

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

P6-85-753

А.Х.Иноятов<sup>1</sup>, Ш.Бриансон<sup>2</sup>, К.Бурин<sup>3</sup>, Р.Вален<sup>2</sup>,  
Ц.Вылов, Б.Легран<sup>2</sup>, А.Минкова<sup>3</sup>,  
В.Н.Покровский

ОБ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
РЕГИСТРАЦИИ  
КАНАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОННОГО УМНОЖИТЕЛЯ  
ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО БЕТА-СПЕКТРОМЕТРА

<sup>1</sup> Ташкентский государственный университет

<sup>2</sup> Центр ядерной спектроскопии и масс-  
спектрометрии. Орса, Франция.

<sup>3</sup> Софийский университет

1985

В работе /1/ описан новый тип комбинированного электростатического бета-спектрометра с регистрацией электронов каналным электронным умножителем /КЭУ/ типа BENDIX SEM 4503. Настоящая работа посвящена выбору оптимальных условий измерений, а именно - достижению компромисса между эффективностью регистрации /зависящей от энергии электронов  $T$ / и энергетическим разрешением /зависящим от напряжения анализа на цилиндрическом зеркале  $U$  /.

## 1. ПРИНЦИП РАБОТЫ СПЕКТРОМЕТРА

В спектрометре /рис.1/ объединены два типа анализаторов: интегральный анализатор с тормозящим полем и дифференциальный анализатор с двойным цилиндрическим зеркалом. Анализатор с тормозящим полем состоит из двух концентрических сфер 1 и 2, между которыми проложено положительное тормозящее напряжение  $U$ . Радиоактивный источник находится на поверхности сферы 1. Напряжение замедления приложено к источнику, а сфера 2 заземлена. Измерение энергии замедленных электронов проводится с помощью двойного цилиндрического зеркала. Напряжение анализа  $u$  приложено к внешнему цилиндру, а внутренний заземлен. Электроны вылетают из источника с энергией  $E_0$ , проходя сферы 1 и 2, замедляются до энергии  $E_a$ , и через коническую щель попадают в цилиндрический анализатор. Энергия анализируемых электронов равна:

$$E_a = E_0 + qU = aqU, \quad /1/$$

где  $a = 1,96$  - постоянная прибора,  $q$  - заряд электрона. Регистрация электронов во втором фокусе  $D_2$  осуществляется с помощью КЭУ. Развертка спектра осуществляется по замедляющему напряжению  $U$ . При таком способе развертки энергия регистрируемых КЭУ электронов, а также абсолютный разрешаемый интервал энергий  $\Delta E_a$  остаются приблизительно постоянными на всем рабочем диапазоне  $E_0 = 0,5 - 50$  кэВ.

На рис.2а показана линия  $K14,4$  кэВ / $E_0 = 7,3$  кэВ/ электронов внутренней конверсии радионуклида  $^{57}\text{Co}$ , измеренная при различных значениях напряжения анализа  $u = -30 \div -300$  В, что соответствует изменению энергии регистрируемых электронов в пределах  $E_a \sim 60 \div 600$  эВ. Убывание интенсивности электронных линий с уменьшением  $|u|$  обусловлено суммарным действием трех эффектов:



