

P6-2004-219

В. Б. Бруданин, Н. И. Рухадзе, Ш. Бриансон¹,
П. Бенеш², Ц. Вылов, К. Н. Гусев, В. Г. Егоров,
А. А. Клименко, В. Э. Коваленко, Н. А. Королев,
А. В. Саламатин, В. В. Тимкин, П. Чермак²,
М. В. Ширченко, Ю. А. Шитов, И. Штекл²

ЭКСПЕРИМЕНТ TGV ПО ПОИСКУ ДВОЙНОГО
ЭЛЕКТРОННОГО ЗАХВАТА

¹Центр ядерной спектрометрии и масс-спектрометрии, Орсэ, Франция

²Чешский технический университет, Прага

Эксперимент TGV по поиску двойного электронного захвата

На низкофоновом многодетекторном спектрометре TGV-2 (телескоп германиевый вертикальный) проведены первые исследования редкого ядерного процесса — двойного электронного захвата в распаде ^{106}Cd . Приведены предварительные результаты обработки измерений с 11,3 и 10 г обогащенного ^{106}Cd и 14,5 г натурального Cd. Из измерений с натуральным Cd определена чувствительность спектрометра к обнаружению двойного электронного захвата ^{106}Cd на основное состояние ($0^+ - 0^+$) дочернего ядра — $T_{1/2}^{EC/EC} > 2,6 \cdot 10^{19}$ лет (на 90%-м уровне достоверности).

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

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2004

Searching of Double Electron Capture in the TGV Experiment

The first investigations of the rare nuclear process — double electron capture of ^{106}Cd have been performed using the low-background multi-detector spectrometer TGV-2 (Telescope Germanium Vertical). The preliminary results of calculations of experimental data obtained using 11.3 and 10 g of enriched ^{106}Cd , and 14.5 g of natural Cd were presented. The sensitivity of $T_{1/2}^{EC/EC} > 2.6 \cdot 10^{19}$ y (90% CL) was obtained for the searching of double electron capture of ^{106}Cd ($0^+ - 0^+$) in the investigation of natural Cd.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2004

ВВЕДЕНИЕ

Исследование ультраредких процессов двойного бета-распада ($\beta^-\beta^-$, $\beta^+\beta^+$, β^+/EC , EC/EC) имеет важнейшее значение для физики частиц и ядерной физики как чувствительный инструмент изучения закона сохранения лептонного заряда и свойств нейтрино [1, 2]. Двойной бета-распад маловероятен. Он может экспериментально наблюдаться только при отсутствии или сильном запрете конкурирующих процессов (обычно на стабильных четно-четных ядрах). Вероятность процесса возрастает с увеличением энергии распада. В исследованиях двойного бета-распада основное внимание уделялось относительно более вероятному процессу с испусканием двух электронов ($\beta^-\beta^-$). Однако остальные виды двойного бета-распада также важны, и интерес к их изучению в последнее время значительно возрос. Процесс с испусканием двух позитронов ($\beta^+\beta^+$) всегда сопровождается процессом β^+/EC -распада и двойным электронным захватом (EC/EC). При этом электронный захват энергетически более предпочтителен, чем испускание позитрона. Наиболее привлекательными кандидатами для исследования двухнейтринной и безнейтринной мод двойного бета-распада и двойного электронного захвата являются ^{48}Ca ($Q_{\beta\beta}=4272$ кэВ) и ^{106}Cd ($Q_{\text{EC}/\text{EC}}=2778$ кэВ). Однако низкая природная распространенность (0,187% для ^{48}Ca и 1,25% для ^{106}Cd) и невозможность производства таких изотопов в достаточных количествах значительно осложняют изучение этих редких процессов. Указанная проблема может быть частично решена путем использования спектрометра с экстремально высокой эффективностью для изучения пассивных (внешних) источников. На основе опыта, полученного при исследовании $2\nu\beta^-\beta^-$ и $0\nu\beta^-\beta^-$ -распада ^{48}Ca на спектрометре TGV [3–6], в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ был разработан низкофоновый многодетекторный спектрометр TGV-2 (Телескоп Германиевый Вертикальный) [7]. Спектрометр TGV-2 предназначен для исследования редких ядерных процессов, таких как двойной бета-распад, двойной электронный захват и др. Основное отличие TGV-2 состоит в значительно большем чувствительном объеме и эффективности детекторов. Соответственно, возросла и масса измеряемых образцов (при тех же требованиях к их толщине [3–7]). Для предотвращения увеличения фона, вызванного увеличением массы окружающих детекторы конструкционных материалов, в детекторной части TGV-2 используются материалы с очень низким содержанием радиоактивных примесей.

