

P13-2008-30

А. И. Калинин, В. Г. Чумин, В. И. Фоминых, Ж. К. Саматов

**КОМПАКТНЫЙ СЕПАРАТОР  
МОНОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ**

Направлено в журнал «Приборы и техника эксперимента»

Калинин А. И. и др.

P13-2008-30

Компактный сепаратор моноэнергетических электронов

Описывается сепаратор моноэнергетических электронов на основе двух видов сборок магнитных фильтров типа «мини-апельсин» (по 6 магнитов в каждой). В качестве источника электронов используется изотоп  $^{207}\text{Bi}$ , активность 240 кБк (7 мКи), излучающий конверсионные электроны K1063 и K1770. В зависимости от видаборок интенсивность электронов с энергией  $\sim 970$  и  $\sim 1680$  кэВ сопровождается соответственно 3- и 4-кратным увеличением интенсивности излучений по сравнению с измерениями без магнитных фильтров, с энергетическим разрешением  $\sim 30$  кэВ. Однократная откачка камеры обеспечивала постоянство параметров прибора в течение одного месяца.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Дзелепова ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2008

Kalinin A. I. et al.

P13-2008-30

The Separator of the Mono-Energy Electrons

The separator of the mono-energy electrons employing two types of the mini-orange form magnetic filters assemblies (by 6 magnets in each) is described. The isotope  $^{207}\text{Bi}$  with radioactivity 240 kBq (7 mCi) is used as an electron source radiating conversion electrons K1063 and K1770. Electrons with the energy  $\sim 970$  and  $\sim 1680$  keV are accompanied by the 3- and 4-times radiation intensity increases depending on the assembly type accordingly in comparison with measurements without magnetic filters, with the energy resolution  $\sim 20$  keV. The one-fold pumping-out of the cell provided the instrument parameters constancy in the course of one month.

The investigation has been performed at the Dzhelepov Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2008

## ВВЕДЕНИЕ

В физике высоких энергий используются сотни позиционно-чувствительных детекторов на основе пластика. Обычно они выполняются в виде набора параллельных сцинтилляционных стрипов, информация с которых выводится на ФЭУ с помощью спектросмещающих оптических волокон. Как правило, эти детекторы перед окончательной установкой проходят предварительный отбор, настройку и калибровку [1]. Общепринято калибровать и изучать такие сцинтилляционные детекторы при помощи космических мюонов, которые имеют высокую проникающую способность и создают минимальные ионизирующие потери (МИП) энергии в детекторе. Однако для набора необходимой статистики такая калибровка требует много времени, так как поток космических мюонов очень мал, примерно  $1/\text{дм}^2 \cdot \text{с}$ . Поэтому естественно желание экспериментаторов калибровать аппаратуру более интенсивными источниками излучений, например, радиоактивными источниками электронов достаточно высокой энергии. Возможность такой замены объясняется тем, что электроны уже при энергии 1 МэВ становятся релятивистскими, и это значит, что энергетические потери электронов в пластике практически такие же, как и у мюонов, примерно  $2 \text{ МэВ}/\text{см}^2$ .

Для изучения световых выходов в различных сцинтилляционных материалах, которые зависят от качества сцинтиллятора, технологии изготовления, времени эксплуатации и пр., нужен моноэнергетический источник электронов, желательна с энергией  $\sim 1 \text{ МэВ}$ .

Чаще всего для этого применяют источники на основе бета-распада  $^{90}\text{Sr}$  ( $E_{\text{макс}} = 2,3 \text{ МэВ}$ ) или  $^{106}\text{Ru}$  ( $E_{\text{макс}} = 3,5 \text{ МэВ}$ ). В этих источниках спектры электронов непрерывные и простираются от 0 до  $E_{\text{макс}}$ , причем максимум интенсивности находится около  $E_{\text{макс}}/3$ . Таким образом, если для калибровки использовать верхнюю часть спектра, то большая, самая интенсивная часть спектра остается помехой, фоном. Избавиться от нее непросто даже при помощи магнитной селекции, так как мощная фоновая составляющая, даже подавленная магнитным фильтром, создает ощутимый вклад в выходной спектр после рассеяния в стенках.

Известен опыт создания электронной пушки на основе  $^{106}\text{Ru}$  [1] с магнитной селекцией в одной плоскости. С достаточно активным источником  $\sim 2 \text{ мКи}$  после выходного коллиматора диаметром 27 мм получен поток электронов  $2000 \text{ с}^{-1}$  с разбросом по энергии 35 %.

