

П-889.

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

14-85-904

УДК 543.426  
539.125.4  
539.128.4

**ПУРЭВ**  
**Агваанчултэмийн**

**РЕНТГЕНОСПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**  
**НА ПУЧКАХ УСКОРЕННЫХ ПРОТОНОВ**  
**И ИОНОВ ГЕЛИЯ-4**  
**ПРИ ЭНЕРГИЯХ ДО 4 МэВ**

Специальность 01.04.16-физика атомного ядра  
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Дубна 1985

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики Объединенного института ядерных исследований, Дубна

**Научные руководители:**

доктор физико-математических наук,  
профессор  
кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник

Д. Чулган

Г. М. Осетинский

**Официальные оппоненты:**

доктор химических наук,  
старший научный сотрудник  
кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник

Р. Л. Баринский

А. Н. Ерштенко

Ведущее предприятие: Ростовский орден Трудового Красного Знамени  
государственный университет им. М. А. Суслова

Защита диссертации состоится " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1986 года  
в " \_\_\_\_\_ " час. на заседании специализированного совета Д 047.01.05  
при Лаборатории нейтронной физики и Лаборатории ядерных реакций  
Объединенного института ядерных исследований (г. Дубна, Московская  
область).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ  
Автореферат разослан " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1985 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета

Д. В. Таран

**ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

Актуальность темы. Определение состава макро- и микроэлементов в природных объектах геологического и биологического происхождения, соблюдение современных технологий получения сверхчистых материалов для народного хозяйства и науки, контроль окружающей среды невозможны без разработки и внедрения в практику новых, наиболее высокочувствительных методов элементного анализа. В настоящее время значительное развитие получили ядерно-физические методы анализа веществ и, в частности, метод анализа, основанный на измерении характеристического рентгеновского излучения (ХРИ), возбуждаемого ускоренными заряженными частицами. Этот метод позволяет определять одновременно концентрации десятков элементов, причем минимальное определяемое количество элемента в исследуемой пробе доходит до  $10^{-12}$  г

В последнее время интенсивно ведутся исследования аналитических возможностей рентгенофлуоресцентного анализа с протонным возбуждением и показана его большая эффективность. Вместе с тем для его использования в практических целях весьма полезно дальнейшее совершенствование методики элементного анализа на тонких и массивных мишенях, повышение чувствительности, точности и экспрессности метода и проведение автоматизации измерений. Все это представляет практический, а в некоторых случаях и теоретический интерес, что и определяет важность и актуальность темы диссертационной работы.

Цель и основные задачи работы:

1. Создать экспериментальную установку для рентгенофлуоресцентного анализа на заряженных частицах, позволяющую решать широкий круг научно-прикладных задач.
2. Разработать высокочувствительную методику определения элементного состава тонких и массивных образцов, основанную на измерении характеристического рентгеновского излучения, возбуждаемого ускоренными протонами и ионами  $^4\text{He}$ .
3. Выполнить многоэлементный анализ различных образцов сложного химического состава, используя разработанную методику.

Научная новизна:

1. Создана специализированная установка и разработана конкретная методика элементного анализа по характеристическому рентгеновскому излучению, возбуждаемому ускоренными протонами и ионами  $^4\text{He}$ , на тонких и массивных мишенях. Показано, что эта методика с успехом может применяться для определения элементов с  $Z \geq 13$ .
2. Определены оптимальные условия проведения анализа и гео-

метрия опыта. Исследована применимость электростатического ускорителя для решения прикладных аналитических задач.

3. Составлены программы расчетов для определения элементного состава в массивных мишенях.

4. Измерены сечения ХРИ, возбуждаемого протонами и ионами  $^4\text{He}$ , в интервале энергии ускорения  $1,5 \div 3,8$  МэВ для элементов  $22 \leq Z \leq 83$ .

5. Систематизированы опубликованные экспериментальные данные по сечениям выхода ХРИ элементов.

6. Выполнен многоэлементный анализ различных образцов сложного химического состава, имеющих большое научно-техническое и народнохозяйственное значение.

**Практическая ценность.** Созданная экспериментальная установка и разработанная конкретная методика элементного анализа показывает перспективность применения их для определения элементного и микроэлементного состава различных образцов.

Полученные экспериментальные результаты по сечениям выхода ХРИ элементов, возбуждаемого протонами и ионами гелия-4, в совокупности с существующими литературными данными обеспечивают экспериментальный и теоретический фундамент для определения элементного состава веществ в тонких и массивных мишенях. Ценность настоящей диссертации определяется еще и тем, что в ней разработан практический метод определения элементного состава массивных образцов, при котором не требуется применения внешних и внутренних стандартов, а используются данные по сечениям выхода ХРИ элементов при ионном возбуждении, эффективность регистрации  $\epsilon_i$  и коэффициенты поглощения ХРИ  $\mu_i$ .