Широкий энергетический диапазон спектрометра TGV-2 (от единиц кэВ до нескольких МэВ) и высокая эффективность регистрации γ - β - и КХ-излучения позволяют провести как изучение двойного бета-распада ^{48}Ca ($Q =$

4272 кэВ), так и первое прямое исследование двойного электронного захвата в распаде ^{106}Cd (рис. 1), в том числе и на основное состояние ($0^+ - 0^+$)

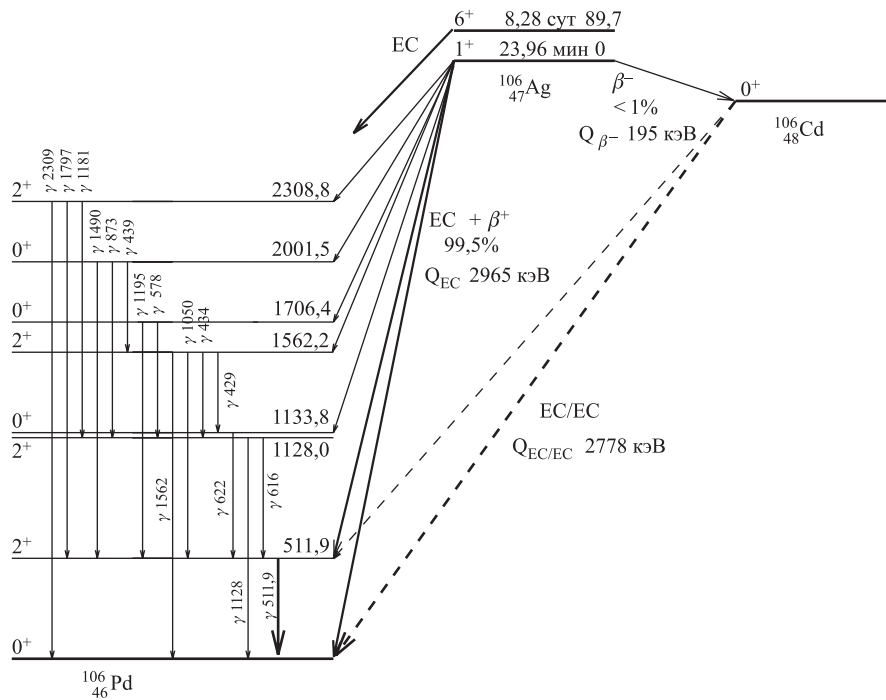


Рис. 1. Схема распада ^{106}Cd

дочернего ядра. В последнем случае в соседних детекторах будут регистрироваться только два кванта характеристического КХ-излучения с энергией порядка 20 кэВ, вылет которых сопровождает этот переход. Исходя из теоретических расчетов период полураспада для двухнейтринной моды двойного электронного захвата ^{106}Cd составляет порядка $(1\text{E} + 20)$ лет.