Для настройки скintилляционных стрипов во Франции был изготовлен магнитный генератор электронов на основе  $^{90}\text{Sr}$  [2]. Диаметр выходного коллиматора для отбора моноэнергетических электронов после поворота на  $90^\circ$  составлял около 1 мм, и для получения потока электронов  $1000 \text{ с}^{-1}$  также требовался источник с очень высокой активностью (десятки мКи).

Использовать ускорители электронов не всегда возможно. В какой-то степени решать такие задачи можно с помощью магнитных бета-спектрометров, применяемых в бета-спектроскопии [3, 4].

### 1. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Мы предлагаем сепаратор, состоящий из дюралевого тубуса, источника излучения электронов и двух сменных сборок постоянных магнитов (рис. 1).

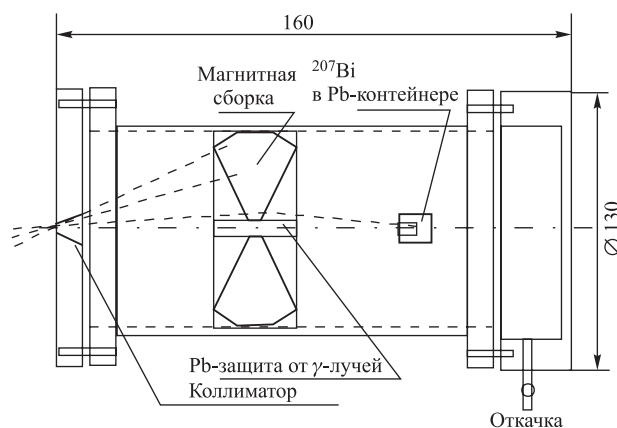


Рис. 1. Эскиз сепаратора с использованием магнитных фильтров и радиоактивного источника  $^{207}\text{Bi}$

В качестве эмиттера электронов взят изотоп  $^{207}\text{Bi}$  ( $T_{1/2} = 31,8$  лет) с линиями конверсионных электронов от трех далеко отстоящих друг от друга гамма-переходов: 569 кэВ ( $\gamma$  97,74 %,  $I_{K+L+M}/I_\gamma = 0,022$ ), 1063 кэВ ( $\gamma$  75,5 %,  $I_{K+L+M}/I_\gamma = 0,134$ ) и 1770 кэВ ( $\gamma$  6,95 %,  $I_{K+L+M}/I_\gamma = 0,0043$ ). Источник был изготовлен на ускорителе ЛЯП ОИЯИ методом внедрения в тефлоновую подложку с помощью масс-сепаратора [5] и позволял проводить измерения в вакуумной среде. Активность эмиттера составляла 240 кБк.

Мы располагали набором постоянных магнитов производства фирмы Brown-Boweri (Швейцария) из материала RECOMA-20 [6]. Магниты имеют клинообразную форму, высоту 38 мм и толщину около центра поглотителя

2 мм и с наружной стороны 15 мм (тип 6А) и 7,5 мм (тип 6В). Каждая сборка состояла из шести магнитов, которые вдвигались во внутренние пазы Al-цилиндра (внешний диаметр равен 62 мм) и фиксировались с помощью внутреннего цилиндра из Pb, выполнявшего параллельно функцию защиты от гамма-лучей (при этом общая длина поглотителя гамма-лучей составила  $\sim 70$  мм). Остаточная индукция материала магнитов  $B_r = 0,95$  Тл.

Для исследований спектров электронов применялся HPGe-детектор диаметром 16 мм, с глубиной чувствительного слоя 9 мм, с входным окном из титана толщиной  $0,6 \text{ мг/см}^2$ . Он выбран из тех соображений, что может регистрировать и электроны, и гамма-лучи, что важно для получения информации о виде излучений на выходе сепаратора.

Рис. 2, а, б иллюстрирует эти возможности.

