прямо в потоке волновода резонатора. Испытания подтвердили преимущество разрабатываемого спектрометра, по сравнению с традиционной схемой ПВО, заключающееся в более высоких аналитических параметрах, в простоте пробоподготовки, в возможности анализа образцов различного агрегатного состояния.

## РАЗВИТИЕ МЕТОДА РЕНТГЕНО-ФЛУОРЕСЦЕНТНОГО АНАЛИЗА УЧЕНЫМИ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

Особый вклад в исследования в области РФА ленинградской школы тесно связан с именем Плотникова Р.И. [60] (рис. 17) и с работами сотрудников его лаборатории в НПО «Буревестник».

Исследования в области рентгенорадиометрического анализа завершились изданием монографии по развитию приборов и методов анализа с использованием радиоактивных источников рентгеновского излучения [32]. Эти разработки успешно применялись в методических приёмах на рентгенорадиометрических приборах, выпускаемых ФГПУ «ВИРГ-Рудгеофизика».

В развитии методических работ в ПНО «Буревестник» существенную помощь оказали сотрудники Института геохимии СО РАН и Иркутского государственного университета В.П. Афонин, Г.В. Павлинский, А.Н. Смагунова и А.Г. Ревенко.

В числе первых в СССР были опробованы и внедрены в аналитическую практику способ множественной регрессии (СМР) [61] и способ теоретических поправок (СТП) [62]. СМР нашел применение при анализе пульп в потоке и при анализе порошковых и монолитных проб, как наиболее универсальный способ РФА. Для проведения градуировки пульп предложен способ использования твердых (на основе борной кислоты) моделей пульп [63]. Для построения уравнений в СМР был предложен алгоритм включения значимых членов уравнения, что обеспечивало получение оптимального результата анализа [64]. Исследования СТП позволили провести обоснование формулы способа и сделать вывод, что при монохроматическом возбуждении и отсутствии избирательного возбуждения способ обеспечивает точное определение содержания элементов с постоянными теоретическими коэффициентами влияния (ТКВ) во всём диапазоне



**Рис. 17.** Плотников Роберт Исаакович 1928-2015 гг. Кандидат технических наук. Присвоено звание «Лучший изобретатель приборостроения».

**Fig. 17.** Robert Plotnikov, 1928-2015, Candidate of Technical Sciences. Awarded the title «The Best Inventor of Instrumentation».

изменения содержаний элементов в материале [65]. Способ был развит для случая избирательного возбуждения [66] и полихроматического возбуждения флуоресценции [67, 68]. С применением ТКВ были разработаны способы построения эмпирических и теоретических уравнений связи, обеспечивающие получение требуемой погрешности анализа [69]. С учетом неточного численного значения величин фундаментальных параметров [70] и неопределённости условий возбуждения [71] был разработан вариант СТП, позволяющий находить и использовать оптимальные численные значения ТКВ, что позволило по сравнению с традиционным способом расчета ТКВ до трех раз снизить погрешность градуировки при анализе сталей [72] и значительно расширить диапазон содержания элементов в градуировочных образцах при анализе железомарганцевых конкреций [73]. Некоторые специальные вопросы, связанные с теоретическим и регрессионным учетом межэлементных влияний, рассмотрены в работах Я.Б. Котлярова и Р.И. Плотникова [74].

Для априорной оценки инструментальной погрешности рентгенофлуоресцентного определения содержания элементов в анализируемых материалах разработан способ, использующий паспортные (или измеренные) аналитические параметры рентгеновского спектрометра (интегральную чувствительность, контрастность и предел основной аппаратной погрешности) и теоретические коэффициенты – абсорбционные факторы (АФ) [75-76]. В дальнейшем способ был применён для градуировки при отсутствии адекватных градуировочных образцов [77, 78], для определения содержания элементов при отсутствии градуировочных образцов с использованием интегральной чувствительности [79] и для оценки снижения погрешности РФА при разбавлении проб тяжелым или легким разбавителем [80]. Способ с использованием АФ был применён для аналитических целей [81] и в дальнейшем развитии был использован как вариант способа фундаментальных параметров [72, 82].

Для программного обеспечения (ПО) рентгеновских спектрометров было предложено комбинированное уравнение связи, позволяющее реализовать СМР, СТП, способ стандарта-фона, способ отношения интенсивностей [72]. Для учета аппаратного дрейфа в ПО применяется способ коррекции по двум контрольным образцам (позволяет учитывать дрейф интенсивности и фона) [83]; этот способ позволяет проводить градуировку партии рентгеновских спектрометров, используя градуировку одного референтного спектрометра [72, 84]. Для коррекции просчетов интенсивности применяется формула продленного мертвого времени [85], что позволяет повысить точность измерения высоких значений интенсивностей по сравнению с коррекцией по мелко-линейной формуле.

Разработаны и предложены новые способы применения аналитических кристалл-дифракцион-

ных рентгенофлуоресцентных спектрометров для идентификации анализируемых материалов, в т.ч. и органических соединений [86]; для количественного определения содержания водорода, у которого отсутствуют линии флуоресцентного излучения и элементов с малым атомным номером по линиям рассеянного излучения в области коротких и средних длин волн [87, 88]; количественного определения углерода в сталях по дифракционным линиям в области средних длин волн [89, 90]; определение химического сдвига и количественного определения элементов и компонентов разной валентности по форме аналитических линий [82, 91, 92].

Обнаружен ранее не описанный в научной литературе эффект некогерентного рассеяния флуоресцентных линий элементов со средним атомным номером в образцах с малым эффективным атомным номером [93].

Коллективом ученых кафедры ядерной геофизики исследован резонансного комбинационного рассеяния рентгеновского излучения вблизи краёв поглощения и предложен способ анализа по линиям резонансного рассеяния [94, 95]. Экспериментальные исследования проводились на оригинальной установке – комбинации кристалл-дифракционного спектрометра по схеме Кошуа и полупроводникового спектрометра с охлаждением жидким азотом. Для определения малых содержаний рудных элементов в материалах с существенно разными эффективными атомными номерами разработан способ стандарта-фона, который нашел широкое применение, как в аналитических лабораториях, так и в мобильных приборах при проведении полевых поисковых геологических работ. Развитие способа стандарта-фона для определения элементов с большим диапазоном содержаний проведено А.В. Бахтиаровым [96].

В работах сотрудников ФГПУ ЦНИИКМ «Прометей» Мосичева В.И. и Першина Н.В. предложены нелинейные уравнения связи и способы их решения [97]. При проведении работ на атомной электростанции в Бушере (Иран) Першиным Н.В. был освоен и проработан способ дистанционного РФА, когда при необходимости определить состав металлоконструкций, отбор пробы осуществляется на шлифовальную бумагу и затем проводится анализ шлифовальной бумаги на стационарном спектрометре [98].

Рассеянное рентгеновское и гамма-излучение широко используется при решении различных задач аналитической химии. Так в РФА оно позволяет проводить учёт влияния вещественного состава пробы (способ стандарта-фона), а в гамма-каротаже является основным аналитическим параметром. Для теоретических расчётов рассеянного рентгеновского излучения необходимы дифференциальные коэффициенты когерентного и некогерентного рассеяния. Справочные данные по фундаментальным параметрам приведены в многочисленных монографиях,

которые публикуются с середины XX века, однако в них приводились только интегральные коэффициенты рассеяния. Среди отечественных исследований в этой области отметим работу по расчету дифференциальных коэффициентов рассеяния, выполненную на кафедре ядерной геофизики ЛГУ и в НПО «Буревестник» [32, 99, 100]. Данные, полученные в работе [99], были включены в справочник (Блохин М.А., Швейцер И.Г. Рентгеноспектральный справочник. М.: «Наука», Главная редакция физико-математической литературы. 1982. 376 с.). Кроме того, следует отметить работу по актуальной для своего времени проблеме компактирования объемных данных по сечениям рассеяния и ослабления для рентгеновского и радиоизотопного излучения, выполненную сотрудниками НПО «Буревестник» под руководством О.С. Маренкова (1937-2010 гг.). В этой работе были построены коэффициенты на основе простых выражений аппроксимации известных на тот момент данных по сечениям в широком интервале значений. Результаты этих расчетов наиболее полно приведены в монографиях [101, 102].