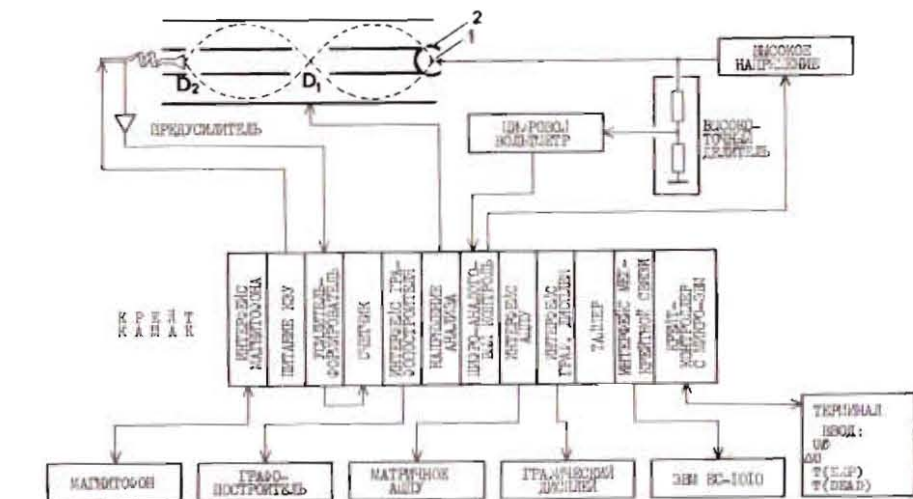
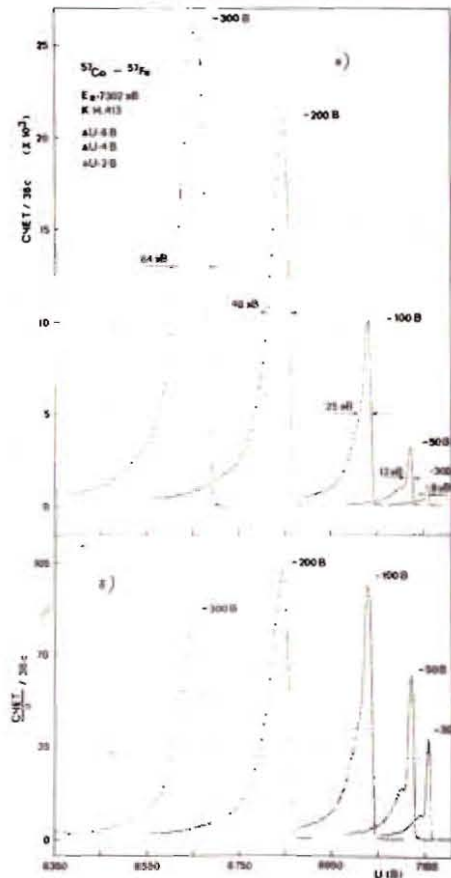


Рис.1. Блок-схема электростатического бета-спектрометра.

Рис.2. Зависимость формы аппаратурной линии К14,4 кэВ  $^{57}\text{Co}$  от напряжения анализа на цилиндрическом зеркале:  
а - без нормировки на  $|u|$ ;  
б - после нормировки на  $|u|$ .



а/ уменьшением абсолютного разрешаемого интервала энергий  $E$ , пропорционального  $|u|$ ; что может быть учтено нормированием  $^{2,7}$  числа отсчетов в каждом канале на  $|u|$  /см.рис.2б/;

б/ снижением эффективного телесного угла спектрометра вследствие увеличения коэффициента замедления сферического замедлителя,  $K = \frac{E_0}{E} / 3 /$ ;

в/ изменением эффективности регистрации при изменении энергии электронов  $E_a - 60 \div 600$  эВ.

Поскольку эффекты а/ и б/ связаны с особенностями элект-

ронной оптики анализаторов, единственным резервом увеличения эффективности спектрометра является выбор оптимальных условий регистрации электронов с помощью КЗУ.

## 2. ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГИСТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ С ПОМОЩЬЮ КЗУ

Абсолютная эффективность КЗУ в диапазоне энергий от 10 до  $10^4$  эВ определяется двумя следующими факторами:

- а/ "геометрический" фактор, связанный с конструктивными особенностями входного окна /раструба/ и геометрией эксперимента;
- б/ коэффициент вторичной эмиссии поверхностного материала.

