

Р6-2003-233

В. Б. Бруданин, К. Я. Громов, С. И. Васильев,  
А. А. Клименко, А. А. Смольников, В. И. Фоминых,  
В. Г. Чумин

ГАММА-ЛУЧИ С ЭНЕРГИЕЙ БОЛЬШЕ 2000 кэВ  
В ЦЕПОЧКЕ РАСПАДОВ  $^{238}\text{U}$

Направлено в журнал «Письма в ЭЧАЯ»

В экспериментах по поиску двойного безнейтринного бета-распада  $^{76}\text{Ge}$  в спектрах HPGe-детекторов, обогащенных  $^{76}\text{Ge}$ , ищут линию с энергией  $Q_{2\beta}(^{76}\text{Ge}) = 2039,006(50)$  кэВ [1]. В случае обнаружения в спектре линии с такой энергией необходимо будет доказать, что нет других (фоновых) источников ее появления. В частности, сообщалось [2, 3], что в спектрах  $(2\beta, 0\nu)$ -экспериментов наблюдаются  $\gamma$ -лучи, возникающие в цепочке распадов  $^{238}\text{U}$ . Мы предприняли поиски  $\gamma$ -лучей с энергией 2039 кэВ при распаде нуклидов этой цепочки. В качестве источника  $\gamma$ -излучения был взят порошок закиси-окиси урана ( $\text{U}_3\text{O}_8$ ) массой 830,4 г. Рассчитанная активность источника  $8,6 \cdot 10^6$  Бк позволяла надеяться обнаружить  $\gamma$ -лучи очень малой интенсивности.

Гамма-спектр образца  $\text{U}_3\text{O}_8$  изучался на низкофоновой установке НИФОН (ЛЯП) [4], состоящей из многослойной пассивной защиты, собранной из специально отобранных по минимальному содержанию радиоактивных примесей материалов: свинца, электролитической бескислородной меди, борированного полиэтилена. Естественный радиоактивный фон в области  $E_\gamma \cong 2$  МэВ подавляется в 200 раз. В измерениях использовался HPGe-детектор (объем  $256 \text{ см}^3$ ,  $\text{FWHM} = 2$  кэВ для  $E_\gamma = 1332$  кэВ).

С экспозициями около 200 ч измерены  $\gamma$ -спектр образца  $\text{U}_3\text{O}_8$  и фоновый спектр. После вычета фона в спектре наблюдаются  $\gamma$ -лучи  $^{234}\text{Pa}$ , а также  $^{214}\text{Pb}$  и  $^{214}\text{Bi}$ . С использованием известных [5] относительных интенсивностей  $\gamma$ -лучей при распаде  $^{234}\text{Pa}$  и  $^{214}\text{Bi}$

построена кривая относительной эффективности регистрации  $\gamma$ -лучей от использованного образца  $U_3O_8$ . Полученная кривая пронормирована к абсолютной эффективности регистрации  $\gamma$ -лучей по самому интенсивному при распаде  $^{234m}Pa$   $\gamma$ -переходу с энергией 1001,0 кэВ (0,837 % распадов). После нормировки к абсолютной эффективности регистрации  $\gamma$ -лучей оказалось, что самые интенсивные при распаде  $^{214}Bi$   $\gamma$ -лучи 609,3 кэВ возникают в нашем источнике в 0,0064(7) % случаев распада  $^{238}U$ . После установления векового равновесия в цепочке распадов  $^{238}U$  интенсивность  $\gamma$ -лучей с энергией 609,3 кэВ должна равняться интенсивности этих  $\gamma$ -лучей на распад  $^{214}Bi$ , то есть 44,8 %. Значит, содержание  $^{214}Bi$  (и других нуклидов, следующих за распадом  $^{226}Ra$ ) в образце  $U_3O_8$  еще очень далеко от достижения равновесия с  $^{238}U$ . Это понятно, так как образованию  $^{214}Bi$  и других нуклидов, следующих за распадом  $^{226}Ra$ , предшествует образование долгоживущих  $^{234}U$  ( $T_{1/2} = 2,5 \cdot 10^5$  лет),  $^{230}Th$  ( $8 \cdot 10^4$  лет) и  $^{226}Ra$  ( $1,6 \cdot 10^3$  лет). Мы не знаем точно, когда был отделен использованный уран от руды, но очевидно, что не более чем за 50 лет до начала экспериментов. Вычисления показывают, что количество распадов  $^{214}Bi$  в использованном источнике должно быть не больше  $\sim 5 \cdot 10^{-4}$  % распадов  $^{238}U$ . Это позволяет заключить, что появление в измеренном спектре  $\gamma$ -лучей  $^{214}Bi$  и  $^{214}Pb$  обусловлено примесью  $^{226}Ra$  в количестве около 0,015 % распадов  $^{234}Pa$ . Заметим здесь, что и в экспериментах по исследованию  $(2\beta, 2\nu)$ - и  $(2\beta, 0\nu)$ -