Кроме монографий эти коэффициенты доступны в электронном виде: программный комплекс «X-Energy» [103]. Расчет теоретических интенсивностей включен в программное обеспечение кристалл-дифракционных спектрометров серии «Спектроскан» [72] и ППД-спектрометров серии БРА [82].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В обзоре отмечено, что в С.-Петербурге/Ленинграде впервые в России/СССР начаты исследования рентгеновского излучения, производилась рентгеновская аппаратура, и развивалось рентгеновское материаловедение. В настоящее время рентгеновская тематика сохранилась, однако, производство рентгеновских приборов для научных исследований и микроскопов сократилось, производство микроанализаторов прекратилось. Для производства энергодисперсионных приборов используются импортные полупроводниковые детекторы.

Для обзора дополнительную информацию предоставили Т.С. Аргунова, И.А. Брытов, Ал.Д. Гоганов, Ан.Д. Гоганов, Ш.И. Дуймакаев, Л.М. Сорокин, Н.Н. Потрахов, Е.Ю. Каминский, П.П. Киселев, М.Т. Коган, Д.В. Лимонов, А.Ю. Разумовский, А.Г. Ревенко, Г.Н. Фурсей, С.П. Щекотихин.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Исторический обзор. Открытие рентгеновских лучей. [Электронный ресурс]: [https://studme.org/251883/matematika\\_himiya\\_fizik/istoricheskiy\\_obzor](https://studme.org/251883/matematika_himiya_fizik/istoricheskiy_obzor) (дата обращения: июль 2020).
2. Röntgen W.C. Ueber eine neue Art von Strahlen // Aus den Sitzungsberichten der Würzburger Physik.-medic. Gesellschaft, Würzburg. 1895. P. 132. [Электронный ресурс]: [https://roentgenmuseum.de/cool\\_timeline/eine-neue-art-von-strahlen/](https://roentgenmuseum.de/cool_timeline/eine-neue-art-von-strahlen/) (дата обращения: август 2020).

3. Рентген В.К. О новом роде лучей: Пер. с нем. с прил. статей ак. А. Ф. Иоффе. Очерк жизни Рентгена и проф. М.И. Неменова Значение рентгеновых лучей для медицины и биологии. М. ГТТИ, 1933. 123 с.
4. Френкель В.Я. Двойной юбилей: 150-летие со дня рождения Вильгельма Конрада Рентгена (1995 г.) и 100-летие со дня публикации статьи об открытии рентгеновских лучей (1996) // Физика твёрдого тела. 1996. Т. 38, № 9. С. 2609-2630.
5. Никифоров И.Я. Творцы физических наук. Ростов н/Д: «Феникс», 2009. 445 с.
6. История открытия рентгеновского излучения. [Электронный ресурс]: <https://zen.yandex.ru/media/id/5e0b0b4098fe7900b03145d6/istoria-otkrytiia-rentgenovskogo-izlucheniia-5e0cf98d11691d00ae96b217> (дата обращения: июль 2020).
7. Плюккер, Юлиус. [Электронный ресурс]: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BB%D1%8E%D0%BA%D0%BA%D0%B5%D1%80\\_%D0%AE%D0%BB%D0%B8%D1%83%D1%81](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BB%D1%8E%D0%BA%D0%BA%D0%B5%D1%80_%D0%AE%D0%BB%D0%B8%D1%83%D1%81) (дата обращения: июль 2020).
8. Бернатосян С.Г. Воровство и обман в науке (Серия «Наука с черного хода») СПб.: «Эрудит», 1998. 384 с.
9. Ревенко А.Г. 125 лет со дня открытия рентгеновских лучей // Аналитика и контроль. 2020. Т. 24, № 1. С. 66–79.
10. [Электронный ресурс]: [http://wikiredia.ru/wiki/Российский\\_научный\\_центр\\_радиологии\\_и\\_хирургических\\_технологий\\_сайт\\_Российского\\_научного\\_центра\\_радиологии\\_и\\_хирургических\\_технологий\\_им.\\_академика\\_А.М.\\_Гранова](http://wikiredia.ru/wiki/Российский_научный_центр_радиологии_и_хирургических_технологий_сайт_Российского_научного_центра_радиологии_и_хирургических_технологий_им._академика_А.М._Гранова) (дата обращения: июль 2020).
11. Иоффе, Абрам Фёдорович. [Электронный ресурс]: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Иоффе,\\_Абрам\\_Фёдорович](https://ru.wikipedia.org/wiki/Иоффе,_Абрам_Фёдорович) (дата обращения: июль 2020).
12. Селяков Николай Яковлевич [Электронный ресурс]: <https://www.booksite.ru/fulltext/ime/nav/olo/gzh/an/3.htm> (дата обращения август 2020).
13. Елистратов А.М., Ефимов О.Н. Влияние нарушений периодичности на эффект аномального прохождения рентгеновских лучей // Физика твердого тела. 1962. Т. 4, № 9. С. 2397-2410.
14. Кафедра электроники твердого тела в Санкт-Петербургском университете (к 80-летию кафедры); под редакцией А.С. Шулакова. СПб.: изд-во С.-Петерб. У-та. 2012. 278 с.
15. Лукирский Пётр Иванович. [Электронный ресурс]: <http://romnipro.ru/memopage1057/biography> (дата обращения: июль 2020).
16. Филатова Е.О. Ультрамягкая рентгеновская спектроскопия. [Электронный ресурс]: <https://phys.spbu.ru/content/File/ESS/ultramyagkayarentgenovskaya.htm> (дата обращения: июль 2020).
17. Андреева М.А., Гитцович В.Н., Иркаев С.М., Семенов В.Г. // Когерентная мессбауэровская рефлектометрия поверхности // Изв. Академии наук, серия физическая. 1998. Т. 62, № 2. С. 406-417.
18. Фурсей Г.Н., Воронцов-Вельяминов П.Н. Качественная модель иницирования вакуумной дуги // Журнал технической физики. 1967. Т. 7, № 10. С. 1870-1888.
19. Комяк Н.И. 50-летие отечественного рентгеновского приборостроения // Аппаратура и методы рентгеновского анализа. Л.: Машиностроение, 1980. Вып. 24. С. 4-12.
20. 50 лет научно-производственному предприятию «Буревестник». История создания и основные этапы деятельности; под редакцией Дибнера С.В. Санкт-Петербург: Alex4studio, 2009. 91 с.
21. Приборостроение – XX век. Сост. Шкабардня М.С. М.: Совершенно секретно, 2004. 768 с.
22. Брытов И.А. Николай Иванович Комяк, организатор отечественного рентгеновского приборостроения, ученый и человек (к 90-летию юбилею) // Научное приборостроение. 2018. Т. 28, № 4. С. 21-23.
23. Игорь Александрович Брытов (К 80-летию со дня рождения) // Журнал аналитической химии. 2018. Т. 73, № 10. С. 88–89.
24. А.с. 614367 СССР. Флуоресцентный рентгеновский спектрометр / Анисович К.В., Комяк Н.И. (СССР). Флуоресцентный рентгеновский спектрометр. Заявлено 26.09.1975; опубл. 05.08.1978. Бюл. № 25.
25. Анисович К.В. Высокочувствительная рентгеновская аппаратура на основе маломощных источников первичного излучения (Обзор) // Заводская лаборатория. 1982. Т. 48, № 9. С.32-38.
26. Калинин Б.Д., Плотников Р.И., Подвальный Я.А. Рентгеноспектральный анализ сталей и сплавов // Заводская лаборатория. 1993. Т. 59, № 9. С. 16-20.
27. Флуоресцентный рентгеновский анализатор типа ФРА-4 / С.С. Ленин [и др.] // Аппаратура и методы рентгеновского анализа. Л.: СКБ рентгеновской аппаратуры. 1970. Вып. 6. С. 187-192.
28. Гоганов А.Д., Калинин Б.Д., Плотников Р.И. Определение малых содержаний урана на рентгенофлуоресцентном анализаторе // Тез. докл. VII Всероссийской конференции по рентгеноспектральному анализу. Новосибирск 19-23 сентября 2011 г. С. 34.
29. Автоматический рентгеновский квантометр КРФ-13 для анализа пульпы в потоке / Н.И. Комяк [и др.] // Аппаратура и методы рентгеновского анализа. Л.: Машиностроение. 1974. Вып. 15. С. 112-119.
30. Анисович К.В., Буман А.И. Кристалл-дифракционный спектрометр с монохроматическим возбуждением флуоресценции // Аппаратура и методы рентгеновского анализа. Л.: Машиностроение. 1975. Вып. 17. С. 82-86.
31. Анисович К.В., Буман А.И. Рентгеновский спектрометр с кристаллом — монохроматором для количественного анализа // Аппаратура и методы рентгеновского анализа. Л.: Машиностроение. 1975. Вып. 17. С. 87-90.
32. Плотников Р.И., Пшеничный Г.А. Флуоресцентный рентгенорадиометрический анализ. М.: Атомиздат, 1973. 264 с.
- 33 А.с. 246697 СССР. Детектор рентгеновского излучения / Анисович К.В., Комяк Н.И. Заявлено 16.03.1968; опубл. 26.10.1973. Бюл. № 43.
34. Анисович К.В., Комяк Н.И. Узкополосный детектор рентгеновского излучения // Приборы и техника эксперимента. 1975. №2. С. 216 -218.
35. Памяти Дмитрия Алексеевича Гоганова // Аналитика и контроль. 2020. Т. 24, № 2. С. 152-157.
36. Мейер Владимир Александрович. [Электронный ресурс]: <http://faces.mukcgb.ru/Faces/Details/b7b3a9f9-95d4-4c74-aed5-cfe47a971015> (дата обращения: июль 2020).
37. Мейер И.А., Ваганов П.А Основы ядерной геофизики. Изд-во Ленингр. ун-та, Л., 1985. 407 с.
38. Леман Евгений Павлович. [Электронный ресурс]: <http://geolraz.com/page/LEMAN-E-P> (дата обращения: июль 2020).
39. Очкур Александр Петрович. [Электронный ресурс]: <http://geolraz.com/page/-OChKUR-A-P/> (дата обращения июль 2020).
40. Соколов Михаил Матвеевич. [Электронный ресурс]: <http://geolraz.com/page/Sokolov-MM/> (дата обращения: июль 2020).
41. Сумбаев Олег Игоревич. [Электронный ресурс]: <http://nrd.pnpi.spb.ru/directora/sumb.html> (дата обращения: июль 2020).