Влияние "геометрического" фактора, т.е. изменение эффективности регистрации в зависимости от угла и места попадания первичной частицы относительно оси КЗУ, рассмотрено в работах  $^{4,5}$ . Согласно  $^{4/}$ , эффективность собирания вторичных электронов убывает по направлению к краю входного раструба. В частности, в точке, находящейся на половине расстояния от центра до края раструба  $/1/2R/$ , эффективность оказывается в 2 раза меньше, чем в центре, причем этот эффект не зависит от энергии первичных электронов. В работе  $^{5/}$  проведены измерения абсолютной эффективности КЗУ Vendix с коническим входным окном  $\theta = 8$  мм для коллимированного пучка электронов с энергией  $T = 20 \div 10000$  эВ. Как видно из рис.3а, при попадании пучка в центр входного раструба и в точку, смещенную относительно его, эффективность может отличаться почти в два раза. На рис.3б показаны изменения счета при сканировании раструба вдоль диаметра пучком электронов, параллельным оси умножителя, и под углом  $20^\circ$ .

Зависимости эффективности от энергии электронов, вычисленные из эмиссионных свойств поверхностных материалов /для стекла и вольфрама/, приведены на рис.4 из работы  $^{6/}$ .

Аналитическое выражение для эффективности, учитывающее оба вышеупомянутых фактора, предложено в работе  $^{7/}$  и имеет вид:

$$\epsilon(E) = 1 - \exp[-k\delta(E)/\delta_{\max}] \quad /2/$$

где  $k$  - коэффициент, учитывающий геометрию раструба и приложенное к КЗУ напряжение;  $\delta_{\max}$  - максимальное значение коэффициента вторичной эмиссии;  $\delta(E)$  - коэффициент вторичной эмиссии. Сравнение зависимости  $\epsilon(E)$  с экспериментальными данными показано на рис.5. На этом же рисунке представлены зависимости эффективности КЗУ от энергии, полученные в других экспериментах /ссылки см. в работе  $^{7/}$ /. Как видно, ход эффективности КЗУ необходимо исследовать в условиях конкретного эксперимента.

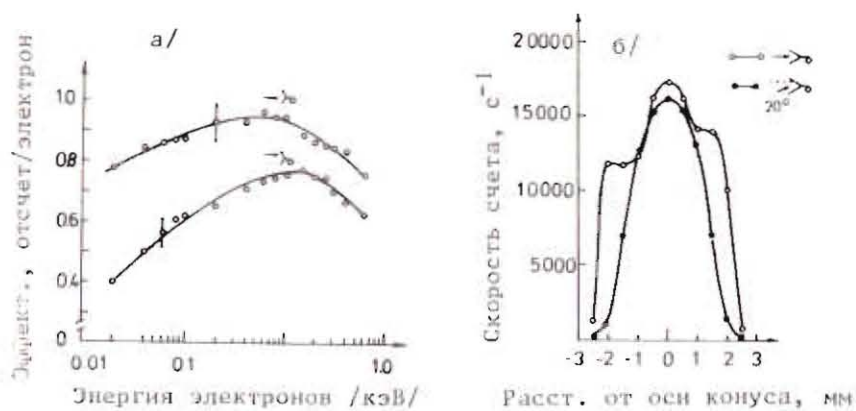


Рис.3. а - зависимость абсолютной эффективности КЭУ от энергии в случаях, когда пучок электронов попадает в центр раструба и на некоторую точку, смещенную относительно центра; б - изменение скорости счета при сканировании раструба вдоль диаметра пучком электронов, параллельным оси умножителя и под углом 20°/5/

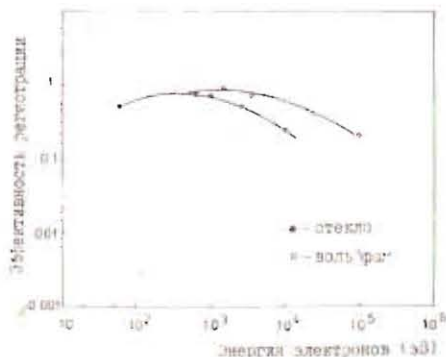


Рис.4. Расчетные зависимости эффективности регистрации КЭУ от энергии электронов для полифосфора и стекла /6/.

### 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ КЭУ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО БЕТА-СПЕКТРОМЕТРА ОТ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОНОВ

Для определения относительной эффективности КЭУ можно использовать метод сравнения интенсивностей двух конверсионных линий, измеренных на спектрометре.