1. СПЕКТРОМЕТР TGV-2

Спектрометр TGV-2 создан на основе 32 планарных детекторов из особо чистого германия с чувствительным объемом $2040 \text{ мм}^2 \times 6 \text{ мм}$ каждый (около 3 кг германия). Детекторы смонтированы вертикально друг над другом вместе

с тонкими ($50\text{--}100\text{ мг/см}^2$) однородными источниками двойного бета-распада в центральной части ультранизкофонового U-образного криостата специальной конструкции [7]. Конструкционные детали вблизи детекторов и части криостата сделаны из материалов с экстремально низким содержанием радиоактивных примесей ($U + Th < 0,1\text{ ppb}$). Расстояние между поверхностями детекторов и источниками двойного бета-распада $< 1,5\text{ мм}$. Общий чувствительный объем детекторов составляет около 400 см^3 . Энергетическое разрешение детекторов находится в диапазоне от 3,0 до 4,0 кэВ (^{60}Co 1332 кэВ).

Детекторная часть TGV-2 (рис. 2) помещена в пассивную защиту из меди (20 см), под герметичный противорадоновый колпак из стали, пассивную за-

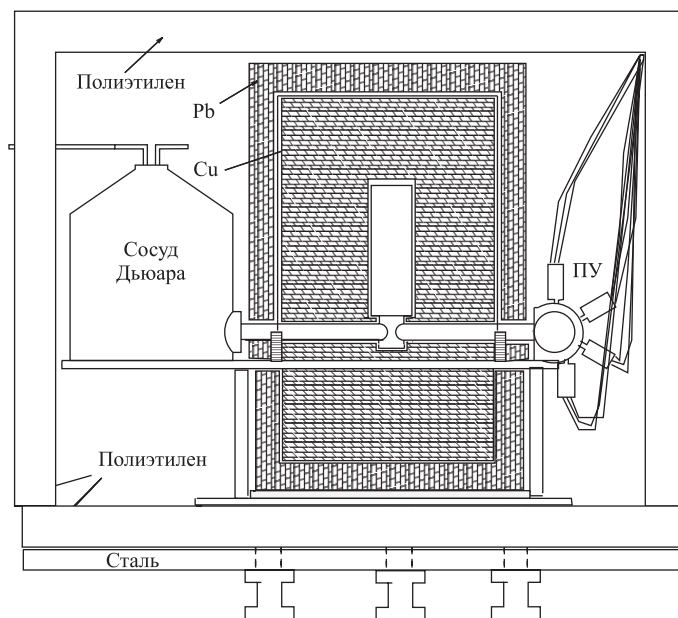


Рис. 2. Спектрометр TGV-2 в пассивной защите

щиту из свинца (10 см) и нейтронную защиту из борированного полиэтилена (16 см). Спектрометр TGV-2 смонтирован в Моданской подземной лаборатории (Франция) на глубине, соответствующей 4800 м водного эквивалента (в. э.).

Для спектрометра TGV-2 разработаны два варианта электронной схемы в зависимости от решаемой задачи — изучение двойного бета-распада либо двойного электронного захвата [7]. Неизменными в обоих случаях являются

32 предусилителя (ПУ), 32 спектрометрических усилителя (СУ), блок высокого напряжения и блок низковольтного питания (для предусилителей).

При измерении двойного бета-распада на TGV-2 используется электронная схема, аналогичная схеме спектрометра TGV [3, 4], с увеличением числа каналов до 32. При этом каждый канал содержит зарядочувствительный предусилитель, спектрометрический и два быстрых усилителя, временную привязку, аналого-, зарядо- и время-цифровой преобразователи.

При измерении двойного электронного захвата энергия полезных событий составляет порядка 20 кэВ. В этом диапазоне энергий временной тракт не обеспечивает надежную временную привязку (на фоне электронных шумов) и эффективный отбор полезных событий. Поэтому в указанных измерениях вместо быстрых усилителей используются дополнительные спектрометрические усилители с различной полосой пропускания (постоянная формирования основного усилителя — 2 мкс, дополнительного — 8 мкс) (рис. 3).