Результаты использования разработанной методики непосредственно связаны с решением научных и народнохозяйственных задач. Они использовались при выполнении хозяйственных научно-исследовательских работ, заключенных ОИЯИ с различными предприятиями Советского Союза, а также работ, выполненных по протоколам о научно-техническом сотрудничестве со странами-участницами ОИЯИ (СССР, ПНР, МНР).

**Апробация работы.** Результаты работ докладывались и обсуждались на научных семинарах Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ, на III Всесоюзном совещании по использованию ядерных методов исследования в народном хозяйстве (1978 г., Ташкент); III Совещании по использованию новых ядерно-физических методов для решения научно-технических и народнохозяйственных задач (1978 г., Дубна); I и II Всесоюзных совещаниях "Ядерно-физические методы анализа в контроле окружающей среды" (1979 г., Ташкент; 1982 г., Рига); XIV Всесоюзном совещании по рентгеновской и электронной спектроскопии (1984 г., Иркутск).

**Публикации.** Содержание работы опубликовано в 9 препринтах и сообщениях ОИЯИ и в двух статьях в журналах: "Атомная энергия", "Заводская лаборатория".

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем диссертации 147 страниц, в том числе 16 таблиц, 30 рисунков. Список литературы включает 105 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулирована цель работы, обсуждено ее научное и прикладное значение и приведено краткое содержание диссертации по главам.

**В первой главе** дан обзор литературы по методу возбуждения характеристического рентгеновского излучения элементов, кратко рассмотрены физические основы метода рентгенофлуоресцентного анализа с возбуждением ускоренными ионами (ИРФА).

**Во второй главе** изложена постановка задачи, описаны конструктивные особенности камеры облучения и блок-схемы электроники для измерения энергетических спектров ХРИ от исследуемых элементов. Приведена методика определения эффективности регистрации полупроводникового детектора. Рассмотрены методы приготовления тонких и массивных мишеней и условия использования различных фильтров.

Конструкция установки изображена на рис. 1, 2. Пучок ускоренных ионов от электростатического ускорителя, пройдя ряд диафрагм 3 (а, б, в, г), попадает на изолированную многопозиционную мишень. Для равномерного распределения тока на мишени пучок расфокусировался модуляционным устройством, состоящим из двух взаимно перпендикулярных пластин, на которые подается переменное напряжение 2 кВ, 500 Гц. Число частиц, падающих на мишень, определялось по измерению тока пучка с помощью интегратора тока, обеспечивающего измерение тока в диапазоне  $10^{-8}$  А -  $2 \cdot 10^{-10}$  А при нелинейности  $\sim 1\%$ . Для уменьшения влияния вторичной электронной эмиссии при бомбардировке пучком мишени, последняя окружена графитовым цилиндром (рис. 2), к которому подключено отрицательное напряжение -600 В. Рамка многопозиционной мишени установлена на изолированном вакуумном вводе и наклонена на угол  $45^\circ \pm 0,2^\circ$  по отношению к направлению пучка. Она конструктивно заканчивается направляющим стержнем, входящим в центрирующий цилиндр из тефлона, обеспечивая тем самым сохранение геометрического фактора мишени при ее перемещении или замене.

Детектор рентгеновского излучения Si(Li) расположен под углом

90° по отношению к падающему пучку на расстоянии 50 мм от мишени. Энергетическое разрешение спектрометрического тракта, измеренное на линии  $^{57}\text{Co}$ , составляет 215 эВ.

В качестве выходного окна камеры облучения использовался металлизированный майлар толщиной 10 мкм. Между выходным окошком камеры и детектором устанавливались сменные фильтры. Для уменьшения фона внутренняя поверхность камеры покрыта графитом повышенной чистоты.

В ряде случаев определение элементного состава методом измерения характеристического рентгеновского излучения дополнялось одновременным измерением упругого рассеяния. С этой целью в камере для исследований под углом  $135^\circ \pm 1^\circ$  устанавливался кремниевый поверхностно-барьерный детектор. Энергетическое разрешение этого канала составляло 25 кэВ от  $\alpha$ -частиц с энергией 5,49 МэВ. Геометрический фактор при измерении составлял  $1,4 \cdot 10^{-3}$ .

Полученная в эксперименте информация записывалась на ЭМ МЭРА-60/30 и передавалась на РДР-II/70 для последующей обработки по программе ОИИИ „АСТИВ“.