Площадь спектральной линии с энергией регистрации  $E_a$  равна  $S = I \cdot \Omega' \cdot \epsilon(E_a)$ , /3/

где  $I$  - абсолютное число электронов с энергией  $E_0$ , испускаемых источником в единицу времени;  $\Omega'$  - эффективный телесный угол

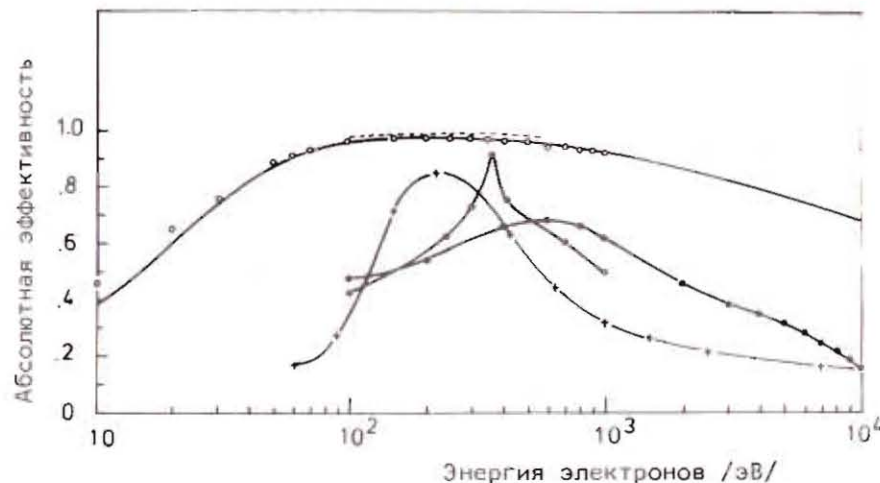


Рис.5. Зависимости эффективности КЭУ от энергии электронов, полученные в различных экспериментах /ссылки см. в работе /7/ /. Сплошная линия - расчет, светлые кружки - эксперимент /7/.

спектрометра;  $\epsilon(E_a)$  - эффективность КЭУ при данной энергии регистрации электронов. Для спектрометров с тормозящим потенциалом эффективный входной телесный угол  $\Omega'$  является функцией коэффициента замедления /3/:

$$\Omega' = \Omega_0 f(K),$$

где  $\Omega_0$  - входной телесный угол без применения замедления. Для нашего спектрометра коэффициент замедления составляет

$$K = \frac{E_0}{E_a} = \frac{E_a - qU}{auq} = \frac{auq - qU}{auq} = 1 - \frac{U}{au}.$$

Таким образом, при неизменном  $K$  величина  $\Omega'$  сохраняет свое значение. Следовательно, для измерения двух конверсионных линий, например  $K$  и  $L$ , в условиях постоянного эффективного телесного угла  $\Omega'$ , напряжение анализа должно быть подобрано таким образом, чтобы выполнялось соотношение

$$u_K / u_L = E_0^K / E_0^L, \quad /4/$$

где  $E_0^K$  и  $E_0^L$  - энергия испускания  $K$ - и  $L$ -электронов соответственно. Тогда, измерив площади линий  $S_K$  и  $S_L$  при напряжениях анализа  $u_1, u_2, \dots, u_n$ , подобранных таким образом, чтобы выполнялось условие



$$u_i = u_{i-1} \frac{E_0^L}{E_0^K}$$

можно составить отношения

$$\frac{S_{K,i-1}}{S_{L,i-1}} = \frac{I_K}{I_L} \cdot \frac{\epsilon(E_{a,i-1}^K)}{\epsilon(E_{a,i-1}^L)}$$

где  $i = 1, 2, \dots, n$ .

Из этих отношений, путем нормировки

$$\epsilon(E_{a,1}^K) = 1.$$

можно получить относительную эффективность КЗУ от энергии регистрируемых электронов в диапазоне от  $E_{a,1}^L$  до  $E_{a,n}^L$ .