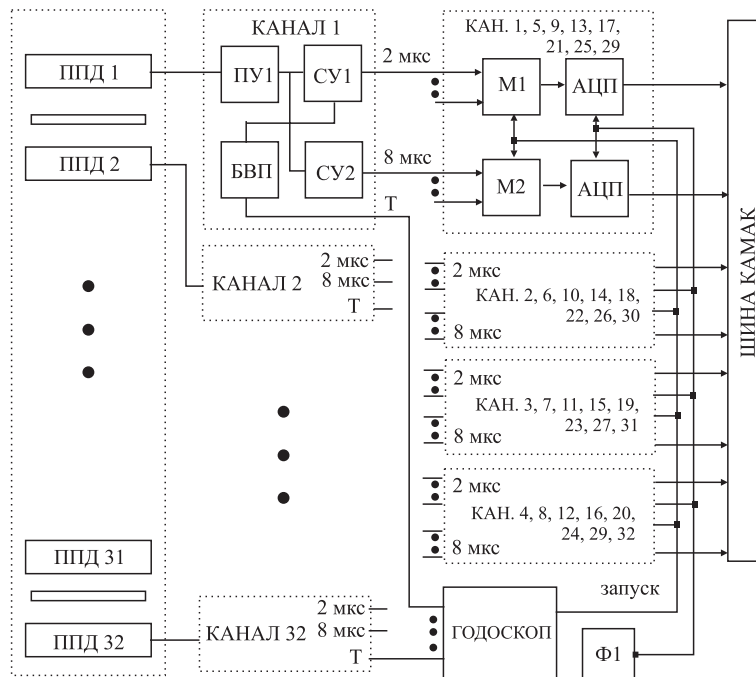


Рис. 3. Электронная блок-схема спектрометра TGV-2 при изучении двойного электронного захвата

При этом один из основных усилителей каждого канала выдает дополнительный импульс, используемый для фиксации (временной отметки) событий и для регистрации совпадений. В этой схеме вместо зарядо-цифровых преобразователей, используются дополнительные аналого-цифровые преобразователи (АЦП). В остальном регистрация и запись событий производится аналогично первому варианту. Для уменьшения числа АЦП используются мультиплексоры (М) на восемь входов. Сигналы на мультиплексор подаются с каждого четвертого усилителя (напр., первый, пятый, девятый, ...).

При изучении двойного электронного захвата производится предварительный отбор полезных событий и отбрасывание «шумовых» импульсов (электронные шумы, «микрофонный» эффект). Отбор основан на использовании для каждого детектора двух спектрометрических трактов с различной полосой пропускания (2 и 8 мкс или 4 и 12 мкс). Для примера на рис. 4 приведена за-

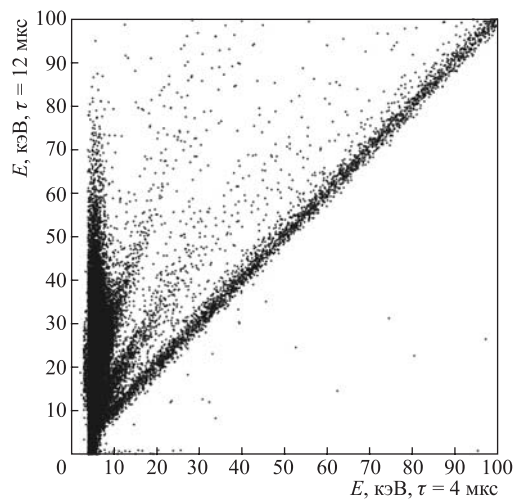


Рис. 4. Матрица зависимости $E1(4 \text{ мкс})/E2(12 \text{ мкс})$ в диапазоне энергий до 100 кэВ

висимость между энергиями, полученными в разных трактах при регистрации одних и тех же событий в измерениях фона спектрометра (матрица $E1/E2$). Для нормальных событий отношение между амплитудами (энергией) импульсов после усилителей в матрице будет примерно постоянным — прямая линия из нижнего левого угла в правый верхний угол. Для шумовых импульсов это соотношение не постоянно: они находятся в любом месте матрицы. Путем отбора событий, находящихся на указанной прямой, шумовые импульсы могут быть сильно подавлены (рис. 5).