42. Хусаинов Абдурахман Хусаинович. [Электронный ресурс]: <http://dbserv.pnpi.spb.ru/ioc/ioc/line0434/n6.htm> (дата обращения: июль 2020).
43. Светлана (компания). [Электронный ресурс]: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Светлана\\_\(компания\)#cite\\_note-3](https://ru.wikipedia.org/wiki/Светлана_(компания)#cite_note-3) (дата обращения: июль 2020).
44. Быстров Ю.А. Взгляд сквозь годы. Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2008 г. 316 с.
45. [Электронный ресурс]: <http://www.svetlana-x-ray.ru/about.html> АО «Светлана-Рентген» (дата обращения: июль 2020).
46. [Электронный ресурс]: <https://electronxray.com/> сайт НИПК Электрон (дата обращения: июль 2020).
47. Потрахов Н.Н., Подымский А.А., Куликов Н.А. Рентгеновские трубки нового поколения производства ЗАО «Светлана-Рентген», используемые в медицинской технике. [Электронный ресурс]: <http://docplayer.ru/28984581-Rentgenovskie-trubki-novogo-pokoleniya-proizvodstva-zao-svetlana-rentgen.html> (дата обращения: июль 2020).
48. [Электронный ресурс]: <https://www.bouvestnik.ru> сайт АО ИЦ Буревестник (дата обращения: июль 2020).
49. [Электронный ресурс]: <https://spectronxray.ru/> сайт НПО «Спектрон» (дата обращения: июль 2020).
50. [Электронный ресурс]: <https://www.spectroflash.ru/> сайт ООО «Спектрофлэш» (дата обращения: июль 2020).
51. [Электронный ресурс]: [www.radicon.spb.ru](http://www.radicon.spb.ru) сайт ООО «Радикон» (дата обращения: июль 2020).
52. [Электронный ресурс]: <https://elion.all.biz/> сайт «Элион», ООО (дата обращения: июль 2020).
53. [Электронный ресурс]: <http://www.x-art.comita.ru/> сайт ЗАО «Комита» (дата обращения: июль 2020).
54. Незаменимый музейный эксперт. [Электронный ресурс]: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=print&sid=418> (дата обращения: июль 2020).
55. [Электронный ресурс]: <https://www.sinstr.ru/products/analytics/> сайт АО «Научные приборы» (дата обращения июль 2020).
56. [Электронный ресурс]: <http://www.rivs.ru/> сайт НПО «РИВС» (дата обращения: июль 2020).
57. Бондаренко А.В., Никандров И.С., Андреев Д.С. Особенности построения фирменной АСАК-РИВС для горно-обогатительных предприятий // Горный журнал. 2016. № 11. С. 71-74.
58. [Электронный ресурс]: <http://www.svetlana-x-ray.ru/> сайт АО «Светлана-Рентген» (дата обращения: июль 2020).
59. Лукьянченко Е.М., Егоров В.К., Руденко В.Н., Егоров Е.В. РФА в геометрии полного внешнего отражения в схеме с волноводом-резонатором (РФА ПВОВР), как новый метод исследования // Тез. докл. III Всерос. конф. по аналитической спектроскопии, Краснодар, 2019. С. 139.
60. Калинин Б.Д. Памяти ученого // Аналитика и контроль. 2016. Т. 20, № 2. С. 175-183.
61. Применение метода множественной регрессии в рентгеноспектральном анализе / Ю.М. Гурвич [и др.] // Сборник «Аппаратура и методы рентгеновского анализа», вып.13, Машиностроение, 1974. С. 122-128.
62. Учет взаимных влияний элементов при рентгеноспектральном анализе легированных сталей / А.Г. Ревенко [и др.] // Заводская лаборатория. 1974. Т. 40, №6. С. 15-19.
63. Гурвич Ю.М., Межевич А.Н., Плотников Р.И., Рогачев И.М. Использование твердых моделей при разработке методик рентгеноспектрального анализа пульпы в потоке // Аппаратура и методы рентгеновского анализа. Л., Машиностроение. 1974. Вып.14. С. 53-59.
64. Сербин А.Я., Плотников Р.И. Применение ступенчатого метода поиска оптимальных форм регрессионных уравнений в рентгеноспектральном анализе // Аппаратура и методы рентгеновского анализа. Л., Машиностроение. 1974. Вып.17. С. 151-155.
65. Калинин Б.Д., Плотников Р.И., Федорова Л.М. К обоснованию метода теоретических поправок в рентгеноспектральном анализе // Заводская лаборатория. 1980. Т. 46, № 6. С. 505-507.
66. Калинин Б.Д., Плотников Р.И. Раздельный учет эффектов поглощения и избирательного возбуждения в методе теоретических поправок при рентгеноспектральном анализе // Заводская лаборатория. 1981. Т. 47, № 9. С. 53-56.
67. Калинин Б.Д., Карамышев Н.И., Плотников Р.И., Вершинин А.С. Учет изменения эффективной длины волны в рентгеноспектральном анализе способом теоретических поправок // Заводская лаборатория. 1985. Т. 51, № 8. С. 25-27.
68. Калинин Б.Д., Плотников Р.И. Развитие способа уравнений связи с теоретическими коэффициентами в рентгенофлуоресцентном анализе // Заводская лаборатория. 2008. Т. 74, № 3. С. 19-24.
69. Калинин Б.Д., Плотников Р.И. Способы построения уравнений связи в количественном рентгенофлуоресцентном анализе на основе теоретических коэффициентов влияния // Заводская лаборатория. 2009. Т. 75, № 7. С. 16-20.
70. Величко Ю.И., Ревенко А.Г. Количественная оценка влияния некоторых факторов на результаты расчета интенсивностей рентгеновского спектра флуоресценции // Исследования в области физики твердого тела. Иркутск. ИГУ. 1974. Вып. 2. С. 204-211.
71. Калинин Б.Д., Плотников Р.И., Сергеев Ю.И. Влияние неопределенности условий возбуждения на погрешность способа фундаментальных параметров в рентгенофлуоресцентном анализе // Заводская лаборатория. 2010. Т. 76, № 2. С. 15-17.
72. Дудик С.Л., Калинин Б.Д., Руднев А.В., Сергеев Ю.И. Анализ сталей и сплавов на рентгеновских спектрометрах серии «СПЕКТРОСКАН-МАКС» // Заводская лаборатория. 2014. Т. 80, № 1. С. 19-26.
73. Калинин Б.Д., Смыслов А.А. Рентгенофлуоресцентное определение основных порообразующих компонентов железомарганцевых конкреций // Заводская лаборатория. 2006. Т. 72, № 6. С. 17-20.
74. Котляров Я.Б., Плотников Р.И. Коррекция матричных эффектов в рентгеноспектральном анализе с помощью дифференциальных коэффициентов влияния // Журнал аналитической химии. 1983. Т. 38, № 3. С. 517-539.
75. Калинин Б.Д., Плотников Р.И., Токтарева Е.Г. Инструментальная погрешность рентгеноспектрального анализа продуктов черной металлургии // Заводская лаборатория. 1982. Т. 48, № 12. С. 26-28.
76. Афонин В.П., Комяк Н.И., Николаев В.П., Плотников Р.И. Рентгенофлуоресцентный анализ. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1991. 173 с.
77. Яфясов А.М., Калинин Б.Д., Плотников Р.И. Способ рентгенофлуоресцентного определения примесей в конструкционных материалах // Патент РФ на изобретение № 2584064 Заявка:2014153963 от 26.12.2014 Решение о выдаче патента от 19.01.2016. Опубликовано: 20.05.2016. Бюл. № 14.
78. Калинин Б.Д., Плотников Р.И. Рентгенофлуоресцентное определение легирующих и примесных элементов в гомогенных материалах при отсутствии адекватных градуировочных образцов // Аналитика и контроль. 2010. Т. 14, № 4. С. 236-242.