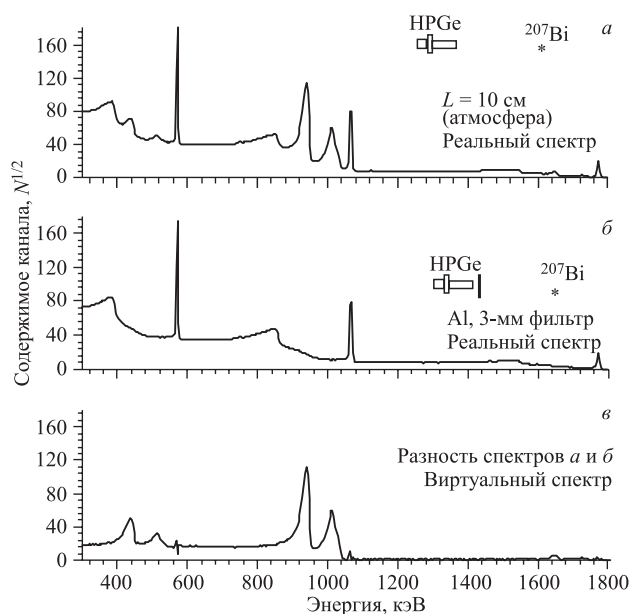


Рис. 2. Спектры  $^{207}\text{Bi}$ , измеренные HPGe-детектором

Приведенный на рис. 2, в виртуальный (разностный) спектр получен искусственно — вычитанием спектра 2, б, предварительно измеренного с алюминиевым 3-мм фильтром, установленным перед детектором, из спектра 2, а, измеренного без Al-фильтра, что позволяет увидеть только спектр электронов.

На рис. 3 приведены виртуальные (разностные) спектры электронов  $^{207}\text{Bi}$ , полученные путем вычитания  $\gamma$ -спектра, измеренного с использованием алюминиевого 3-мм фильтра из  $\gamma$ -спектра, измеренного без фильтра, как показано на рис. 2:

- в вакууме без магнитов (рис. 3, *а*);
- в вакууме, с магнитным фильтром типа 6В (рис. 3, *б*). При этом интенсивность электронов в области  $\sim 0,94$  МэВ увеличивается в  $\sim 3$  раза;
- в вакууме, с магнитным фильтром типа 6А (рис. 3, *в*). Интенсивность электронов в области  $\sim 1,65$  МэВ увеличивается в  $\sim 10$  раз.

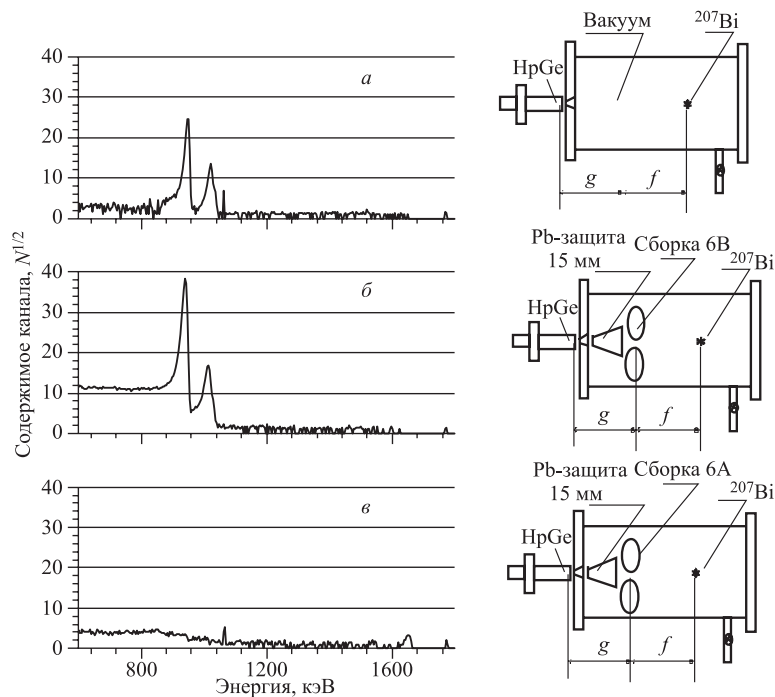


Рис. 3. Виртуальные спектры электронов с различными магнитными сборками после коррекции по результатам дополнительных измерений с алюминиевым 3-мм фильтром

На рис. 4 показаны реальные спектры электронов  $^{207}\text{Bi}$ , полученные с дополнительной Pb-защитой от сопутствующего  $\gamma$ -излучения:

- в вакууме, с магнитным фильтром типа 6В (рис. 4, *а*), Pb-защита равна 45 мм;
- в вакууме, с магнитным фильтром типа 6А (рис. 4, *б*), Pb-защита равна 70 мм.