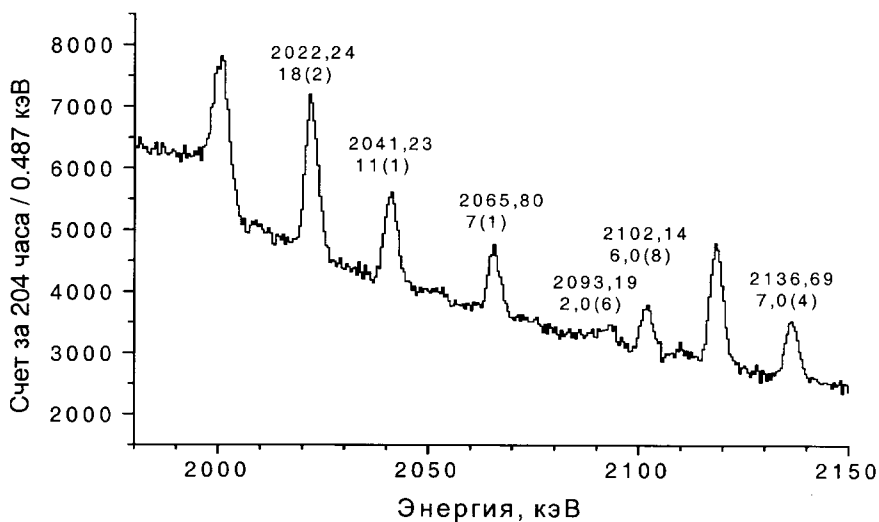
распадов  $^{76}\text{Ge}$  наблюдение в фоновых спектрах  $\gamma$ -лучей  $^{214}\text{Bi}$  и  $^{214}\text{Pb}$  также, возможно, связано с присутствием  $^{226}\text{Ra}$  между детектором и защитой.

Сведения об энергиях и интенсивностях ранее неизвестных  $\gamma$ -переходов представлены в таблице. На рисунке изображен спектр  $\gamma$ -лучей с энергией в области 2000–2150 кэВ. Полученные данные о спектре в области  $E_\gamma < 2000$  кэВ хорошо согласуются с результатами более ранних работ [6–8]. Наш эксперимент был направлен на поиски малоинтенсивных  $\gamma$ -лучей в области  $E_\gamma > 2000$  кэВ. Поэтому полученные данные о спектре в области  $E_\gamma < 2000$  кэВ мы не приводим.

Рассмотрим вопрос об идентификации новых  $\gamma$ -переходов с распадом определенного нуклида. Приписание их распаду нуклидов, испытывающих  $\alpha$ -распад, исключаем. Возникновение  $\gamma$ -лучей с  $E_\gamma > 2000$  кэВ при  $\alpha$ -распаде маловероятно. Гамма-лучи с  $E_\gamma > 2000$  кэВ могут возникать при  $\beta$ -распаде, если  $Q_\beta > 2000$  кэВ. Таких нуклидов в цепочке распадов  $^{238}\text{U}$  три:  $^{234}\text{Pa}$  ( $Q_\beta = 2207$  кэВ),  $^{214}\text{Bi}$  ( $Q_\beta = 3270$  кэВ) и  $^{210}\text{Tl}$  ( $Q_\beta = 5497$  кэВ) [5]. Выше было показано, что число распадов  $^{214}\text{Bi}$  в нашем источнике составляет  $1,5 \cdot 10^{-4}$  распадов  $^{238}\text{U}$ .  $^{210}\text{Tl}$  образуется в 0,021 % случаев распадов  $^{214}\text{Bi}$ . Вместе с известными данными о  $\gamma$ -спектрах  $^{214}\text{Bi}$  и  $^{210}\text{Tl}$  это позволяет исключить их из рассмотрения. Остается  $^{234}\text{Pa}$ . В цепочке распадов  $^{238}\text{U}$  заселяются два изомерных состояния: основное состояние