79. Калинин Б.Д. Рентгенофлуоресцентное определение содержания элемента в многокомпонентных образцах // Аналитика и контроль. 2019. Т. 23, № 4. С. 476-482.
80. Калинин Б.Д., Савельев С.К., Сергеев Ю.И. Априорная оценка метрологических характеристик рентгенофлуоресцентных определений содержания элементов и снижения величины межэлементных влияний при разбавлении проб // Аналитика и контроль. 2020. Т. 24, № 1. С. 6-14.
81. Калинин Б.Д., Плотников Р.И. Применение портативного рентгеновского спектрометра СПАРК-1М для анализа сталей и сплавов // Заводская лаборатория. 1998. Т. 64, №9. С. 29-32.
82. Калинин Б.Д. Реализация способа полуколичественного анализа на рентгеновских спектрометрах серий СПЕКТРОСКАН, БРА, СРМ // Тезисы докладов Третьего съезда аналитиков России, Москва 2017. С. 129.
83. Горский Ю.И., Плотников Р.И. Статистическая погрешность корректировки интенсивностей в рентгено-спектральном анализе при учете аппаратного дрейфа по контрольным образцам // Аппаратура и методы рентгеновского анализа. Л., Машиностроение. 1981. Вып. 25. С. 202-204.
84. Яфясов А.М., Калинин Б.Д., Плотников Р.И. Способ градуировки партии рентгеновских спектрометров // Патент РФ на изобретение № 2584065. Заявка:2014153964 от 26.12.2014. Решение о выдаче патента от 26.01.2016 Опубликовано: 20.05.2016. Бюл. № 14 G01N 23/223 (2006.01)
85. Калинин Б.Д., Карамышев Н.И., Плотников Р.И. Программное обеспечение многоканальных рентгеновских спектрометров // Заводская лаборатория. 1993. Т. 59, № 11. С. 20-22.
86. Калинин Б.Д., Плотников Р.И., Речинский А.А. Применение рентгеновской спектрометрии для идентификации органических соединений и материалов // Аналитика и контроль. 2011. Т. 15, № 1. С. 56-63
87. Родинков О.В., Калинин Б.Д., Плотников Р.И., Речинский А.А. Способ рентгеноспектрального определения водорода, углерода и кислорода в органических соединениях и устройство для определения водорода, углерода и кислорода в органических соединениях // Патент РФ на изобретение №2426104. Заявка 2010121314/28 27 мая 2010 г.; опубл. 10 августа 2011 г. Бюллетень «Изобретения, полезные модели» № 22.
88. Калинин Б.Д., Плотников Р.И., Речинский А.А. К возможности определения состава органических соединений по интенсивности рассеянного рентгеновского излучения // Аналитика и контроль. 2011. Т. 15, № 2. С. 163-169.
89. Родинков О.В., Калинин Б.Д., Руднев А.В. Рентгено-спектральный способ определения содержания углерода в сталях и устройство для определения содержания углерода в сталях // Патент РФ на изобретение №2427825. Заявка. № 2010111009 24 марта 2010 г.; опубл. 27 августа 2011 г. Бюллетень «Изобретения, полезные модели» № 24.
90. Калинин Б.Д., Руднев А.В. Эффекты дифракции в рентгенофлуоресцентном анализе и использование их в аналитических целях // Аналитика и контроль. 2011. Т. 15, № 3. С. 332-338.
91. Brytov I.A., Plotnikov R.I., Kalinin B.D. Usability of portable X-ray spectrometer for discrimination of valence states // Advances in X-ray Analysis, 2002. V. 45, P. 409-414.
92. Калинин Б.Д., Плотников Р.И., Костиков Ю.П. К возможности использования портативного рентгеновского спектрометра СПАРК-1М для исследования химической связи // Журнал прикладной химии. 2001. Т. 74, Вып.11. С. 1825-1828.
93. Калинин Б.Д., Плотников Р.И. Рассеяние флуоресцентного рентгеновского излучения в веществе // Аналитика и контроль. 2013. Т. 17, № 4. С. 382-385.
94. Эффект аномальной дисперсии и его проявление в спектрах резонансно рассеянного гамма – и рентгеновского излучения полупроводникового детектора / Г.А. Пшеничный [и др.] // Вестник ЛГУ. 1982. № 24. С. 33-34.
95. Пшеничный Г.А. Резонансное (рамановское) комбинационное рассеяние рентгеновских лучей и элементно-фазовый анализ вещества // Аппаратура и методы рентгеновского анализа. Л., Машиностроение. 1988. Вып. 37. С. 24-55.
96. Бахтияров А.В. Рентгенофлуоресцентный анализ с использованием рассеянного излучения // Заводская лаборатория. 2009. Т. 75, № 9. С. 3-11.
97. Мосичев В.И. Першин Н.В., Николаев Г.И., Ковалева Н.Б. Теоретический учет межэлементных влияний на основе нового градуировочного уравнения связи // Заводская лаборатория. 1981. Т. 47, № 6. С. 41-48.
98. Перспективы применения количественного рентгенофлуоресцентного анализа в атомной энергетике. Существующие решения и новые разработки / С.В. Бешта [и др.] // Материалы пятого научно-технического совещания «Проблемы и перспективы развития химического и радиохимического контроля в ядерной энергетике» (Атомэнергоаналитика-2009). 22-24 сентября 2009 года, г. Сосновый Бор Ленинградской области. Сборник докладов. - СПб.: ВВМ, 2009. С. 431-473.
99. Бахтияров А.В., Чернобережская С.А. Коэффициенты рассеяния рентгеновских лучей // Аппаратура и методы рентгеновского анализа. Л., Машиностроение. 1972. Вып. 11. С. 2004-218.
100. Пшеничный Г.А. Взаимодействие излучений с веществом и моделирование задач ядерной геофизики. М.: Энергоиздат, 1982. 222 с.
101. Marenkov O.S., Komyak N.I. Handbook of photon coefficients in radioisotope-excited X-Ray fluorescence analysis. New York: Nova Science Publishers, 1991. 222 p.
102. Marenkov O.S. Handbook of Partial Attenuation Coefficients of Characteristic X-ray Radiation. New York: Nova Science Publishers, 1994. 316 p.
103. Савельев С.К., Плотников Р.И., Федоров С.И. Моделирование энергодисперсионного рентгеновского спектрометра в вычислительной среде X-Energo // Оптика и спектроскопия. 1995. Т. 78, №1. С. 174-176.