В табл. 1 приведены сравнительные результаты обработки виртуальных и реальных спектров излучений, измеренные HPGe-детектором и приведенные к 1-часовой экспозиции.

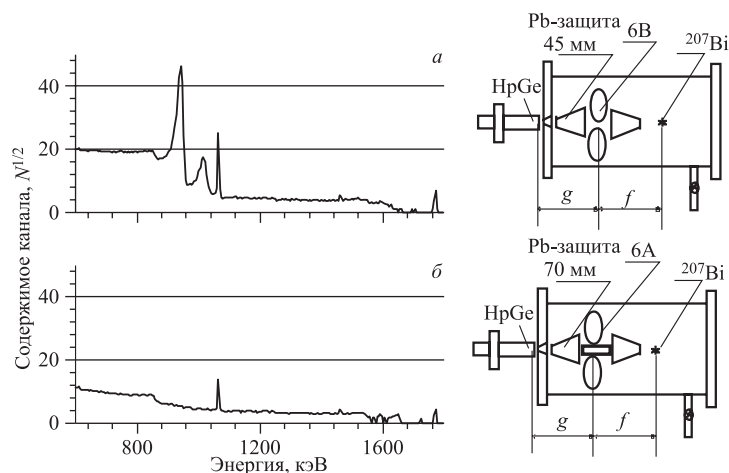


Рис. 4. Реальные спектры электронов, измеренные сепаратором с различными магнитными сборками с Pb-защитой от сопутствующего  $\gamma$ -излучения

**Таблица 1. Результаты обработки виртуальных и реальных спектров электронов**

	Рисунок	$E_{K,L,M_{1063}}$ , кэВ	$I_{K,L,M_{1063}}$ , $\text{ч}^{-1}$	fwhm, кэВ	$E_{K_{1770}}$ , кэВ	$I_{1770}$ , $\text{ч}^{-1}$	fwhm, кэВ
Без магнитов, без коллиматора (В)	2, в	932(3)	96480(230)	17(3)	1659(2)	133(15)	14(3)
Без магнитов, с коллиматором (В)	3, а	943(4)	4260(140)	15(3)	1630(12)	15(5)	8(5)
Магнит 6В с коллиматором (В)	3, б	931(7)	11050(130)	20(3)	—	—	—
Магнит 6А с коллиматором (В)	3, в	930(18)	51(15)	38(7)	1647(2)	54(17)	15(5)
Магнит 6В с коллиматором (Р)	4, а	928(45)	9054(141)	31(8)	—	—	—
Магнит 6А с коллиматором (Р)	4, б	—	—	—	1639(7)	32(7)	17(5)

*Примечание.* (В) — виртуальные спектры, (Р) — реальные спектры.

## 2. ВЫБОР КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ

Достоинство магнитного сепаратора на основе «мини-апелесина» состоит в его высокой светосиле, так как электроны, прошедшие магнитный фильтр, собираются от точечного источника из большего телесного угла, чем в случае

плоского фильтра, что позволяет работать с малоактивным радиоактивным источником.

Для выбора оптимальных конструктивных решений были проведены предварительные измерения зависимости регистрации интенсивности электронов от соотношения расстояний детектор – осевая линия сборки магнитов ( $g$ ) и осевая линия сборки магнитов – радиоактивный источник ( $f$ ). Результаты представлены на рис. 5.