Гамма-лучи с  $E_\gamma > 2000$  кэВ при распаде  $^{234m}\text{Pa}$

$E_\gamma$ , кэВ	2022,24	2041,23	2065,80	2093,19	2102,14	2136,69	1001,03
$\Delta E_\gamma$ , кэВ	0,12	0,13	0,13	0,38	0,15	0,14	0,03
$I_\gamma, 10^{-5} \%$	18(2)	11(1)	7(1)	2,0(6)	6,0(8)	7,0(4)	83700(1000)



Новые  $\gamma$ -переходы при распаде  $^{234m}\text{Pa}$ . Энергии приведены в кэВ, интенсивности  $\gamma$ -лучей в  $10^{-5} \%$  на распад  $^{234m}\text{Pa}$ . Пик в области 2000 кэВ образован случайным суммированием импульсов от  $\gamma$ -лучей 1001 кэВ (1001+1001) кэВ. Пик 2118 кэВ – от  $^{214}\text{Bi}$

( $T_{1/2} = 6,7$  ч,  $I^\pi = 4^+$ ) и уровень с энергией  $(74+x)$  кэВ,  $x < 10$  кэВ,  $T_{1/2} = 1,17$  мин,  $I^\pi = (0^-)$ . Основное состояние заселяется в 0,167 % случаев распадов  $^{238}\text{U}$  [5]. Если новые  $\gamma$ -переходы возникают при распаде основного состояния  $^{234}\text{Pa}$ , то их интенсивность на распад основного состояния  $^{234}\text{Pa}$  будет в 600 раз больше значений, приведенных в таблице: например, для  $\gamma$ -перехода с энергией 2022,4 кэВ –  $1,8 \cdot 10^{-4} \% / 0,167 \% = 0,11 \%$ .

В исследованиях распада основного состояния  $^{234}\text{Pa}$  [5–8] наблюдались  $\gamma$ -лучи с энергией 1977,4, 1989,6 и 2072,2 кэВ с интенсивностями на распад основного состояния 0,016(4) %, 0,07(3) % и 0,004(2) %. Гамма-переходы, приведенные в таблице, не были обнаружены. Таким образом, можно утверждать, что новые  $\gamma$ -переходы следует отнести к распаду изомерного ( $T_{1/2} = 1,17$  мин) состояния  $^{234}\text{Pa}$ .

Среди  $\gamma$ -переходов в таблице есть  $\gamma$ -переход с энергией 2041,2 кэВ, близкой к энергии  $Q_{2\beta}(^{76}\text{Ge}) = 2039,0$  кэВ. Возможность появления этих  $\gamma$ -лучей в фоне в экспериментах по поиску  $(2\beta, 0\nu)$ -распада  $^{76}\text{Ge}$  следует учитывать. Наблюдение при распаде  $^{234\text{m}}\text{Pa}$   $\gamma$ -переходов с  $E_\gamma > 2000$  кэВ указывает на возбуждение уровней с  $E_\gamma > 2000$  кэВ. Самые высокие известные уровни  $^{234}\text{U}$ , возбуждаемые при распаде  $^{234}\text{Pa}$ : 1969,9 кэВ,  $I^\pi = (1^-)$  и 1937,0 кэВ,  $I^\pi = (1)$  [6]. Разности энергий двух пар  $\gamma$ -переходов: 2136,7–2093,2 кэВ и 2065,8–2022,2 кэВ – близки к энергии первого уровня

$^{234}\text{U}$  – 43,5 кэВ. Вероятность случайного совпадения разностей с энергией первого уровня мала. Введение уровней с энергиями 2136,7 и 2065,8 кэВ можно считать обоснованным. Гамма-лучи с энергиями 2041,2 и 2102 кэВ могут заселять основное или первое возбужденное состояние с энергией 43,5 кэВ  $^{234}\text{U}$ .