## REFERENCES

1. *Istoricheskii obzor. Otkrytie rentgenovskikh luchej. [Historical review. Discovery of X-rays]*. Available at: [https://studme.org/251883/matematika\\_himiya\\_fizik/istoricheskiy\\_obzor](https://studme.org/251883/matematika_himiya_fizik/istoricheskiy_obzor) (Accessed July 2020) (in Russian).
2. Röntgen W.C. Ueber eine neue Art von Strahlen. *Aus den Sitzungsberichten der Würzburger Physik.-medic. Gesellschaft, Würzburg*, 1895, pp. 132. Available at: [https://roentgenmuseum.de/cool\\_timeline/eine-neue-art-von-strahlen/](https://roentgenmuseum.de/cool_timeline/eine-neue-art-von-strahlen/) (Accessed August 2020).
3. Röntgen W.C. *O novom rode luchej [About a new kind of rays]*. Moscow. GTTI, 1933. 123 p. (in Russian).
4. Frankel V.Y. [Double Jubilee: 150th Anniversary of the Birth of William Conrad Röntgen (1995) and the 100th Anniversary of the Publication of the X-Ray Discovery Article (1996)]. *Fizika tverdogo tela [Solid-body physics]*, 1996, vol. 38, no. 9, pp. 2609-2630 (in Russian).
5. Nikiforov I.Y. *Tvortsy fizicheskikh nauk [Creators of Physical Sciences]*. Rostov n/D, «Feniks», 2009. 445 p. (in Russian).