Для исследования относительной эффективности КЗУ нами были выбраны линии K14,4 кэВ и L14,4 кэВ радионуклида  $^{57}\text{Co}$ . Начальные энергии электронов составляют, соответственно,  $E_0^K = 7,30$  кэВ

и  $E_0^L = 13,56$  кэВ, а отношение интенсивностей этих линий, согласно  $B^*$ , составляет  $I_K/I_L = 11,4/10$ .

Ввиду недостаточного энергетического разрешения определялась суммарная площадь  $L_1 + L_2 + L_3$  - линий, что означает нарушение условия /4/. Однако из-за малости отношения  $(L_2 + L_3)/L_1 \approx 10^{-1}$  и близости  $E_0^{L1} \cdot L_2 \cdot L_3$ , это нарушение не превышает величину  $10^{-3}$ .

Проведены 4 серии измерений с различными начальными значениями напряжения анализа: -30, -35, -40 и -45 В. При этом суммарный диапазон изменения  $u$  составил  $30 \div 536$  В, что соответствует диапазону энергии электронов от 60 до 1050 эВ. На рис.6 приведены зависимости величин  $S_K$  и  $S_L$  от напряжения анализа для четырех серий измерений, сплошные кривые - аппроксимация полиномом. Для определения эффективности КЗУ /рис.7/ с помощью соотношения /5/ использовались аппроксимированные значения. Процедура построения кривой эффективности проводилась последовательным присоединением серий

путем нормировки начального значения очередной серии с последующим уточнением. Для первой

Рис.6. Зависимость площади спектральных линий K14,4 кэВ и L14,4 кэВ / $^{57}\text{Co}$ / от напряжения анализа на цилиндрическом зеркале.

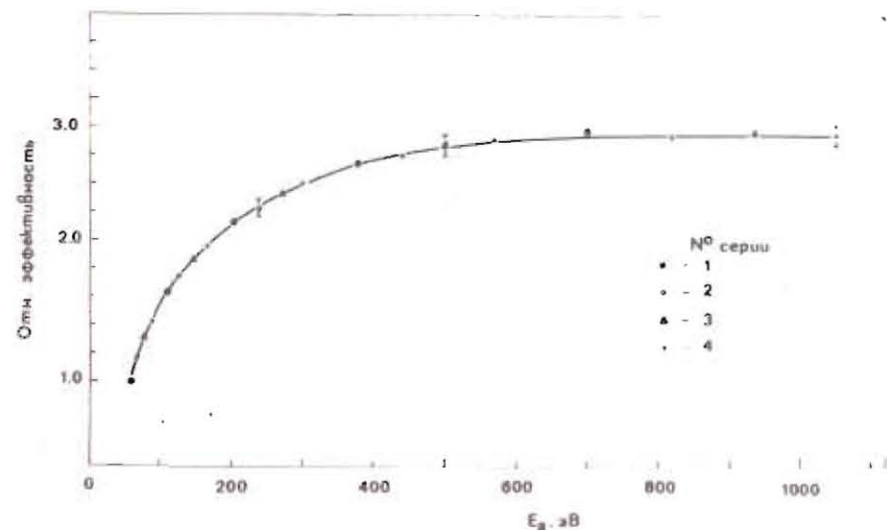
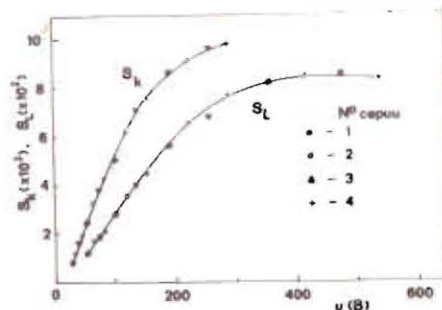


Рис.7. Относительная эффективность КЗУ /Bendix CEM 4503/ электростатического бета-спектрометра.

серии нормировочным значением выбрано  $\epsilon(E_{a,1}) = 1$ . Сплошная кривая на рис.7 изображает результат аппроксимации. Указанные в нескольких точках погрешности отражают лишь разброс полученных в результате использованной процедуры точек.