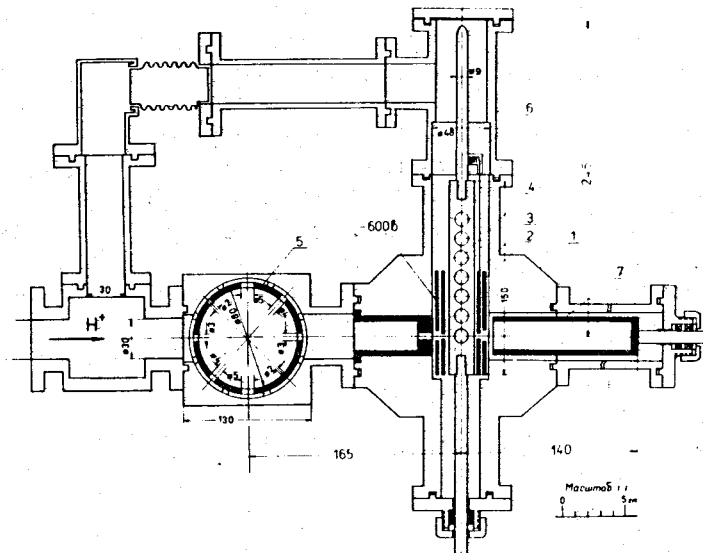


Рис. 2. Конструкция рентгеновской камеры. 1 - корпус камеры, 2, 3 - цилиндрические экраны, 4 - рамка многопозиционной мишени, 5 - коллиматор, 6 - направляющий цилиндр из тefлона, 7 - цилиндр Фарадея.

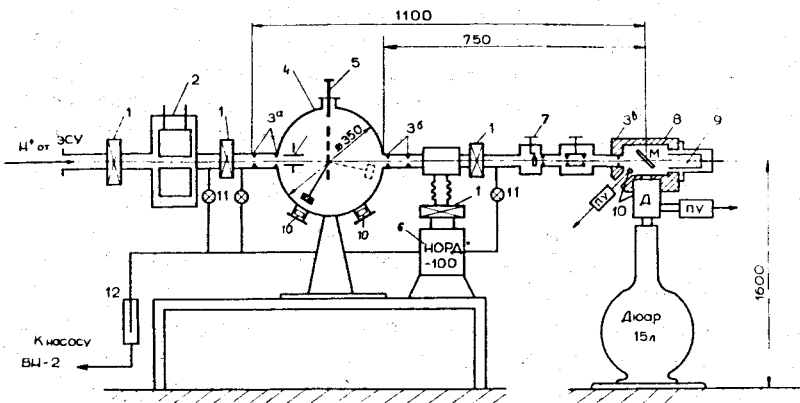


Рис. 1. Конструкция установки и схема эксперимента. 1 - вакуумные затворы, 2 - азотная ловушка, 3 а+в - коллиматоры, 4 - промежуточная камера, 5 - держатель мишеней, 6 - высоковакуумный насос, 7 - прибор визуального наблюдения за пучком, 8 - камера ХРИ, 9 - цилиндр Фарадея, 10 - детекторы.

Эффективность  $\epsilon_i$  рентгеновского детектора определялась двумя методами. В одном методе она определялась по измерению выхода ХРИ от стандартных мишеней, число атомов которых известно.

Расчет производился по формуле:

$$\epsilon_i = \frac{Y_{i,q}^{ст}}{\sigma_q^{ст}(E) P_{i,q} n_p N_M^{ст}}, \quad (I)$$

где  $\sigma_q^{ст}$  - сечение выхода характеристического рентгеновского излучения для  $q$ -серии данного элемента;  $P_{i,q}$  - относительная вероятность испускания  $i$ -го излучения при заполнении вакансий в  $q$ -оболочке;  $n_p$  - число частиц, падающих на мишень;  $Y_{i,q}^{ст}$  - выход характеристического рентгеновского излучения  $i$ -линии,  $q$ -серии от

элемента, число атомов которого известно;  $N_M^{CT}$  - число атомов мишени (в ат/см<sup>2</sup>), определяемое по упругому рассеянию ионов <sup>4</sup>He;

В другом методе эффективность определялась с помощью нуклидов <sup>54</sup>Mn, <sup>57</sup>Co, <sup>65</sup>Zn, <sup>88</sup>Y, <sup>113</sup>Sn, <sup>137</sup>Cs, <sup>241</sup>Am, взятых из комплекта стандартных образцов "ОСИ". При измерениях учитывалось ослабление ХРИ в воздухе на пути от источника до детектора. Результаты эксперимента показали, что в пределах экспериментальных ошибок оба метода хорошо согласуются и дополняют друг друга. График зависимости эффективности регистрации ХРИ от энергии представлен на рис. 3. Сплошная кривая на рисунке получена путем аппроксимации экспериментальных данных по методу наименьших квадратов функцией  $\ln \epsilon = \sum_{i=1}^M A(i) E^{i-1}$ , где M - число параметров, A - коэффициенты полинома, E - энергия рентгеновского излучения.