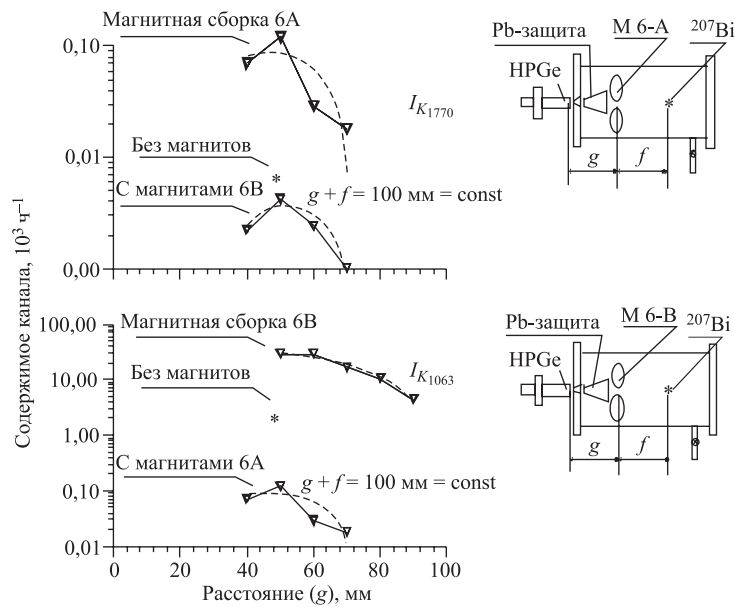


Рис. 5. Зависимости интенсивности электронов от взаимного расположения магнитных сборок, источника и детектора излучений

Анализ полученных результатов позволил, во-первых, сделать заключение о том, что максимальная интенсивность электронов достигается при симметричном расположении детектора и источника относительно осевой линии магнитной сборки (это согласуется с выводами авторов работы [7]), и, во-вторых, определиться в выборе оптимального расстояния детектор–источник, равного 100 мм.

### 3. КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ОЦЕНКИ ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИБОРА НА ОСНОВЕ ФУНКЦИИ ОТКЛИКА

Для получения из приборного (искаженного эффектами обратного и бокового рассеяния, вылетами электронов, рассеянием в атмосфере и др.) ис-



тинного (идеального) спектра электронов на выходе сепаратора необходимо восстановить первичную форму спектра.

Строгий подход к восстановлению первичной формы спектра требует определения функции отклика используемого детектора в соответствующем диапазоне энергий.

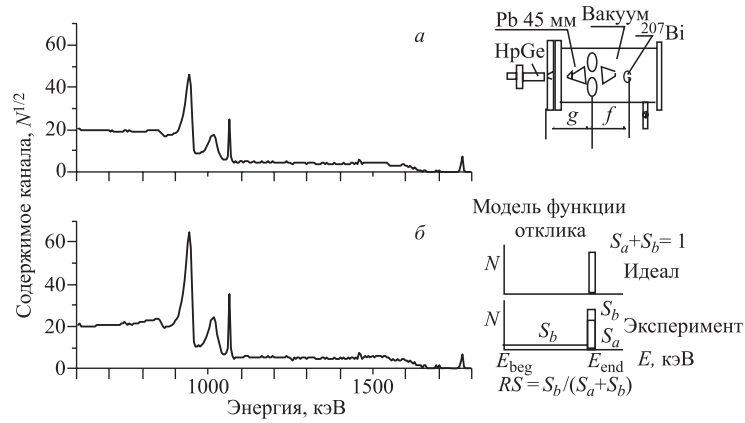


Рис. 6. Восстановленный (б) с помощью функции отклика спектр с магнитной сборкой 6В. Модель функции отклика

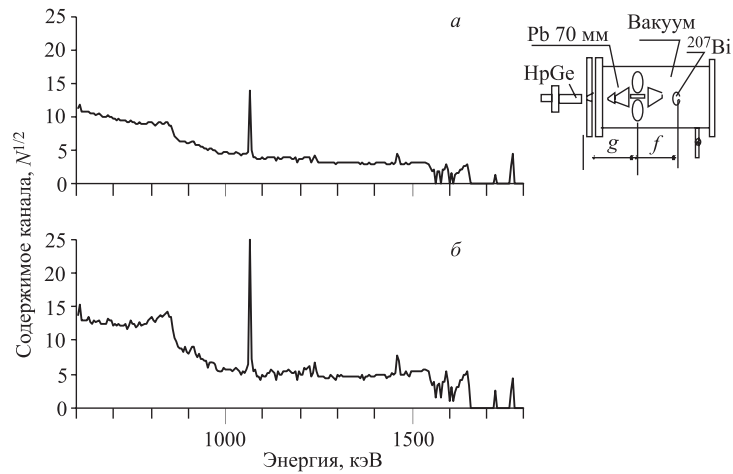


Рис. 7. Восстановленный (б) с помощью функции отклика спектр с магнитной сборкой 6А

Определение функции отклика детектора является сложной задачей, так как требуется набор источников моноэнергетических электронов. В [8–10] показано, что в диапазоне энергий до  $\sim 4$  МэВ функция отклика состоит из основного пика  $S_a$  и плоского хвоста в области меньших энергий  $S_b$  (рис. 6).