Итак, в исследованиях  $\gamma$ -спектра от естественного урана обнаружено шесть малоинтенсивных  $\gamma$ -переходов, возникающих при распаде  $^{234\text{m}}\text{Pa}$ . Энергия одного из них (2041 кэВ) близка к энергии  $Q_{2\beta}(^{76}\text{Ge})$ .

## Список литературы

1. G. Douysset et al. // Phys. Rev. Lett. 86. (2001). 4259.
2. L. Baudis et al. // Phys. Rev. Lett. 83. (1999). 41.
3. H. V. Klapdor-Kleingrothaus et al. // Euro. Phys. J. A12. (2001). 147.  
C. E. Aalseth et al. // Phys. Rev. D65. (2002). 092007.
4. V. B. Brudanin et al. // Тезисы докладов на 53 совещании по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра “Ядро-2003”, 7–10 октября 2003, Москва.
5. R. B. Firestone, V. S. Shirley // Table of Isotopes, 8th edi. (Wiley, New York). 1998.
6. C. Ardisson et al. // Phys. Rev. C33. (1986). 2133.
7. H. L. Scott, K. W. Marlow // NIM in Ph. R. A286. (1990). 549.
8. K. Siemon et al. // Appl. Radiat. Isot. 43. (1992). 873

Получено 18 декабря 2003 г.

Бруданин В. Б. и др.  
Гамма-лучи с энергией больше 2000 кэВ  
в цепочке распадов  $^{238}\text{U}$

P6-2003-233

Изучен  $\gamma$ -спектр образца естественного урана ( $\text{U}_3\text{O}_8$ , 830 г). При распаде дочернего  $^{234\text{m}}\text{Pa}$  обнаружено шесть новых малоинтенсивных  $\gamma$ -переходов: 2022,24 кэВ ( $1,8 \cdot 10^{-4} \%$  на распад), 2041,23 кэВ ( $1,1 \cdot 10^{-4} \%$ ), 2065,80 кэВ ( $7,0 \cdot 10^{-5} \%$ ), 2093,19 кэВ ( $2,0 \cdot 10^{-5} \%$ ), 2102,14 кэВ ( $6,0 \cdot 10^{-5} \%$ ) и 2136,69 кэВ ( $7,0 \cdot 10^{-5} \%$ ). Существование в цепочке распадов  $^{238}\text{U}$   $\gamma$ -лучей с энергией 2041 кэВ следует учитывать при анализе результатов ( $2\beta, 0\nu$ )-экспериментов. Предлагаются новые уровни  $^{234}\text{U}$ .

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

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2003

### Перевод авторов

Brudanin V. B. et al.  
Gamma Rays with Energy Above 2000 keV  
in the Decay of  $^{238}\text{U}$

P6-2003-233

Gamma spectrum of a sample of natural uranium ( $\text{U}_3\text{O}_8$ , 830 g) has been investigated. Six new low intensity  $\gamma$ -transitions, 2022.24 keV ( $1.8 \cdot 10^{-4} \%$  per decay), 2041.23 keV ( $1.1 \cdot 10^{-4} \%$ ), 2065.80 keV ( $7.0 \cdot 10^{-5} \%$ ), 2093.19 keV ( $2.0 \cdot 10^{-5} \%$ ), 2102.14 keV ( $6.0 \cdot 10^{-5} \%$ ) and 2136.69 keV ( $7.0 \cdot 10^{-5} \%$ ) have been observed in the decay of daughter nucleus  $^{234\text{m}}\text{Pa}$ . Existence of 2041 keV  $\gamma$ -ray in decays of nuclei in a  $^{238}\text{U}$  chain must be taken into account in the analysis of the results of ( $2\beta, 0\nu$ ) experiments. New excited levels of  $^{234}\text{U}$  are proposed.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2003



Редактор *О. Г. Андреева*  
Макет *Е. В. Сабанеевой*

Подписано в печать 28.01.2004.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.  
Усл. печ. л. 0,5. Уч.-изд. л. 0,31. Тираж 300 экз. Заказ № 54275.

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

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

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