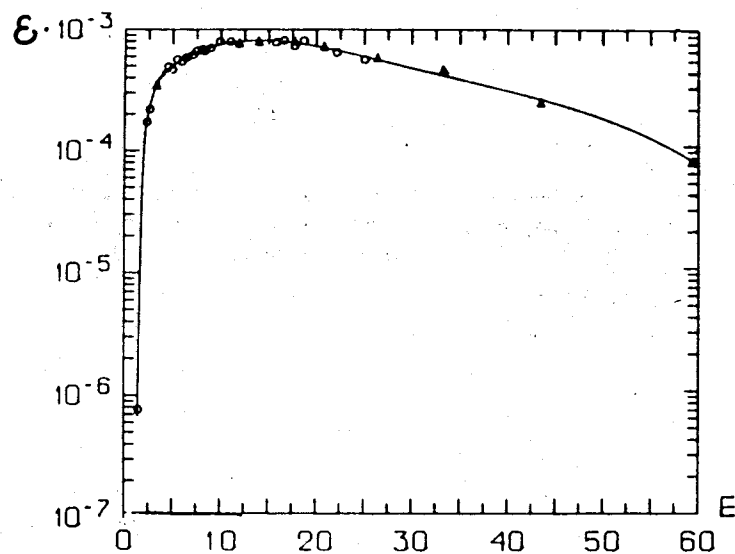


Рис. 3. Эффективность регистрации ХРИ для Si(Li) детектора.

В третьей главе описана методика определения элементного состава тонких и массивных мишеней методом ХРИ при возбуждении их пучком ионов водорода и <sup>4</sup>He.

Существенная особенность развиваемого метода состоит в том, что он не требует применения стандартов и использует для определения элементного состава образцов знание сечения выхода ХРИ ( $\sigma$ ), эффективности регистрации ХРИ ( $\epsilon_i$ ) и коэффициента поглощения ( $\mu_i$ ). Определение концентрации элементов в массивной мишени проводилось на основа-

нии формулы вида:

$$Y_{i,q}^{\ell} = \frac{C_{\ell} L}{A^{\ell}} n_p \epsilon_i P_{i,q} \int_0^R \sigma_q^{\ell}[E(x)] e^{-\mu_i^{\ell} x \frac{\cos \psi}{\cos \varphi}} dx, \quad (2)$$

где  $C_{\ell}$  - концентрация исследуемого элемента  $\ell$ ;  
 $E(x)$  - энергия падающих частиц на глубине X;  
 $\varphi, \psi$  - углы между нормалью к облучаемой поверхности и направлением к оси пучка и детектора соответственно;  
 $\mu_i^{\ell}$  - массовый коэффициент ослабления ХРИ i-ой линии  $\ell$ -ого элемента элементами, входящими в состав мишени;  
 $R$  - максимальный пробег частиц в мишени;  
 $L, A^{\ell}$  - число Авогадро и атомный вес элемента  $\ell$ .  
 Остальные величины определены ранее.

Как видно, определение  $C_{\ell}$  из уравнения (2) весьма затруднено тем, что под интегралом находятся величины  $\mu_i^{\ell}, E(x)$ , которые сами зависят от определяемого элементного состава матрицы. Поэтому решение этого уравнения может быть получено методом последовательных приближений с использованием большого числа итераций. В диссертации рассмотрен частный случай указанной задачи, в которой концентрация искомого элемента не превышает 3-5%, и концентрация основных элементов матрицы известна. В этом случае практически отпадает необходимость учета поглощения рентгеновского излучения в примесных элементах, и под интегралом уравнения (2) остаются величины, зависящие от основного состава матрицы. В этом приближении решение уравнения (2) относительно  $C_{\ell}$  сводится к замене интеграла на суммы по бесконечно большому числу отрезков  $dx_j$ , зависящих от  $E_j$ . Тогда из формулы (2) можно получить выражение:

$$C_{\ell} = \frac{Y_{i,q}^{\ell} A^{\ell}}{n_p \epsilon_i P_{i,q} S_0 L}, \quad (3)$$

где

$$S_0 = \sum_{j=0}^{j=N-1} \exp[\mu x(E_j)] \frac{1}{\Delta x_j \mu^2} \left[ \sigma(E_j) \left\{ \mu \Delta x_j - 1 + \exp(-\mu \Delta x_j) \right\} + \sigma(E_j - \Delta E) \left\{ 1 - (\mu \Delta x_j) \exp(-\mu \Delta x_j) \right\} \right].$$

Здесь N - конечное число интервалов  $\Delta E$ ;  $x(E_j)$  - пробег протонов энергии  $E_j$  в мг/см<sup>2</sup>. Индекс j относится к элементам матрицы.

