

УДК 539.163

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

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

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Изучен γ -спектр образца естественного урана (U_3O_8 , 830 г). При распаде дочернего ^{234m}Pa обнаружено шесть новых малоинтенсивных γ -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}U γ -лучей со значением энергии 2041 кэВ следует учитывать при анализе результатов $^{76}\text{Ge}(2\beta, 0\nu)$ -экспериментов. Предлагаются новые уровни ^{234}U .

Gamma spectrum of a sample of natural uranium (U_3O_8 , 830 g) has been investigated. Six new low-intensity γ -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 ^{234m}Pa . Existence of 2041 keV γ -rays in decays of nuclei in ^{238}U chain must be taken into account in the analysis of the results of $^{76}\text{Ge}(2\beta, 0\nu)$ experiments. New excited levels of ^{234}U are proposed.

В экспериментах по поиску двойного безнейтринного бета-распада ^{76}Ge в спектрах HPGe-детекторов, обогащенных ^{76}Ge , ищут линию со значением энергии $Q_{2\beta}(^{76}\text{Ge}) = 2039,006(50)$ кэВ [1]. В случае обнаружения в спектре линии с такой энергией необходимо будет доказать, что нет других (фоновых) источников ее появления. В частности, в работах [2, 3] сообщалось, что в спектрах $^{76}\text{Ge}(2\beta, 0\nu)$ -экспериментов наблюдаются γ -лучи, возникающие в цепочке распадов ^{238}U . Мы предприняли поиски γ -лучей со значением энергии 2039 кэВ при распаде нуклидов этой цепочки. В качестве источника γ -излучения был взят порошок закиси-оксида урана (U_3O_8) массой 830,4 г. Рассчитанная активность источника $8,6 \cdot 10^6$ Бк позволяла надеяться обнаружить γ -лучи очень малой интенсивности.

Гамма-спектр образца U_3O_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 см^3 , FWHM = 2 кэВ для $E_\gamma = 1332$ кэВ).

С экспозициями около 200 ч измерены γ -спектр образца U_3O_8 и фоновый спектр. После вычета фона в спектре наблюдаются γ -лучи ^{234}Pa , а также ^{214}Pb и ^{214}Bi . С использованием известных [5] относительных интенсивностей γ -лучей при распаде ^{234}Pa и

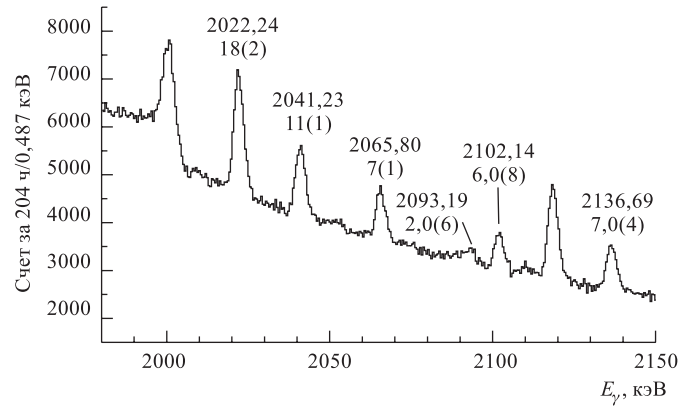
^{214}Bi построена кривая относительной эффективности регистрации γ -лучей от использованного образца U_3O_8 . Полученная кривая пронормирована к абсолютной эффективности регистрации γ -лучей по самому интенсивному при распаде ^{234m}Pa γ -переходу со значением энергии 1001,0 кэВ (0,837 % распадов). После нормировки к абсолютной эффективности регистрации γ -лучей оказалось, что самые интенсивные при распаде ^{214}Bi γ -лучи со значением энергии 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 γ -лучей со значением энергии 609,3 кэВ должна равняться интенсивности этих γ -лучей на распад ^{214}Bi , т. е. 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 γ -лучей ^{214}Bi и ^{214}Pb обусловлено примесью ^{226}Ra в количестве около 0,015 % распадов ^{238}U . Заметим здесь, что и в экспериментах по исследованию $(2\beta, 2\nu)$ - и $(2\beta, 0\nu)$ -распадов ^{76}Ge наблюдение в фоновых спектрах γ -лучей ^{214}Bi и ^{214}Pb также, возможно, связано с присутствием ^{226}Ra между детектором и защитой.