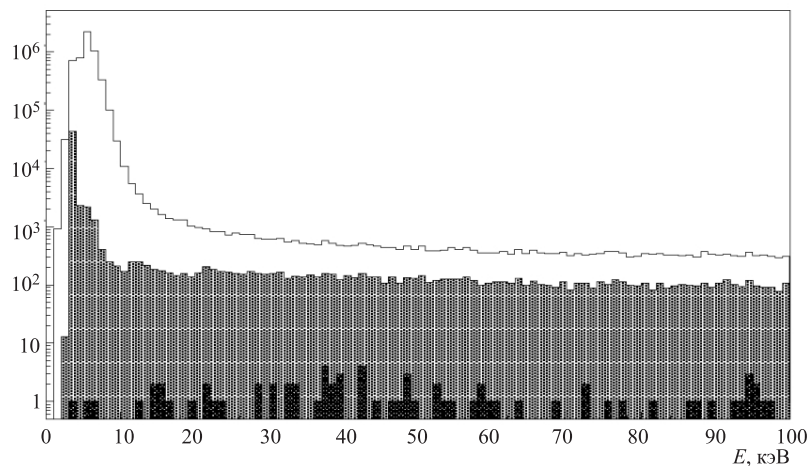


Рис. 5. Спектры, полученные из матрицы $E1(4 \text{ мкс})/E2(12 \text{ мкс})$ для случаев без отбора (верхний спектр), подавления микрофонных шумов (средний спектр) и дополнительного отбора двойных совпадений (нижний спектр) с соседними детекторами в диапазоне энергий 17–27 кэВ

2. ЭКСПЕРИМЕНТ

В течение 2004 г. на спектрометре TGV-2 были проведены фоновые измерения (без образцов) и несколько серий измерений по поиску двойного электронного захвата в распаде ^{106}Cd , а именно:

- две серии с образцами из обогащенного ^{106}Cd различного происхождения и разной степени обогащения;
- фоновые измерения с образцами из натурального Cd (эти измерения еще продолжаются).

В экспериментах с обогащенным ^{106}Cd одновременно измерялись и контрольные образцы из натурального Cd, изготовленные по той же технологии, что и образцы из обогащенного ^{106}Cd . Толщина образцов из ^{106}Cd и натурального Cd, изготовленных путем проката металлического кадмия, составляла $\approx 50 \text{ мкм}$. Она была выбрана на основе результатов моделирования методом Монте-Карло [7] процессов образования КХ-излучения Pd, его прохождения через образец и регистрации детекторами. Диаметр образцов выбирался исходя из размеров входного окна детекторов и составлял 52 мм. Измерения проводились в Моданской подземной лаборатории (4800 м в.э.). Обработка полученных экспериментальных данных проводилась с использованием пакетов программ PAW и ROOT.

В первой экспозиции с обогащенным ^{106}Cd продолжительностью 1768 часов исследовались 13 образцов из ^{106}Cd (обогащение $\approx 60\%$) общей массой $\approx 11,3$ г и три образца из натурального Cd общей массой $\approx 2,4$ г. Полученные спектры одиночных и двойных событий (совпадения между соседними детекторами) для ^{106}Cd и натурального Cd приведены на рис. 6. Форма спек-