Поскольку определение концентрации по методу суммирования все

же трудоемок, нами использовался еще один метод расчета, который основан на экспоненциальной аппроксимации зависимости сечения выхода ХРИ  $i$ -линии элемента  $\ell$  от поверхностной плотности  $X$  излучаемого слоя в соответствии с уравнением:

$$\sigma_{i,q}^{\ell}(x) = \sigma_{0,q}^{\ell} e^{-\nu_{\ell} x} \quad (4)$$

где  $\sigma_{0,q}^{\ell}$  - сечение выхода ХРИ для элемента  $\ell$  при энергии  $E_0$ ;  $\nu_{\ell}$  - параметр, характеризующий изменение ионизирующей способности протона с глубиной его проникновения в образец.

Предположенная аппроксимация упрощает дальнейшую математическую обработку, которая изложена в работах С.М.Блохина и других.

Используя соотношение (4) и интегрируя уравнение (2), получаем выражение для выхода ХРИ анализируемого элемента из всего излучаемого слоя массивного образца:

$$Y_{i,q}^{\ell}(R) = \frac{N_p L \epsilon_i}{A^{\ell} \sin \psi} C_{\ell} \sigma_{0,q}^{\ell} \frac{1 - \exp(-\beta_{\ell} R \cos \psi)}{\beta_{\ell}} \quad (5)$$

где

$$\beta_{\ell} = \frac{\nu_{\ell}}{\sin \psi} + \frac{M_{\ell}^{\ell}}{\sin \psi} \quad (6)$$

Величина  $\nu_{\ell}$  определяется полуэмпирическим соотношением:

$$\nu_{\ell} = 6,87 \frac{S_j(E_i)}{E_0} \left[ 1 - \frac{\sigma_{i,q}^{\ell}(E_i)}{\sigma_{0,q}^{\ell}(E_0)} \right] \quad (7)$$

где  $S_j(E_i)$  - тормозная способность в основном элементе однокомпонентной матрицы.

$\sigma(E_i)$  или  $E_0$  относится к элементу, излучение которого мы наблюдаем:  $E_i = 0,8E_0$ ;  $E_0$  - энергия падающего иона.

Метод расчета применен нами для анализа примесных элементов в многокомпонентной матрице. В этом случае выражение для параметра  $\beta_{\ell}$  в сложной матрице, входящего в уравнение (6), может быть записано в виде:

$$\beta_{\ell} = \frac{\sum_{i=1}^n C_j \nu_{\ell}^i}{\cos \psi} + \frac{\sum_{i=1}^n C_j M_{i,j}^{\ell}}{\cos \psi} \quad (8)$$

где

$$\nu_{\ell}^j = S_j(E) / \sigma_{i,q}^{\ell} \cdot d\sigma_{i,q}^{\ell} / dE \quad (9)$$

Здесь величина  $\nu_{\ell}^j$  характеризует изменение способности протона ионизировать атомы примесных элементов  $\ell$  по мере углубления в матрицу, состоящую из одного  $j$ -макрокомпонента.

После подстановки вырезания (8) в уравнение (6) можно получить искомую концентрацию элемента  $\ell$ . Ошибка определения концентрации элементов не превышает 20-25% при доверительной вероятности 0,95.

Концентрации элементов в тонких мишенях в  $(\frac{E_i}{E_0})$  определялись по уравнению вида:

$$C_{\ell} = \frac{Y_{i,q}^{\ell} \sin \psi A^{\ell}}{n_p \sigma_q R_{i,q} \epsilon_i \rho_{\text{миш}} L} \quad (10)$$

где  $\rho_{\text{миш}}$  - плотность данной мишени в (мг/см<sup>2</sup>).

В четвертой главе представлены экспериментальные результаты по определению сечений выхода ХРИ от K- и L-оболочек для ряда элементов с  $Z$  в интервале  $22 \leq Z \leq 83$  при возбуждении этих элементов пучком протонов и ионов <sup>4</sup>He с энергией 1,5+3,8 МэВ. Измерения приведены для тех элементов, сечения которых в указанном интервале энергии неизвестны или требуют уточнения.