6. *Istoriia otkrytiia rentgenovskogo izlucheniia [History of X-ray discovery]*. Available at: <https://zen.yandex.ru/media/id/5e0b0b4098fe7900b03145d6/istoriia-otkrytiia-rentgenovskogo-izlucheniia-5e0cf98d11691d00ae96b217> (Accessed July 2020) (in Russian).
7. *Pjukkan, Julius [Pjukkan, Julius]* Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BB%D1%8E%D0%BA%D0%BA%D0%B5%D1%80,%D0%AE%D0%BB%D0%B8%D1%83%D1%81> (Accessed July 2020) (in Russian).
8. Bernatosian S.G. *Vorovstvo i obman v nauke (Serija «Nauka s chernogo hoda» [Stealing and deception in science (Science from the Back door series)]*. St. Petersburg, "Erudite", 1998. 384 p. (in Russian).
9. Revenko A.G. [125 years since the discovery of X-rays]. *Analitika i kontrol [Analytics and control]*, 2020, vol. 24, no. 1, p. 66–79 (in Russian).
10. *RNTsRKhT im. ak. A. M. Granova [RNCRHT them. Ak. A. M. Granova]* Available at: [http://wikiredia.ru/wiki/Russian Science Center for Radiology and Surgical Technology](http://wikiredia.ru/wiki/Russian%20Science%20Center%20for%20Radiology%20and%20Surgical%20Technology) (Accessed July 2020) (in Russian).
11. *Ioffe, Abram Fedorovich [Abram Ioffe]*. Available at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Ioffe,\\_Abram\\_Fedorovich](https://ru.wikipedia.org/wiki/Ioffe,_Abram_Fedorovich) (Accessed July 2020) (in Russian).
12. *Seliakov Nikolai Iakovlevich* Available at: <https://www.booksite.ru/fulltext/ime/nav/olo/gzh/an/3.htm> (Accessed August 2020) (in Russian).
13. Elistratov A.M., Efimov O.N. [Effect of frequency disorders on the effect of abnormal X-rays]. *Fizika tverdogo tela [Solid physics]*, 1962. vol. 4, no. 9, pp. 2397-2410 (in Russian).
14. *Kafedra elektroniki tverdogo tela v Sankt-Peterburgskom universitete (k 80-letiiu kafedry); pod redakciei A.S. Shulakova» [Department of Solid Electronics at the University of St. Petersburg (for the 80th anniversary of the department); edited by A.S. Shulakov]*. St. Petersburg, Publishing House St. Petersburg universities, 2012. 278 p. (in Russian).
15. *Lukirskii Petr Ivanovich [Piotr Lukirsky]*. Available at: <http://pomnipro.ru/memorypage1057/biography> (Accessed July 2020) (in Russian).
16. *Filatova E.O. [Ultrasoft X-ray spectroscopy]*. Available at: <https://phys.spbu.ru/content/File/ESS/ultramyagkayarentgenovskaya.htm> (Accessed July 2020) (in Russian).
17. Andreeva M.A., Gitzovich V.N., Irkaev S.M., Semenov V.G. [Coherent Messbauer Surface Reflexometry]. *Izv. Akademii nauk, seriia fizicheskaja [News academy of sciences, series of physical]*, 1998, vol. 62, no. 2, pp. 406-417 (in Russian).
18. Fursei G.N., Vorontsov-Velyaminov P.N. [High-quality model of initiating a vacuum arc]. *Zhurnal tehnicheckoi fiziki [Journal of Technical Physics]*, 1967, vol. 7, no. 10, pp. 1870-1888 (in Russian).
19. Komyak N.I. [50th Anniversary of National X-Ray Engineering]. *Apparatura i metody rentgenovskogo analiza [Equipment and methods of X-ray analysis]*. L., Mechanical Engineering Publ., 1980, vol. 24, pp. 4-12 (in Russian).
20. 50 let nauchno-proizvodstvennomu predpriiatiiu «Burevestnik». *Istoriia sozdaniia i osnovnye etapy deiatel'nosti; pod redaktsiei Dibnera S.V. [50 years of scientific and production company "Burevestnik." The history of creation and the main stages of activity; edited by Dibner S.V.]*. St. Petersburg, Alex4studio, 2009. 91 p. (in Russian).
21. *Priboostroenie – XX vek. Sost. Shkabardniia M.S. [Instrumentation is the 20th century. Sost. M.S. Shkabardna]*. Moscow, Top Secret, 2004. 768 p. (in Russian).
22. Brytov I.A. [Nikolai Komyak, organizer of national X-ray instrumentation, scientist and man (for the 90th anniversary)]. *Nauchnoe priboostroenie [Scientific instrumentation]*, 2018, vol. 28, no 4, pp. 21-23 (in Russian).
23. [Igor Brytov (To the 80th anniversary of his birth)]. *Zhurnal analiticheskoi himii [Journal of Analytical Chemistry]*, 2018, vol. 73, no. 10, p. 88-89 (in Russian).
24. Anisovich K.V., Komyak N.I. *Fluorescentnyi rentgenovskii spektrometr [Fluorescent X-ray spectrometer]*. Avtorskoe svidetel'stvo USSR, no. 614367, 1978 (in Russian).
25. Anisovich K.V. [Highly sensitive X-ray equipment based on low-power sources of primary radiation (Review)]. *Zavodskaiia laboratorii. Diagnostika materialov [Industrial laboratory. Diagnostics of materials]*, 1982, vol. 48, no. 9, pp. 2-38 (in Russian).
26. Kalinin B.D., Plotnikov R.I., Podvalnyi Ya.A. [X-ray spectral analysis of steels and alloys]. *Zavodskaiia laboratorii. Diagnostika materialov [Industrial laboratory. Diagnostics of materials]*, 1993, vol. 59, no. 9, pp. 16-20 (in Russian).
27. Lenin S.S., Serikov I.V., Kaplunovich H.S., Shaenzon V.I., Stolin V.I., Shmidova N.F., Reshetihin Yu.N., Girshin D.S. [Fluorescent X-ray analyzer type FRA-4]. *Apparatura i metody rentgenovskogo analiza [Equipment and methods of X-ray analysis]*. L., Mechanical Engineering Publ., 1970, vol. 6, pp. 187-192 (in Russian).
28. Goganov A.D., Kalinin B.D., Plotnikov R.I. [Definition of small uranium content on X-ray fluorescent analyzer]. *Tez. dokl. VII Vserossiiskoi konferentsii po rentgenospektral'nomu analizu [Tez. docly. VII All-Russian Conference on X-Ray Spectral Analysis]*. Novosibirsk, 2011, p. 34 (in Russian).
29. Komyak N.I., Mezhevich A.N., Nikolaev V.P., Plotnikov R.I., Reshetinin J.N., Rogachev I.M., Stolin V.I., Tatkin L.S., Shaenzon V.I. [Automatic X-ray quantometer KRF-13 for analysis of pulp in the stream] *Apparatura i metody rentgenovskogo analiza [Equipment and methods of X-ray analysis]*. L., Mechanical Engineering Publ., 1974, vol. 15, pp. 112-119 (in Russian).
30. Anisovich K.V., Buman A.I. [Crystal-diffraction spectrometer with monochromatite stimulation fluorescence]. *Apparatura i metody rentgenovskogo analiza [Equipment and methods of X-ray analysis]*. L., Mechanical Engineering Publ., 1975, vol. 17, pp. 82-86 (in Russian).
31. Anisovich K.V., Buman A.I. [X-ray spectrometer with crystal - monochromator for quantitative analysis]. *Apparatura i metody rentgenovskogo analiza [Equipment and methods of X-ray analysis]*. L., Mechanical Engineering Publ., 1975, vol. 17, pp. 87-90 (in Russian).
32. Plotnikov R.I., Pshenichnyi G.A. *Fluorescentnyi rentgenoradiometricheskii analiz [Fluorescent X-ray radiographic analysis]*. Moscow, Atomizdat, 1973. 264 p. (in Russian).
33. Anisovich K.V., Komyak N.I. *Detektor rentgenovskogo izlucheniia [X-ray detector]*. Avtorskoe svidetel'stvo USSR, no. 246697, 1973 (in Russian).
34. Anisovich K.V., Komyak N.I. [Narrowband X-ray detector]. *Pribory i tekhnika eksperimenta [The instruments and techniques of the experiment]*, 1975, no. 2, pp. 216-218 (in Russian).
35. [In memory of Dmitry Goganov]. *Analitika i kontrol [Analytics and control]*, 2020, vol. 24, no. 2, pp. 152-157 (in Russian).
36. *Meier Vladimir Aleksandrovich [Vladimir Meyer]*. Available at: <http://faces.mukcgb.ru/Faces/Details/b7b3a9f9-95d4-4c74-aed5-cfe47a971015> (Accessed July 2020) (in Russian).
37. Meyer I.A., Vaganov P.A. *Osnovy iadernoi geofiziki [The Basics of Nuclear Geophysics]*. St. Petersburg, Publishing House St. Petersburg universities, 1985. 407 p. (in Russian).
38. *Leman Evgenii Pavlovich [Lehman Evgeny]*. Available at: <http://geolraz.com/page/LEMAN-E-P> (Accessed July 2020) (in Russian).
39. *Ochkur Aleksandr Petrovich [Aleksandr Ochkar]*. Available at: <http://geolraz.com/page/OChKUR-A-P/> (Accessed July 2020) (in Russian).