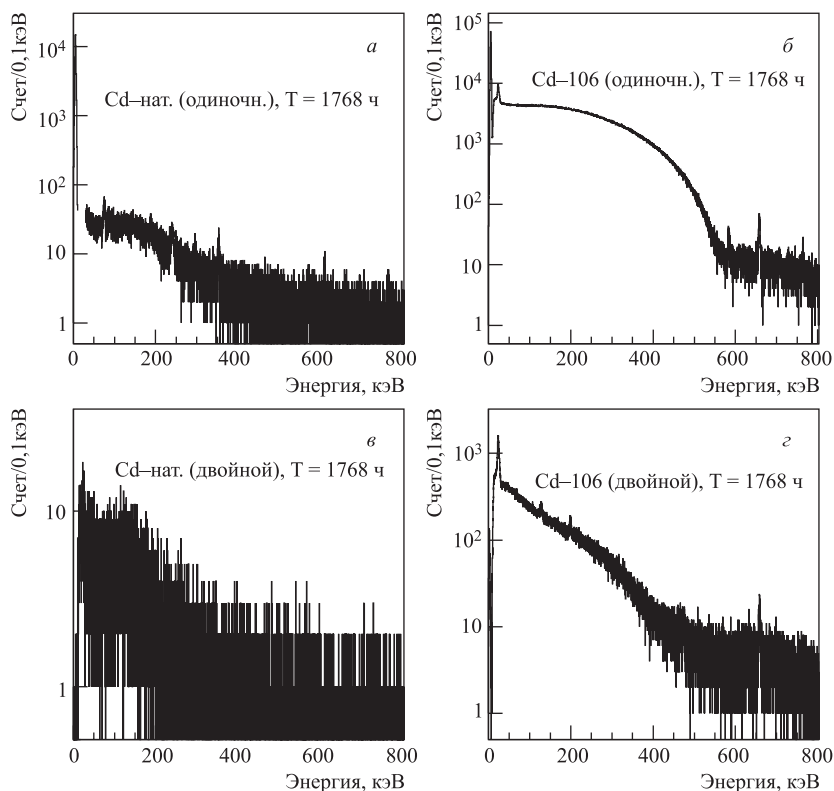


Рис. 6. Спектры одиночных (а, б) и двойных (в, г) событий, полученные для образцов натурального Cd (2,4 г) и ^{106}Cd (11,3 г)

тров образцов ^{106}Cd имеет вид, характерный для β -излучателей со следами гамма-пиков (127, 198, 325, 658 кэВ) и пиком в области КХ-излучения Cd. Форма спектров образцов ^{106}Cd имеет вид, характерный для β -излучателей со следами гамма-пиков (127, 198, 325, 658 кэВ) и пиком в области КХ-излучения Cd. Из приведенных спектров ^{106}Cd и дополнительных сортировок с установкой «окон» на гамма-пиках удалось идентифицировать наличие в

образцах обогащенного ^{106}Cd следующих радиоактивных загрязнений: ^{101}Rh ($T_{1/2}=3,3$ г, $Q_{EC}=541$ кэВ, $E_{\gamma} = 127, 198$ и 325 кэВ), ^{110m}Ag ($T_{1/2}=252$ дн, $Q_{\beta}=2893$ кэВ, $E_{\gamma} = 657,8$ кэВ) и ^{113m}Cd ($T_{1/2}=14$ лет, $\beta=586$ кэВ). Содержание радиоактивных примесей составляет для ^{101}Rh $5,2 \cdot 10^{-18}$ г/г (0,2 мБк/г), для ^{110m}Ag $2,2 \cdot 10^{-17}$ г/г (4 мБк/г), ^{113m}Cd $1,0 \cdot 10^{-13}$ г/г (830 мБк/г).