Измерения проводились на тонких мишенях. В этом случае величина  $\sigma_q$  определялась по формуле

$$\sigma_q = \frac{Y_q}{N_p N_m} \quad (11)$$

где  $Y_q = \frac{Y_{\alpha}}{\epsilon_{\alpha}} + \frac{Y_{\beta}}{\epsilon_{\beta}}$  - выход характеристического рентгеновского излучения для  $\alpha, \beta$ -линии серии K исследуемого элемента;

$Y_q = \frac{Y_{\alpha}}{\epsilon_{\alpha}} + \frac{Y_{\beta}}{\epsilon_{\beta}} + \frac{Y_{\gamma}}{\epsilon_{\gamma}} + \frac{Y_{\ell}}{\epsilon_{\ell}}$  - этот же выход ХРИ для L-серии;  $\epsilon_{\alpha}, \epsilon_{\beta}$  и т.д. - эффективности регистрации ХРИ для  $\alpha, \beta, \gamma, \ell$ -линии K- или L-серии;

$Y_{i,q}$  - выход ХРИ  $i$ -линии ( $\alpha, \beta$  и т.д.)  $q$ -серии (K или L), определялся по площади энергетического спектра ХРИ. Величина этой площади определялась по программе ОИИИ "АСТIV" на PDP -11/70;

$N_p$  - число частиц, падающих на мишень;

$N_m$  - число атомов мишени, определяемое по измерению упругого рассеяния ионов <sup>4</sup>He под углом 135° в лабораторной системе координат в той же геометрии и при той же энергии ускоренных ионов, при которых проводилось измерение выхода ХРИ.

Для устранения погрешностей, связанных с торможением падающих частиц

в мишени и поглощением в ней рентгеновского излучения, в измеряемое сечение вводилась поправка по формуле:

$$\sigma_i = \bar{\sigma}_i \left[ 1 - \frac{1}{2} (a_i - b) \frac{\Delta E}{E_0} - \frac{1}{2} M_i \Delta x \right]^{-1} \quad (12)$$

где  $\bar{\sigma}_i$ ,  $\sigma_i$  - исправленные и неисправленные сечения выхода ХРИ элементов;  $M_i$  - массовый коэффициент ослабления рентгеновского излучения,  $a_i$ ,  $b$  - коэффициенты, полученные теоретическим расчетом.

Результаты измерений сечений выхода ХРИ К- и L-серии элементов с  $Z \ 22 \leq Z \leq 47$  и  $51 \leq Z \leq 83$ , соответственно, представлены в таблицах 1, 2. Средняя квадратичная ошибка при определении сечения во всех измерениях не превышает 10%. Она складывается из ошибки определения выхода ХРИ - не больше 2%, ошибки определения  $\epsilon_i$  - 5+7%, ошибки в определении числа атомов мишени - 4%, ошибки определения числа частиц, падающих на мишень - 1,5%, ошибки в определении  $\sigma$  из-за ошибок в измерении энергии - 1%.

Результаты измерений сечений возбуждения ХРИ элементов сравнивались с результатами теоретических расчетов, выполненных в борновском приближении плоских волн (БПВ), и по модели бинарных столкновений (МЭС). Как показали расчеты, выполненные по указанным теориям, теоретические значения  $\sigma_T$ , вычисленные для случая ионизации К- и L-оболочек пучком протонов, и L-оболочки пучком ионов  $^4\text{He}$ , хорошо совпадают с экспериментальными (см. рис. 3, 4). Более противоречивая картина наблюдается в случае ионизации К-оболочки ионами  $^4\text{He}$ , где отношение  $\sigma_T / \sigma_3$  значительно отличается от единицы (см. рис. 3а). Учитывая это, мы подробно исследовали возможность описания процесса ионизации с помощью теории ЕСПSSR (развитой Брантом и Лапицки). Эта теория описывает ионизацию в формализме БПВ с учетом поправок на изменение энергии связи, поляризацию оболочек и релятивистский эффект для электронов атомов мишени.

Кроме того, учитываются влияние отклонения падающего иона в кулоновском поле ядра, а также потери энергии для налетающей частицы во время ее столкновения с атомом мишени.

На рис. 3 представлены энергетические зависимости усредненных по порядковым номерам  $Z$  значений отношений теоретических сечений, рассчитанных по теории ЕСПSSR, к экспериментально измеренным сечениям выхода ХРИ ( $\sigma_T^{\text{ЕСПSSR}} / \sigma_3$ ) элементов для К-оболочки исследуемых атомов.