40. Sokolov Mikhail Matveevich [Mikhail Sokolov]. Available at: <http://geolraz.com/page/Sokolov-MM/> (Accessed July 2020) (in Russian).
41. Sumbaev Oleg Igorevich [Oleg Sumbayev]. Available at: <http://nrd.pnpi.spb.ru/directora/sumb.html> (Accessed July 2020) (in Russian).
42. Khusainov Abdurakhman Khusainovich [Abdurakhman Husainov]. Available at: <http://dbserv.pnpi.spb.ru/ioc/ioc/line0434/n6.htm> (Accessed July 2020) (in Russian).
43. Svetlana (kompaniia) [Svetlana (company)]. Available at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Svetlana\\_\(company\)#cite\\_note-3](https://ru.wikipedia.org/wiki/Svetlana_(company)#cite_note-3) (Accessed July 2020) (in Russian).
44. Bystrov Ju.A. *Vzgliad skvoz' gody [A look through the years]*. St. Petersburg, Publishing house STBGETU "LETI", 2008. 316 p. (in Russian).
45. Sait AO «Svetlana-Rentgen» [Svetlana-Roentgen website]. Available at: <http://www.svetlana-x-ray.ru/about.html> (Accessed July 2020) (in Russian).
46. Sait NIPK «Elektron» [NIPK "Electron" website]. Available at: <https://electronxray.com/> (Accessed July 2020) (in Russian).
47. Potrakhov N.N., Podymskii A.A., Kulikov N.A. [New-generation X-ray tubes manufactured by Svetlana-Rentgen, used in medical technology]. Available at: <http://docplayer.ru/28984581-Rentgenovskie-trubki-novogo-pokoleniya-proizvodstva-zao-svetlana-rentgen.html> (Accessed July 2020) (in Russian).
48. Sait AO ITs «Burevestnik» [Website of the "Burevestnik"]. Available at: <https://www.bourestnik.ru> (Accessed July 2020) (in Russian).
49. Sait NPO «Spektron» [The website of the NGO "Spectron"]. Available at: <https://spectronxray.ru/> (Accessed July 2020) (in Russian).
50. Sait OOO «Spektroflash» [The website of the Spectroflash Ltd.]. Available at: <https://www.spectroflash.ru/> (Accessed July 2020) (in Russian).
51. Sait OOO «Radikon» [Radikon Ltd. website]. Available at: [www.radikon.spb.ru](http://www.radikon.spb.ru) (Accessed July 2020) (in Russian).
52. Sait «Elion», OOO [Elion website, Ltd.]. Available at: <https://elion.all.biz/> (Accessed July 2020) (in Russian).
53. Sait ZAO «Komita» [Komita website]. Available at: <http://www.x-art.comita.ru/> (Accessed July 2020) (in Russian).
54. Nezamenimyi muzeinyi ekspert [Irreplaceable museum expert]. Available at: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=print&sid=418> (Accessed July 2020) (in Russian).
55. Sait AO «Nauchnye pribory» [Science Devices website]. Available at: <https://www.sinstr.ru/products/analytics/> (Accessed July 2020) (in Russian).
56. Sait NPO «RIVS» [The website of the NGO "RIVS"]. Available at: <http://www.rivs.ru/> (Accessed July 2020) (in Russian).
57. Bondarenko A.V., Nikanderov I.S., Andreev D.S. [Features of building branded ASAK-RIVS for mining and processing enterprises]. *Gornyi zhurnal [Mountain Magazine]*, 2016, no. 11, pp. 71-74 (in Russian).
58. Sait AO «Svetlana-Rentgen» [Svetlana-Roentgen website]. Available at: <http://www.svetlana-x-ray.ru/> (Accessed July 2020) (in Russian).
59. Lukyanchenko E.M., Yegorov V.K., Rudenko V.N., Yegorov E.V. [RFA in the geometry of full external reflection in the scheme with a wave-resonator (RFA AIR) as a new method of research]. *Tez. dokl. III Vseros. konf. po analiticheskoy spektroskopii [Tez. docl. III Vseros. Conf. analytical spectroscopy]*. Krasnodar, 2019, p. 139 (in Russian).
60. Kalinin B.D. [Memory of the Scientist]. *Analitika i kontrol' [Analytics and control]*, 2016, vol. 20, no. 2, pp. 175-183 (in Russian). DOI: 10.15826/analitika.2016.20.2.006
61. Gurvich Y.M., Kalinin B.D., Mezhevich A.N., Plotnikov R.I., Rogachev I.M., Serbin A.Y. [Application of the method of multiple regression in X-ray spectral analysis]. *Apparatura i metody rentgenovskogo analiza [Equipment and methods of X-ray analysis]*. L., Mechanical Engineering Publ., 1974, vol. 13, pp. 122-128 (in Russian).
62. Revenko A.G., Velichko J.I., Kalinin B.D., Popov N.V., Pavlinsky G.V., Plotnikov R.I. [Accounting of mutual influences of elements in X-ray spectral analysis of doped steels]. *Zavodskaya laboratoria. Diagnostika materialov [Industrial laboratory. Diagnostics of materials]*, 1974, vol. 40, no. 6, pp. 15-19 (in Russian).
63. Gurvich J.M., Mezhevich A.N., Plotnikov R.I., Rogachev I.M. [Using solid models in the development of X-ray spectral analysis techniques in the stream]. *Apparatura i metody rentgenovskogo analiza [Equipment and methods of X-ray analysis]*. L., Mechanical Engineering Publ., 1974, vol. 14, pp. 53-59 (in Russian).
64. Serbin A.Y., Plotnikov R.I. [Application of step-by-step method of finding optimal forms of regression equations in X-ray spectral analysis]. *Apparatura i metody rentgenovskogo analiza [Equipment and methods of X-ray analysis]*. L., Mechanical Engineering Publ., 1974, vol. 17, pp. 151-155 (in Russian).
65. Kalinin B.D., Plotnikov R.I., Fedorova L.M. [To the justification of the method of theoretical amendments in X-ray spectral analysis]. *Zavodskaya laboratoria. Diagnostika materialov [Industrial laboratory. Diagnostics of materials]*, 1980, vol. 46, no. 6, pp. 505-507 (in Russian).
66. Kalinin B.D., Plotnikov R.I. [Separate accounting of the effects of absorption and selective arousal in the method of theoretical amendments in X-ray spectral analysis]. *Zavodskaya laboratoria. Diagnostika materialov [Industrial laboratory. Diagnostics of materials]*, 1981, vol. 47, no. 9, pp. 53-56 (in Russian).
67. Kalinin B.D., Karamyshev N.I., Plotnikov R.I., Vershinin A.S. [Accounting for changes in effective wavelength in X-ray spectral analysis in the way of theoretical amendments]. *Zavodskaya laboratoria. Diagnostika materialov [Industrial laboratory. Diagnostics of materials]*, 1985, vol. 51, no. 8, pp. 25-27 (in Russian).
68. Kalinin B.D., Plotnikov R.I. [Development of the way of equations of communication with theoretical coefficients in X-ray fluorescent analysis]. *Zavodskaya laboratoria. Diagnostika materialov [Industrial laboratory. Diagnostics of materials]*, 2008, vol. 74, no. 3, pp. 19-24 (in Russian).
69. Kalinin B.D., Plotnikov R.I. [Ways to build communication equations in quantitative X-ray fluorescent analysis based on theoretical influence ratios]. *Zavodskaya laboratoria. Diagnostika materialov [Industrial laboratory. Diagnostics of materials]*, 2009, vol. 75, no. 7, pp. 16-20 (in Russian).
70. I.I. Velichko, Revenko A.G. [Quantitative assessment of the influence of certain factors on the results of calculation of the intensity of the X-ray spectrum fluorescence]. *Issledovaniia v oblasti fiziki tverdogo tela [Research in solid physics]*. Irkutsk, IGU, 1974, vol. 2, pp. 204-211 (in Russian).
71. Kalinin B.D., Plotnikov R.I., Sergeyev J.I. [Effect of uncertainty of the conditions of arousal on the error of the method of fundamental parameters in X-ray fluorescent analysis]. *Zavodskaya laboratoria. Diagnostika materialov [Industrial laboratory. Diagnostics of materials]*, 2010, vol. 76, no. 2, pp. 15-17 (in Russian).
72. Dudik S.L., Kalinin B.D., Rudnev A.V., Sergeyev J.I. [Analysis of steels and alloys on X-ray spectrometers of the spectrometer