Мы выбрали упрощенную форму функции отклика с использованием простых математических методов, опираясь только на первое приближение, без решений уравнений Фредгольма 2-го порядка.

Количественные значения основного параметра функции отклика  $RS = S_b/(S_a + S_b)$  определялись из виртуальных спектров, представляющих спектры электронов, очищенные от  $\gamma$ -лучей. Эти значения в дальнейшем применялись к реальным спектрам. В табл. 2 и на рис. 6, 7 представлены результаты обработки экспериментальных спектров с использованием Рb-защиты от гамма-лучей, восстановленных с использованием функции отклика.

**Таблица 2. Результаты обработки реальных спектров электронов, восстановленных с помощью функции отклика**

Магнит 6В с коллиматором $K, L, M_{1063}$ (рис. 6, б)	Магнит 6А с коллиматором $K_{1770}$ (рис. 7, б)
$I, \text{ч}^{-1}$ 19561(190)	$I, \text{ч}^{-1}$ 99(10)

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ

- Введение коллиматора диаметром 3,5 мм перед детектором приводит к уменьшению интенсивности электронов примерно в 20 раз.

- Применение магнитного фильтра со сборкой 6В позволяет увеличить интенсивность электронов с энергией  $\sim 940$  кэВ примерно в 3 раза. Энергетическое разрешение составляет около 20 кэВ.

- Применение магнитного фильтра со сборкой 6А позволяет увеличить интенсивность электронов с энергией  $\sim 1680$  кэВ примерно в 4 раза. Энергетическое разрешение составляет около 30 кэВ. Имеет место существенное уменьшение интенсивности электронов с энергией  $\sim 970$  кэВ.

- Восстановление формы спектров электронов посредством применения функции отклика позволило отобразить более реальную форму спектрального распределения электронов на выходе сепаратора. При этом интенсивность электронов оказалась примерно в два раза больше, чем в экспериментальных спектрах.

• При использовании магнитной сборки 6В интенсивность  $K + L + M$ -электронов перехода 1063 кэВ составляет  $\sim 19 \cdot 10^3 \text{ ч}^{-1}$ . Конверсионные электроны  $K_{1770}$  практически отсечены.

• При использовании сборки 6А интенсивность электронов  $K_{1770}$  равна  $\sim 100 \text{ ч}^{-1}$ . Интенсивность электронов  $K_{1063}$  подавлена в  $\sim 100$  раз.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для получения пучков электронов от радиоактивного источника  $^{207}\text{Bi}$  был разработан, изготовлен и опробован компактный сепаратор электронов, состоящий из дюралевой камеры и двух сменных «мини-апельсинов» (сборки магнитов типа 6А и 6В фирмы Brown-Bowen), который может быть применен при изучении световых выходов в различных сцинтилляционных материалах, зависящих от качества сцинтиллятора, технологии изготовления, времени эксплуатации и пр.

Сепаратор может также использоваться в ядерной спектроскопии, например, для определения коэффициентов внутренней конверсии.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 04-02-17144).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Головкин С. В., Зайцев А. М. // ПТЭ. 1977. № 4. С. 21.
2. Adam T. A. et al. // NIM. A. 2007. V. 577, No. 3. P. 523–539.
3. Зигбан К. Альфа-бета- и гамма-спектроскопия. М.: Атомиздат, 1969.
4. Вылов Ц. и др. Спектры излучений радиоактивных нуклидов. Ташкент: Изд-во «ФАН», 1980.
5. Kalinnikov V. G. et al. // NIM. B. 1992. V. 70. P. 62.
6. Гуяш Я. и др. // ПТЭ. 1984. № 3. С. 53.
7. Горожанкин В. М. и др. // ПТЭ. 1997. №3. С. 8.
8. Веселов В. Г. и др. // Изв. РАН. 1995. Т. 59, № 1. С. 39.
9. Rehfeld D. M., Moore R. B. // NIM. 1978. V. 157. P. 365–387.
10. Decker R., Wunsch K.-D., Wollnik H. // NIM. 1982. V. 192. P. 261–272.

Получено 26 февраля 2008 г.

Редактор *Е. В. Сабеева*

Подписано в печать 04.06.2008.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,75. Уч.-изд. л. 0,91. Тираж 305 экз. Заказ № 56194.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: [publish@jinr.ru](mailto:publish@jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)