Рис. 3(а) относится к случаю ионизации протонами, 3(б) - к случаю ионизации ионами  $^4\text{He}$ . Из рисунков 3, 4 видно, что как при иони-

Таблица 1. Сечение возбуждения ХРИ для К- и L-серий при бомбардировке элементов протонами в интервале энергий 1,46 - 3,8 МэВ

Элемент	Энергия протонов в МэВ		эксп.	эксп.	эксп.	эксп.	эксп.	эксп.
	1,46	2,055						
Z	1,46	2,055	эксп.	эксп.	эксп.	эксп.	эксп.	эксп.
22 Ti	89,95	213,9	285,6	364,5	-	440,5		
34 Se	4,85	-	14,61	23,6	26,85	30,44	35,89	
37 Rb	2,67	7,41	12,31	18,9		24,50		
40 Zr	1,15	3,20	5,39	8,67		11,36	11,18	
41 Nb	0,94	2,59	4,50	7,18		10,43		
42 Mo	0,71	1,97	3,40	5,55		4,96		
46 Pd	0,30	0,86	1,69	2,43		4,11	4,46	
47 Ag	0,20	0,52	0,82	1,53	1,93	2,40	2,82	
51 Sb	307,0	506,12	676,8	802,8	892,4			
52 Te	272,7	387,0	637,6	804,0	847,3	925,7		
73 Ta	25,92	52,43	83,4	99,4		144,6		
74 W	26,2	53,9	81,3	105,7		122,2		
83 Bi	7,53	15,68	29,46	39,7		49,00		
ХРИ К-серия								168,3
ХРИ L-серия								161,7





В пятой главе представлены результаты практического применения метода ИРФА. В качестве объектов исследования использованы фосфоры различной чистоты, кости динозавра, спинномозговая жидкость, почвы, растения, мумии, полупроводниковые материалы, различные фильтры, тонкие плёнки.

В заключении приводятся основные результаты диссертационной работы.

1. Сконструирована и создана рентгеноспектрометрическая установка для определения элементного состава веществ, основанная на измерении характеристического рентгеновского излучения, возбуждаемого пучком ускоренных протонов и ионов  ${}^4\text{He}$  от электростатического ускорителя ОИЯИ.

2. Разработана конкретная методика определения элементного состава тонких и массивных образцов по измерению характеристического рентгеновского излучения, возбуждаемого ионами водорода и  ${}^4\text{He}$ .

Показано, что в экспериментальных условиях предел обнаружения элементов достигает  $1 \cdot 10^{-7}\%$  на тонких и  $1 \cdot 10^{-6}\%$  на массивных мишенях.

Отличительная особенность метода определения элементного состава состоит в том, что не требуется применения внешних и внутренних стандартов, а используются данные по сечениям  $\sigma_i$  выхода характеристического рентгеновского излучения элементов при ионном возбуждении, эффективность регистрации  $\varepsilon_i$  и коэффициенты поглощения ХРИ  $M_i$ .

3. В процессе разработки методики элементного анализа выполнены следующие работы:

а) установлены оптимальные условия проведения анализа и геометрия опыта;

б) разработана методика определения эффективности регистрации ХРИ;

в) рассчитаны и составлены таблицы коэффициентов ослабления ХРИ в воздухе и ряде материалов, используемых в качестве ослабляющих фильтров (майлар, кремний, дифференциальные фильтры из  $\text{Al}$ );

г) на базе ЭВМ PDP-11/70 составлены дополнительные программы расчетов для определения элементного состава в массивных образцах.

Показано, что эти программы удовлетворяют требованиям экспрессности массового количественного анализа;

д) систематизированы и представлены в виде таблиц данные по сечениям выхода ХРИ для К- и L-серий элементов с  $Z$  в интервале  $10 \leq Z \leq 92$  при возбуждении их пучком протонов.

4. Измерены сечения выхода ХРИ для К- и L-серий элементов с  $22 \leq Z \leq 83$  в интервале энергии протонов и ионов гелия-4  $1,5+3,8$  МэВ. Измерения выполнены для тех элементов и энергий, для которых экспериментальные данные по сечениям отсутствовали или требовали уточнения.

5. Проведено сравнение полученных нами экспериментальных значений сечений выхода ХРИ с существующими теоретическими моделями (приближение бинарных столкновений, плосковолновое борновское приближение, теория ЕСПСР). Показано, что наилучшее согласие экспериментальных данных по  $\sigma$  с теоретическим их описанием получается по теории ЕСПСР, которая описывает ионизацию в формализме БПВ с учетом поправок на изменение энергии связи, поляризацию оболочек и релятивистского эффекта для электронов атомов мишени, при этом учитываются влияние отклонения в кулоновском поле ядра, а также потери энергии падающей частицы во время столкновения с атомом мишени.