Во второй серии измерений с обогащенным ^{106}Cd , общей продолжительностью 3277 часов, исследовались 12 образцов из обогащенного ^{106}Cd (обогащение 67,9%) с общей массой $\approx 10,0$ г и четыре образца из натурального Cd общей массой $\approx 3,2$ г. Проведена предварительная обработка результатов 794 часов измерений указанной серии. Полученные спектры приведены на рис. 7. Радиоактивные загрязнения ^{101}Rh и ^{110m}Ag в этих образцах не обна-

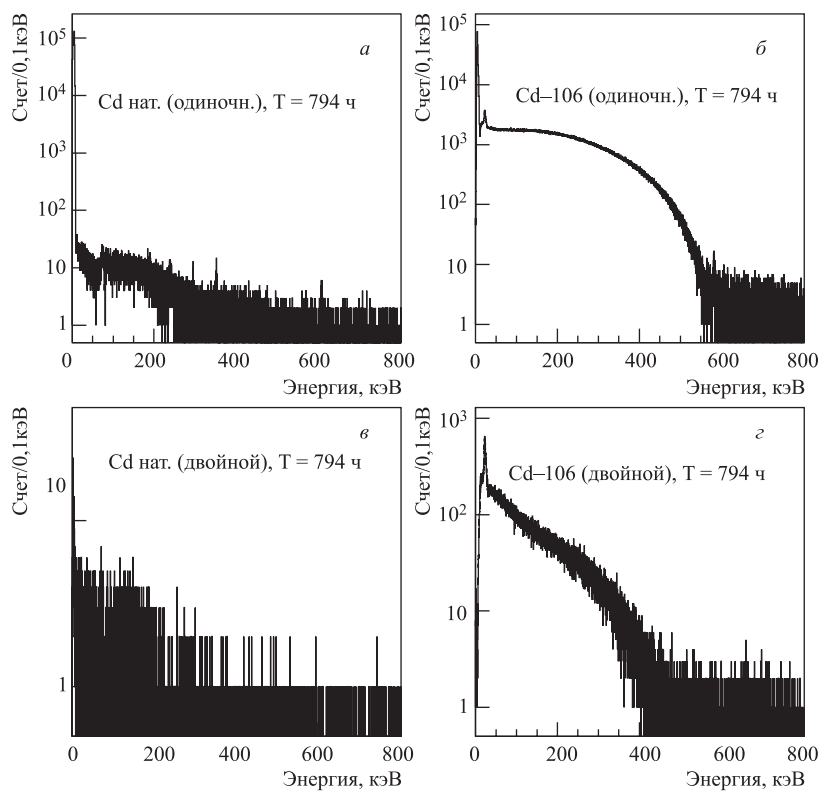


Рис. 7. Спектры одиночных (а, б) и двойных (в, г) событий, полученные для образцов натурального Cd (3,2 г) и ^{106}Cd (10,0 г)

ружены. Однако, так же как и в первой серии, в образцах имеется ^{113m}Cd (непрерывный бета-спектр и КХ-излучение в области 20 кэВ).

В текущей, третьей серии измерений, которая будет продолжена и в начале 2005 г., исследуются 16 образцов из натурального Cd общей массой $\approx 14,5$ г. В настоящее время обработаны данные за 593 ч. Полученные данные приведены на рис. 8