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

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

Сведения об энергиях и интенсивностях ранее неизвестных γ -переходов представлены в таблице. На рисунке изображен спектр γ -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 γ -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 γ -переходов с распадом определенного нуклида. Приписание их распаду нуклидов, испытывающих α -распад, исключаем. Возникновение γ -лучей с $E_\gamma > 2000$ кэВ при α -распаде маловероятно. Гамма-лучи с $E_\gamma > 2000$ кэВ могут возникать при β -распаде, если $Q_\beta > 2000$ кэВ. Таких нуклидов в цепочке распадов ^{238}U три: ^{234}Pa ($Q_\beta = 2207$ кэВ), ^{214}Bi ($Q_\beta = 3270$ кэВ) и ^{210}Tl ($Q_\beta = 5497$ кэВ) [5]. Выше было показано, что число распадов ^{214}Bi в нашем источнике составляет $1,5 \cdot 10^{-4}$ распадов ^{238}U . ^{210}Tl образуется в 0,021 % случаев распадов ^{214}Bi . Вместе с известными данными о γ -спектрах ^{214}Bi и ^{210}Tl это позволяет исключить их из рассмотрения. Остается ^{234}Pa . В цепочке распадов ^{238}U заселяются два изомерных состояния: основное состояние ($T_{1/2} = 6,7$ ч, $I^\pi = 4^+$) и уровень со значением энергии



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

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

В исследованиях распада основного состояния ^{234}Pa [5–8] наблюдались γ -лучи со значениями энергии 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 γ -переходы следует отнести к распаду изомерного ($T_{1/2} = 1,17$ мин) состояния ^{234}Pa .

Среди γ -переходов в таблице есть γ -переход с энергией 2041,2 кэВ, близкой к энергии $Q_{2\beta}(^{76}\text{Ge}) = 2039,0$ кэВ. Возможность появления этих γ -лучей в фоне в экспериментах по поиску ($2\beta, 0\nu$)-распада ^{76}Ge следует учитывать. Наблюдение при распаде ^{234m}Pa γ -переходов с $E_\gamma > 2000$ кэВ указывает на возбуждение уровней со значением энергии больше 2000 кэВ. Самые высокие известные уровни энергии ^{234}U , возбуждаемые при распаде ^{234}Pa : 1969,9 кэВ, $I^\pi = (1^-)$ и 1937,0 кэВ, $I = (1)$ [6]. Разности энергий двух пар γ -переходов: 2136,7–2093,2 кэВ и 2065,8–2022,2 кэВ — близки к значению энергии первого уровня ^{234}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 со значениями энергии 2041,2 и 2102,1 кэВ могут заселять основное или первое возбужденное состояние с энергией 43,5 кэВ ^{234}U .

Итак, в исследованиях γ -спектра от естественного урана обнаружено шесть малоинтенсивных γ -переходов, возникающих при распаде ^{234m}Pa . Энергия одного из них (2041 кэВ) близка к энергии $Q_{2\beta}(^{76}\text{Ge})$, но разность энергий этого γ -перехода и линии со значением 2039,0 кэВ, приписываемой Клапдор–Кляйнротхаузом и др. [9, 10] ($2\beta, 0\nu$)-распаду ^{76}Ge , равна $2041,2(1) - 2039,0(2) = 2,2(2)$ кэВ. То есть вклад γ -лучей со значением энергии 2041,2 кэВ ^{234m}Pa в линию с энергией 2039,0 кэВ, вероятно, мал.

Такому заключению не противоречит и оценка интенсивности γ -лучей со значением энергии 2041,2 кэВ по графикам спектров в статьях [9, 10]. Для точного определения интенсивности γ -лучей со значением энергии 2041,2 кэВ в спектрах [9, 10] необходимы количественные данные о фоновом спектре в эксперименте Гейдельберг–Москва. Наблюдение γ -лучей с энергией 2041,2 кэВ ^{234m}Pa в цепочке распадов ^{238}U , несомненно, важно при планировании новых экспериментов по поиску $(2\beta, 0\nu)$ -распада ^{76}Ge .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Douysset G. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2001. V. 86. P. 4259.
2. *Baudis L. et al.* // Phys. Rev. Lett. 1999. V. 83. P. 41.
3. *Klapdor-Kleingrothaus H. V. et al.* // Eur. Phys. J. A. 2001. V. 12. P. 147;
Aalseth C. E. et al. // Phys. Rev. D. 2002. V. 65. P. 092007.
4. *Brudanin V. B. et al.* // Тез. докл. 53 совещ. по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра «Ядро-2003», Москва, 7–10 окт. 2003 г.
5. *Firestone R. B., Shirley V. S.* Table of Isotopes. 8th ed. N. Y.: Wiley, 1998.
6. *Ardisson C. et al.* // Phys. Rev. C. 1986. V. 33. P. 2133.
7. *Scott H. L., Marlow K. W.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1990. V. 286. P. 549.
8. *Siemon K. et al.* // Appl. Rad. Isot. 1992. V. 43. P. 873.
9. *Klapdor-Kleingrothaus H. V. et al.* // Mod. Phys. Lett. A. 2001. V. 16. P. 2409.
10. *Klapdor-Kleingrothaus H. V. et al.* // Found. Phys. 2002. V. 13. P. 1181.

Получено 22 декабря 2003 г.