6. Разработанный метод использовался при выполнении хозяйственных научно-исследовательских работ, заключенных ОИЯИ с различными предприятиями Советского Союза, а также работ, выполненных по протоколам о научно-техническом сотрудничестве со странами-участницами ОИЯИ.

7. На основании проведенных исследований по определению элементного состава в тонких и массивных образцах можно сделать заключение, что этот метод является весьма полезным при использовании его в различных областях экологии, геологии, медицины, исследовании полупроводниковых материалов и приборов. Он является особенно полезным, а в некоторых случаях незаменимым при исследовании элементного состава поверхностных и приповерхностных слоев полупроводниковых материалов или определении концентрации малых ( $\leq 1 \text{ мкг/см}^2$ ) количеств вещества.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Бразевич Э., Бразевич Я., Лю Зай Ик, Осетинский Г.М., Пурэв А. Элементный анализ при возбуждении характеристического рентгеновского излучения пучком протонов с энергией  $1+3,5$  МэВ. - Дубна, 1981. - 18 с. (Сообщение/Объед. ин-т ядер. исслед.: Р18-81-503.)
2. Бразевич Э., Бразевич Я., Волков В.Ф., Герасимов С.А., Лю Зай Ик, Осетинский Г.М., Пурэв А. Сечение возбуждения характеристического рентгеновского излучения протонами и ионами  ${}^4\text{He}$  для элементов с  $Z$  в интервале  $22 \leq Z \leq 83$ . - Атомная энергия, 1985, т. 59, вып. 5, с. 52-57.
3. Алтнин В.А., Блохин С.М., Бразевич Э., Бразевич Я., Лю Зай Ик, Осетинский Г.М., Пурэв А. Элементный анализ толстых образцов при возбуждении характеристического рентгеновского излучения пучком протонов. - Заводская лаборатория, 1984, т. 50, № 4, с. 18-21.

4. Бразевич Э., Бразевич Я., Лю Зай Ик, Осетинский Г.М., Пурэв А. Таблицы сечений выхода характеристического рентгеновского излучения при протонном возбуждении в интервале энергий 0,2+4 МэВ. - Дубна, 1981. - 105 с. (Депонированная публикация/Объед. ин-т ядер. исслед.: Б1-18-81-320).
5. Бразевич Э., Бразевич Я., Лю Зай Ик, Новак С., Осетинский Г.М., Пурэв А. Микроэлементный состав спинномозговой жидкости. - Дубна, 1982. - 6с. (Сообщение/Объед. ин-т ядер. исслед.: Р18-82-313).
6. Бразевич Э., Бразевич Я., Лю Зай Ик, Осетинский Г.М., Пурэв А. Таблицы массовых коэффициентов ослабления характеристического рентгеновского излучения К- и L-серий для Z в интервале  $33 \leq Z \leq 94$ . - Дубна, 1981 - 115 с. (Депонированная публикация/Объед. ин-т ядер. исслед.: Б18-81-319).
7. Бразевич Я., Лю Зай Ик, Осетинский Г.М., Пурэв А., Чултэм Д. Замещение кальция в костях динозавра двухвалентными ионами уранила. - Дубна, 1984. - 7 с. (Препринт/Объед. ин-т ядер. исслед.: Р14-84-299).
8. Бразевич Я., Бразевич Э., Лю Зай Ик, Осетинский Г.М., Пурэв А. Таблицы массовых коэффициентов ослабления характеристического рентгеновского излучения К- и L-серии в майларе. - Дубна, 1981. - 47 с. (Депонированная публикация/Объед. ин-т ядер. исслед.: Б1-18-81-438).
9. Дидоренко В.А., Ильхамов Р.А., Казачевский И.В., Осетинский Г.М., Пурэв А., Хушмурадов Ш.Х. Определение примесей в красном фосфоре протонным возбуждением характеристического рентгеновского излучения. - Дубна, 1985. - 9 с (Сообщение/Объед. ин-т ядер. исслед.: Р14-85-601).
10. Бразевич Я., Бразевич Э., Лю Зай Ик, Осетинский Г.М., Пурэв А. Таблицы полных массовых коэффициентов ослабления характеристического рентгеновского излучения К- и L-серии в воздухе. - Дубна, 1982. - 13 с. (Депонированная публикация/Объед. ин-т ядер. исслед.: Б1-18-82-96).
11. Braziewicz J., Braziewicz E., Osetynski G.M., Rajek M., Ploskonka J., Purev A. K-shell X-ray cross sections of selected elements from Ti to Sb for incident protons and  $^4\text{He}$  ions. - Dubna, 1985. - 8 p. (Communication of the JINR: E14-85-576).

Рукопись поступила в издательский отдел  
17 декабря 1985 года.