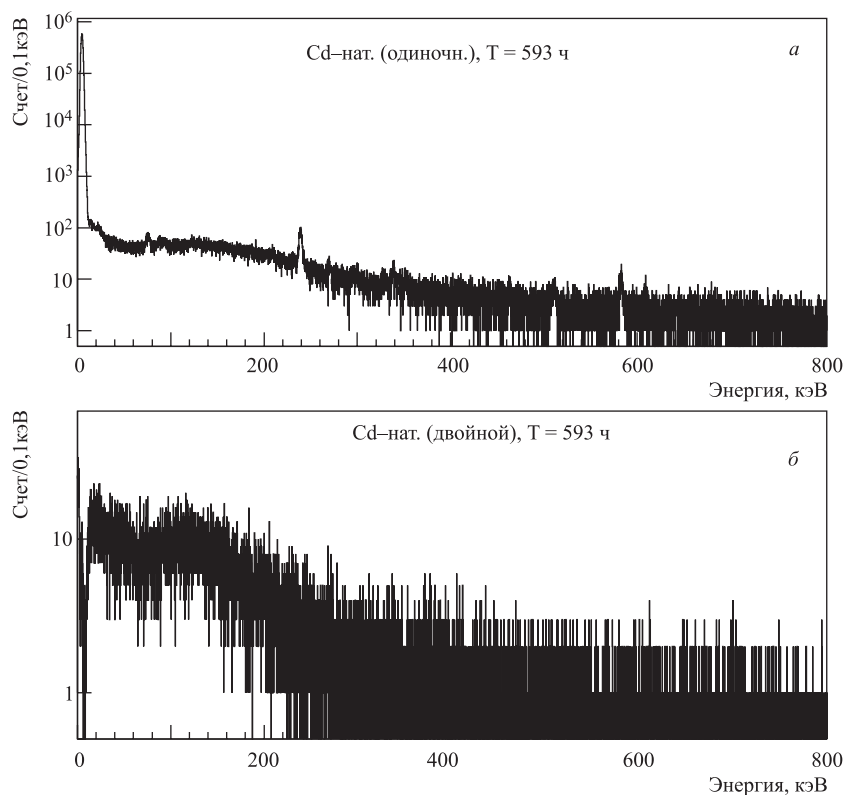


Рис. 8. Спектры одиночных (а) и двойных (б) событий полученные для образцов натурального Cd (14,5 г) за 593 ч измерений

ВЫВОДЫ

Проведенные измерения показали присутствие радиоактивных примесей в измеряемых образцах обогащенного ^{106}Cd . Наличие подобных примесей с содержанием на уровне $10^{-13} - 10^{-18}$ г/г практически не обнаруживается при измерениях на «обычных» низкофоновых спектрометрах. Измерения с обогащенным ^{106}Cd (другого происхождения) будут продолжены в 2005 г. Предел

чувствительности обнаружения возможного двойного электронного захвата ^{106}Cd составил в измерениях с обогащенным ^{106}Cd около $T_{1/2}^{EC/EC} > 1 \cdot 10^{19}$ лет, что значительно ниже теоретических оценок для искомого процесса. Из фонового измерения с образцами из натурального Cd чувствительность спектрометра к обнаружению двойного электронного захвата ^{106}Cd составляет $T_{1/2}^{EC/EC} > 2,6 \cdot 10^{19}$ лет, на 90%-м уровне достоверности. Эти результаты были получены из предварительной обработки данных. При проведении дополнительного подавления шумовых импульсов (согласно методике, приведенной выше) и корректном учете фона в совпадениях ограничения будут улучшены. Однако для существенного улучшения оценок необходимо использовать радиационно-чистый ^{106}Cd .

Эксперимент TGV проводится в Моданской подземной лаборатории в рамках соглашения 04-66 между IN2P3 и ОИЯИ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 04-02-16957) и агентства грантов Чешской Республики (контракт 202/02/0157).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Haxton W. C., Stephenson G. J.* // Prog. Part. Nucl. Phys. 1984. V. 12. P. 409.
2. *Tretyak V. I., Zdesenko Yu. G.* // Atomic Data and Nuclear Data Tables. 2002. V. 80. P. 83.
3. *Briancon Ch. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 1996. V. 372. P. 222.
4. *Бруданин В. Б. и др.* // Известия РАН, Сер. Физ. 1996. Т. 60. С. 137.
5. *Brudanin V. B. et al.* // Phys. Lett. B. 2000. V. 495. P. 63.
6. *Brudanin V. B. et al.* // Ядерная физика. 2000. Т. 63. С. 1292
7. *Бруданин В. Б. и др.* // Известия РАН, Сер. Физ. 2003. Т. 67. С. 618.

Получено 30 декабря 2004 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 24.02.2005.

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

Усл. печ. л. 0,63. Уч.-изд. л. 0,76. Тираж 310 экз. Заказ № 54804.

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

E-mail: publish@pds.jinr.ru

www.jinr.ru/publish/