#### 4. ЭКСПЕРИМЕНТ С УСКОРЕНИЕМ РЕГИСТРИРУЕМЫХ КЗУ ЭЛЕКТРОНОВ

Как видно из рис.7., при малых энергиях электронов эффективность КЗУ падает. Для увеличения эффективности возможно использовать режим ускорения. Ускоряющее напряжение  $U_y$  прикладывалось к входному окну КЗУ и на плоскую /ускоряющую/ сетку, расположенную вплотную к входному окну /рис.8/. Для подавления фона от вторичных электронов, перед плоской сеткой установлена сферическая сетка, на которую можно подавать небольшой отрицательный потенциал  $U_3$ . Измерения проводились для следующих напряжений анализа:  $u = -30$  В, -50 В, -100 В, -200 В и -300 В. При этом ускоряющее напряжение изменялось в пределах от 0 до 300 В для каждого значения  $u$ .

На рис.9 приведены зависимости амплитуд линии K14,4 кэВ  $N_a = N_n - N_{\phi}$ , где  $N_n$  - число импульсов в максимуме, а  $N_{\phi}$  - число фоновых импульсов справа от линий. Видно, что при всех значениях  $u$  наблюдается резкий подъем в интервале  $U_y \approx 0 \div 10$  В,

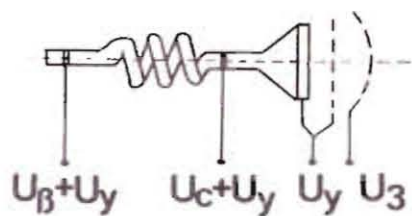
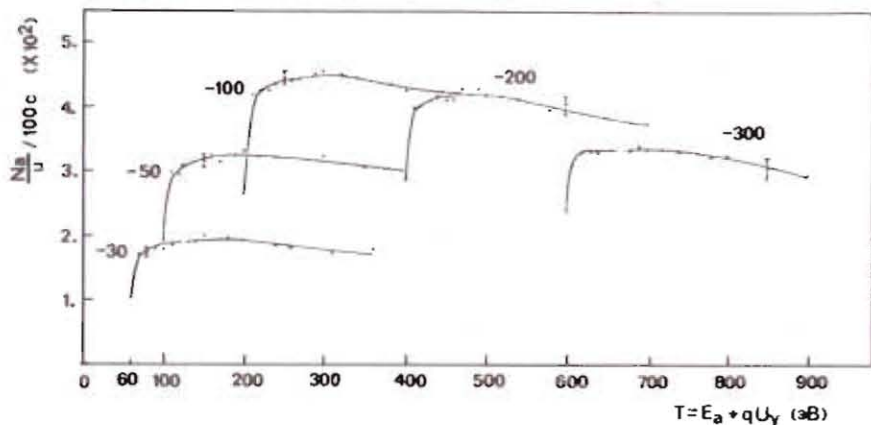


Рис.8. Схема включения КЗУ в режиме ускорения электронов.

Рис.9. Зависимость амплитуды линии К14,4 кэВ /  $N_{a,y} = N_p - N_{\phi}$  / от ускоряющего напряжения при различных значениях напряжения анализа.



затем насыщение /80 В  $\leq U_y \leq$  120 В/ и медленный спад. Такое изменение можно объяснить как улучшением условий образования электронной лавины в КЗУ<sup>9</sup>, так и ростом эффективности при увеличении энергии регистрируемых электронов.

Эффект ускорения можно охарактеризовать коэффициентом усиления  $N_{a,y}/N_a$ , где  $N_{a,y}$  - амплитуда линии в области насыщения /см.рис.9/. Зависимость  $N_{a,y}/N_a$  от напряжения анализа  $u$  приведена на рис.10. Видно, что в области малых  $|u|$  работают оба упомянутых выше механизма, а при  $|u| \geq 150$  В преобладающую роль играет улучшение условий образования электронной лавины.