- series "SPECTROSKAN-MAKS"]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov [Industrial laboratory. Diagnostics of materials]*, 2014, vol. 80, no. 1, pp. 19-26 (in Russian).
73. Kalinin B.D., Smyslov A.A. [X-ray fluorescent definition of the main rock-forming components of iron-marching nodules]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov [Industrial laboratory. Diagnostics of materials]*, 2006, vol. 72, no. 6, pp. 17-20 (in Russian).
74. Kotlyarov Ya.B., Plotnikov R.I. [Correcting matrix effects in X-ray spectral analysis using differential influences]. *Zhurnal analiticheskoy khimii [Journal of Analytical Chemistry]*, 1983, vol. 38, no 3, pp. 517-539. (in Russian).
75. Kalinin B.D., Plotnikov R.I., Toktareva E.G. [Instrumental error X-ray spectral analysis of steel products]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov [Industrial laboratory. Diagnostics of materials]*, 1982, vol. 48, no. 12, pp. 26-28 (in Russian).
76. Afonin V.P., Komyak N.I., Nikolaev V.P., Plotnikov R.I. *Fliuorestantsnyy analiz [X-ray fluorescent analysis]*. Novosibirsk: Science. Sib. edd, 1991. 173 p. (in Russian).
77. Yafyasov A.M., Kalinin B.D., Plotnikov R.I. *Sposob rentgenofluorescentnogo opredeleniya primesei v konstruktsionnykh materialakh [The way X-ray fluorescent identification of impurities in structural materials]*. Patent RF, no. 2584064, 2016 (in Russian).
78. Kalinin B.D., Plotnikov R.I. [X-ray fluorescent definition of doping and impurity elements in homogeneous materials in the absence of adequate grade samples]. *Analitika i kontrol [Analytical and control]*, 2010, vol. 14, no. 4, pp. 236-242 (in Russian).
79. Kalinin B.D. [X-ray fluorescent definition of the content of the element in multi-component samples]. *Analitika i kontrol [Analytical and control]*, 2019, vol. 23, no. 4, pp. 476-482 (in Russian). DOI: 10.15826/analitika.2019.23.4.006
80. Kalinin B.D., Saveliev S.K., Sergeev J.I. [Priority assessment of metrological characteristics of X-ray fluorescent definitions of elements and reduction of the size of intercellentary influences in dilution of samples]. *Analitika i kontrol [Analytical and control]*, 2020, vol. 24, no. 1, pp. 6-14 (in Russian). DOI: 10.15826/analitika.2020.24.1.006
81. Kalinin B.D., Plotnikov R.I. [Use of a portable X-ray spectrometer SPARK-1M for analysis of steels and alloys]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov [Industrial laboratory. Diagnostics of materials]*, 1998, vol. 64, no. 9, pp. 29-32 (in Russian).
82. Kalinin B.D. [Implementation of the method of semi-quantitative analysis on X-ray spectrometers of the series Spectroscan, BRA, SRM]. *Tezisy dokladov Tre't'ego s'ezda analitikov Rossii [Theses of the reports of the Third Congress of Analysts of Russia]*. Moscow, 2017, p. 129 (in Russian).
83. Gorsky Yu.I., Plotnikov R.I. [Statistical error of intensity adjustment in X-ray spectral analysis when accounting for instrument drift on control samples]. *Apparatura i metody rentgenovskogo analiza [Equipment and methods of X-ray analysis]*. L., Mechanical Engineering Publ., 1981, vol. 25, pp. 202-204 (in Russian).
84. Yafyasov A.M., Kalinin B.D., Plotnikov R.I. *Sposob graduirovki partii rentgenovskikh spektrometrov [The way to graduate a batch of X-ray spectrometers]*. Patent RF, no. 2584065, 2016 (in Russian).
85. Kalinin B.D., Karamyshev N.I., Plotnikov R.I. [Multichannel X-ray spectrometer software]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov [Industrial laboratory. Diagnostics of materials]*, 1993, vol. 59, no. 11, pp. 20-22 (in Russian).
86. Kalinin B.D., Plotnikov R.I., Rechinsky A.A. [Use of X-ray spectrometry to identify organic compounds and materials]. *Analitika i kontrol [Analytical and control]*, 2011, vol. 15, no. 1, pp. 56-63 (in Russian).
87. Rodinkov O.V., Kalinin B.D., Plotnikov R.I., Rechinsky A.A. *Sposob rentgenospektral'nogo opredeleniya vodoroda, ugleroda i kisloroda v organicheskikh soedineniyakh i ustroystvo dlia opredeleniya vodoroda, ugleroda i kisloroda v organicheskikh soedineniyakh [The X-ray spectral definition of hydrogen, carbon and oxygen in organic compounds and a device to determine hydrogen, carbon and oxygen in organic compounds]*. Patent RF, no. 2426104, 2011 (in Russian).
88. Kalinin B.D., Plotnikov R.I., Rechinsky A.A. [To the possibility of determining the composition of organic compounds by the intensity of scattered X-ray radiation]. *Analitika i kontrol [Analytical and control]*, 2011, vol. 15, no. 2, pp. 163-169 (in Russian).
89. Rodinkov O.V., Kalinin B.D., Rudnev A.V. *Rentgenospektral'nyi sposob opredeleniya sodержaniya ugleroda v staliakh i ustroystvo dlia opredeleniya sodержaniya ugleroda v staliakh [X-ray spectral way of determining carbon content in steels and a device for determining the carbon content in steels]*. Patent RF, no. 2427825, 2011 (in Russian).
90. Kalinin B.D., Rudnev A.V. [Effects of diffraction in X-ray fluorescent analysis and use of them for analytical purposes]. *Analitika i kontrol [Analytical and control]*, 2011, vol. 15, no. 3, pp. 332-338 (in Russian).
91. Brytov I.A., Plotnikov R.I., Kalinin B.D. Usability of portable X-ray spectrometer for discrimination of valence states. *Advances in X-ray Analysis*, 2002, vol. 45, pp. 409-414.
92. Kalinin B.D., Plotnikov R.I., Kostikov J.P. [To the possibility of using a portable X-ray spectrometer SPARK-1M for chemical communication research]. *Zhurnal prikladnoi khimii [Journal of Applied Chemistry]*, 2001, vol. 74, no. 11, pp. 1825-1828 (in Russian).
93. Kalinin B.D., Plotnikov R.I. [Scattering fluorescent X-ray radiation in matter]. *Analitika i kontrol [Analytical and control]*, 2013, vol. 17, no. 4, pp. 382-385 (in Russian).
94. Pshenichnyy G.A., Meyer V.A., Kadochnikov A.N., Bakhtiarov A.V., Shchukovsky A.N. [Effect of abnormal variance and its manifestation in the spectrums of resonantly absent-minded gamma - and X-ray radiation of the semiconductor detector]. *Vestnik LGU [LSU Herald]*, 1982, no. 24, pp. 33-34 (in Russian).
95. Pshenichnyy G.A. [Resonant (Raman) combination scattering of X-rays and elemental-phase analysis of matter]. *Apparatura i metody rentgenovskogo analiza, [Equipment and methods of X-ray analysis]*. L., Mechanical Engineering Publ., 1988, vol. 37, pp. 24-55 (in Russian).
96. Bakhtiarov A.V. [X-ray fluorescent analysis using scattered radiation]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov [Industrial laboratory. Diagnostics of materials]*. 2009. vol. 75, no. 9. pp. 3-11. (in Russian).
97. Mosichev V.I., Pershin N.V., Nikolaev G.I., Kovaleva N.B. [Theoretical accounting of inter-elemental influences based on the new graduation equation of communication]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov [Industrial laboratory. Diagnostics of materials]*, 1981, vol. 47, no. 6, pp. 41-48 (in Russian).
98. Beshta S.V., Vitol S.A., Kalinin B.D., Mosichev V.I., Plotnikov R.I., Sergeev J.I. [Prospects for the use of quantitative X-ray fluorescent analysis in nuclear power. Existing solutions and new developments]. *Materialy piatogo nauchno-tehnicheskogo soveshchaniya «Problemy i perspektivy razvitiya khimicheskogo i radiokhimicheskogo kontrolya v iadernoi energetike» (Atomenergoanalitika-2009)*. [Materials of the fifth scientific and technical meeting "Problems and prospects for the development of chemical and radiochemical con-

- trol in nuclear power" (Atomenergoanalyst-2009)]. St. Petersburg, 2009, pp. 431-473 (in Russian).*
99. Bakhtiarov A.V., Chernoberezhskaya S.A. [X-ray scattering rates]. *Apparatura i metody rentgenovskogo analiza [X-ray equipment and techniques]*. L., Mechanical Engineering Publ., 1972, vol. 11, pp. 204-218 (in Russian).
100. Pshenichnyy G.A. *Vzaimodeistvie izlucheni s veshchestvom i modelirovanie zadach iadernoi geofiziki [Interaction of radiation with matter and modeling of nuclear geophysics tasks]*. M.: Energizdat, 1982. 222 p. (in Russian).
101. Marenkov O.S., Komyak N.I. Handbook of photon coefficients in radioisotope-excited X-Ray fluorescence analysis. New York: Nova Science Publishers, 1991. 222 p.
102. Marenkov O.S. Handbook of Partial Attenuation Coefficients of Characteristic X-ray Radiation. New York: Nova Science Publishers, 1994. 316 p.
103. Saveliev S.K., Plotnikov R.I., Fedorov S.I. [Modeling of the energy dispersion X-ray spectrometer in the X-Energo computing environment]. *Optika i spektroskopiia [Optics and spectroscopy]*, 1995, vol. 78, no. 1, pp. 174-176 (in Russian).