Включение ускоряющего напряжения влечет за собой возрастание фонового счета /рис.11а/, что обусловлено регистрацией вторичных электронов, возникающих вблизи КЗУ. Это в свою очередь приводит к снижению величины отношения пик/фон /рис.11б/. Для подавления фона вторичных электронов к сферической сетке прикладывается небольшой тормозящий потенциал  $U_3$ . Типичные зависимости фонового счета и амплитуды линии от запирающего напряжения приведены на рис.12а,б. Как видно, начиная с  $U_3 = -5$  В, фоновый счет снижается до уровня фона, наблюдавшегося при отсутствии ускорения /штрихованная линия/, а уменьшение  $N_a$  не-

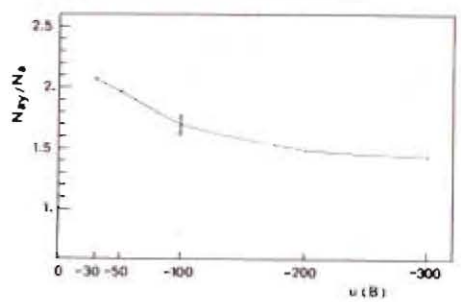


Рис.10. Зависимость эффекта ускорения  $N_{a,y}/N_a$  от напряжения анализа на цилиндрическом зеркале.

Рис.11. Влияние ускоряющего напряжения на фоновый счет при а/  $u = -30$  В и на величину отношения пик/фон при б/  $u = -30, -50, -100$  В.

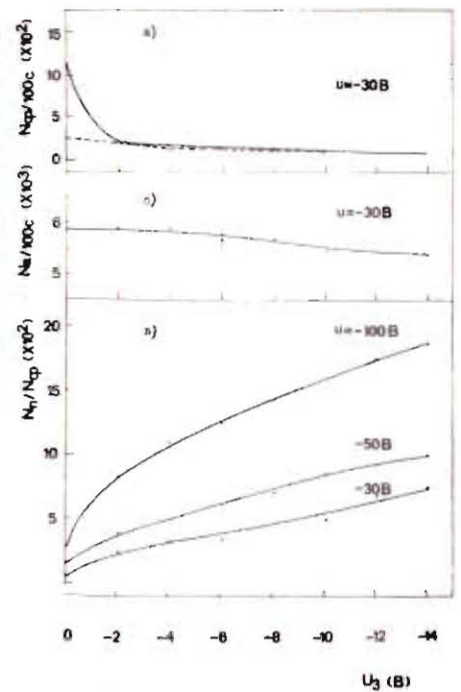
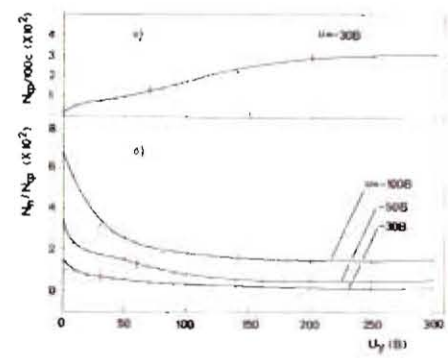


Рис.12. Влияние тормозящего напряжения а/ - на фоновый счет  $N_{\phi}$  б/ - на амплитуду линии  $N_a$  при  $u = -30$  В; в/ - на величину отношения пик/фон при  $u = -30, -50, -100$  В.

значительно. Таким образом, при увеличении  $|U_3|$  существенно возрастает величина пик/фон /рис.12в/. Заметим, однако, что возможности увеличения  $|U_3|$  ограничены тем, что это начинает отрицательно сказываться на форме аппаратной линии.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Применение режима ускорения электронов позволяет улучшить эффективность регистрации без



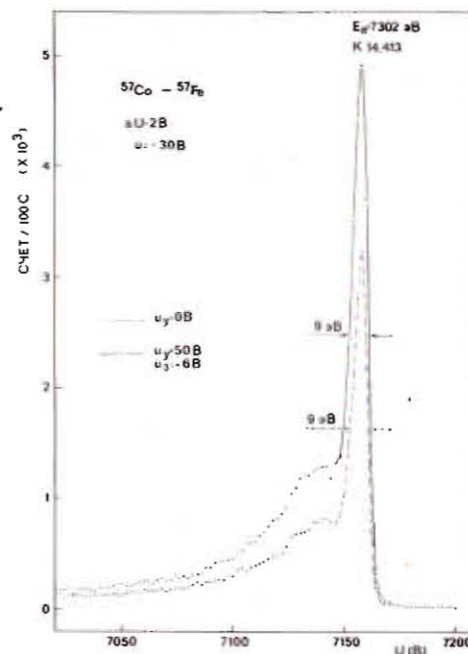
Таблица

$U_a$ (В)		$\Delta E$ (эВ)	$N_{\alpha, \gamma} / N_{\alpha}$	$\frac{N_{\alpha, \gamma} / N_{\alpha, \gamma}}{N_D / N_D}$
- 30 В	$U_y = 0$ В $U_z = 0$ В	$9,0 \pm 0,5$	1,60	2,5
	$U_y = 50$ В $U_z = -6$ В	$9,6 \pm 0,7$		
- 50 В	$U_y = 0$ В $U_z = 0$ В	$11,4 \pm 1,2$	1,56	2,1
	$U_y = 50$ В $U_z = -6$ В	$12,7 \pm 1,0$		
-100 В	$U_y = 0$ В $U_z = 0$ В	$25,4 \pm 0,4$	1,40	1,8
	$U_y = 50$ В $U_z = -6$ В	$29,0 \pm 0,3$		
-200 В	$U_y = 0$ В $U_z = 0$ В	$48,6 \pm 1,0$	1,28	1,3
	$U_y = 50$ В $U_z = -6$ В	$52,0 \pm 0,9$		
-300 В	$U_y = 0$ В $U_z = 0$ В	$64,0 \pm 1,4$	1,26	1,2
	$U_y = 50$ В $U_z = -6$ В	$65,5 \pm 0,8$		

заметного ухудшения формы аппаратной линии электростатического бета-спектрометра. Оптимальными значениями с точки зрения отношения пик/фон, амплитуды линии и ее формы являются  $U_y = 50$  В и  $U_z = -6$  В. Для сравнения в таблице приведены значения энергетического разрешения в режиме ускорения и без него, а также коэффициенты, характеризующие эффект его применения. Для примера на рис.13 приведена форма линии  $K_{14,4}$  кэВ  $^{57}\text{Co}$ , полученная в режиме ускорения и без него.

Авторы выражают благодарность С.К.Васильеву, О.Драгоуну и А.Ковалику за помощь в работе и полезные обсуждения.

Рис.13. Форма линии  $K_{14,4}$  кэВ ( $^{57}\text{Co}$ ), полученная в режиме ускорения /сплошная линия/ и без него /пунктирная линия/.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Вылов Ц. и др. ОИЯИ, Р6-82-918, Дубна, 1982. в сб.: Прикладная ядерная спектроскопия, Энергоиздат, М., 1984, в.13, с.12. Nucl. Instr. and Meth., 1984, 221, р.547.
2. Альфа-, бета- и гамма-спектроскопия /Под ред.К.Зигбана/, Атомиздат, М., в.1, с.99.
3. Афанасьев В.П., Явор С.Л. Электростатические энергоанализаторы для пучков заряженных частиц. "Наука", М., 1978, с.42.
4. Sharber J.R. et al. IEEE Trans. Nucl. Sci., 1968, NS-15, р.536.
5. Арнольди Р.Л. и др. Приборы для научных исследований. 1973, 44, № 2, с.73.
6. Bosqued J.M., Reme H. Nucl. Instr. and Meth., 1967, 57, р.6.
7. Bordoni F. Nucl. Instr. and Meth., 1971, 97, р.405.
8. Porter F.T. and Freedman M.S. Phys.Rev., 1971, C3, р.2285.
9. Takagi Sh. et al. Jap.J.Appl.Phys., 1983, 22, No, 9, р.1453.

Рукопись поступила в издательский отдел  
1 ноября 1985 года.