

## Оценка значений характеристик распада и излучений $^{129}\text{I}$

В. П. ЧЕЧЕВ, В. О. СЕРГЕЕВ

Приведены новые оцененные значения характеристик распада и излучений радионуклида  $^{129}\text{I}$ , полученные с учетом информации, опубликованной в мировой литературе к 2003 г.

**Ключевые слова:** оцененные значения, характеристики распада и излучений  $^{129}\text{I}$ .

New evaluated of decay and radiation characteristics of radionuclide  $^{129}\text{I}$  obtained with taking into account the information published to 2003 are presented.

**Key words:** evaluation,  $^{129}\text{I}$  decay and radiation characteristics.

В статье представлены оцененные значения характеристик распада и излучений радионуклида  $^{129}\text{I}$ , полученные в рамках исследовательской программы работ международной кооперации «Decay Data Evaluation Project» [1].

Детальная оценка ядерно-физических характеристик (ЯФХ)  $^{129}\text{I}$  выполнялась неоднократно в различные годы [2—4]. Здесь проведем ревизию ранее сделанных оценок и получим оцененные значения ЯФХ  $^{129}\text{I}$  с учетом информации, опубликованной к 2003 г.

Схема распада  $^{129}\text{I}$  показана на рисунке. Считается, что  $\beta^-$ -распад  $^{129}\text{I}$  происходит на возбужденный уровень  $^{129}\text{Xe}$  со 100 %-ным его заселением. Однако для надежного подтверждения этой схемы распада представляет интерес оценка вероятности  $\beta^-$ -перехода  $^{129}\text{I}$  в основное состояние  $^{129}\text{Xe}$  ( $P\beta_0$ ,  $7/2^+ \rightarrow 1/2^+$ ). В [5] было показано экспериментально, что  $P\beta_0$  не превышает 1 %. Этот экспериментальный предел соответствует  $\lg ft \geq 15$ . Систематика уникальных запрещенных II порядка  $\beta^-$ -переходов с тем же изменением спина и четности ( $\Delta J = 3$ ,  $\Delta\pi = 0$ ) приводит к примерно таким же значениям  $\lg ft$ :  $^{10}\text{Be}$  ( $0^+ \rightarrow 3^+$ ) —  $\lg ft = 13,9$ ;  $^{22}\text{Na}$  ( $3^+ \rightarrow 0^+$ ) —  $\lg ft = 15,1$ ;  $^{26}\text{Al}$  ( $5^+ \rightarrow 2^+$ ) —  $\lg ft = 14,6$ ;  $^{60}\text{Co}$  ( $5^+ \rightarrow 2^+$ ) —  $\lg ft = 15,0$  [6]. Следовательно, на данном

этапе эксперимента принимаем вероятность  $\beta^-$ -перехода в основное состояние  $^{129}\text{Xe}$  равной 0,5(5) % (обеспечивая предел  $\leq 1$  %) и, соответственно, вероятность  $\beta^-$ -перехода на уровень с энергией 39,58 кэВ равной 99,5(5) %.

В качестве опорной характеристики для оценки выбираем полный коэффициент внутренней конверсии ( $\alpha_T$ ), так как мультипольный состав  $\gamma$ -перехода 39,58 кэВ определен экспериментально с хорошей точностью:  $M1 + 0,073(27) \% E2$  [7].

Оцененное значение периода полураспада  $^{129}\text{I}$  получено как среднее взвешенное четырех экспериментальных значений ( $10^7$  лет): 1,72(9) [8], 1,56(6) [9], 1,57(4) [10] и 1,97(14) [11]. В соответствии с принятой процедурой статистической обработки [12, 13] погрешность значения [10] была увеличена до 0,047, и, так как для данного набора ( $n = 4$ ,  $\chi^2 = 9,5$ )  $\chi^2 > (\chi^2)_{n-1}^{0,05} = 7,8$ , по программе EV1NEW [13] выбрали в качестве погрешности оцененного значения  $tS(=MBAYS)=0,070$ . Таким образом, оцененное значение  $T_{1/2}(^{129}\text{I}) = 1,61(7) \cdot 10^7$  лет.

Энергия распада  $Q\beta^- = 190,8(11)$  кэВ принята из работы [14] на основе точного спектрометрического измерения граничной энергии  $\beta^-$ -спектра, результат которого приводит к погрешности, меньшей по сравнению с оценкой  $Q\beta^-$ , полученной Оди и Вапстра (194(3) кэВ) из разностей масс ядер [15].

Оцененные значения характеристик ядерных переходов и излучений  $^{129}\text{I}$  по состоянию информации на 2003 г. приведены в табл. 1—7.

Таблица 1

Оцененные значения характеристик  $\beta^-$ -переходов в распадае  $^{129}\text{I}$

Излучение	Граничная энергия, кэВ	Вероятность, %	Тип перехода	$\lg ft$
$\beta_1$	151,2(11)	99,5(5)	Запрещенный II порядка: $\Delta J = 2$ , $\Delta\pi = 0$	13,49
$\beta_0$	190,8(11)	0,5(5)	Уникальный запрещенный II порядка: $\Delta J = 3$ , $\Delta\pi = 0$	$\geq 15$

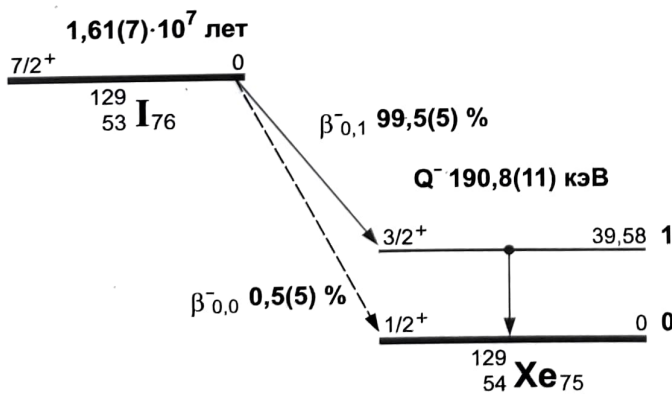


Схема распада  $^{129}\text{I}$

Оцененные значения характеристик  $\gamma$ -перехода в распаде  $^{129}\text{I}$  и коэффициенты внутренней конверсии Таблица 2

Излучение	Энергия, кэВ	Вероятность, %	Мультипольность	$\alpha_K$	$\alpha_L$	$\alpha_M$	$\alpha_{NO}$	$\alpha_T$
$\gamma_{1,0}$	39,578 (4)	99,5(5)	$M1 + 0,07(3) \% E2$	10,59 (11)	1,45 (5)	0,296 (10)	0,074 (3)	12,41(13)

Таблица 3

Оцененные значения энергии и абсолютной вероятности эмиссии  $\gamma$ -излучения в распаде  $^{129}\text{I}$ 

Излучение	Энергия, кэВ	Число фотонов на 100 распадов
$\gamma_{1,0}$	39,578(4)	7,42(8)

Таблица 4

Оцененные значения энергии и абсолютной вероятности эмиссии характеристического рентгеновского излучения в распаде  $^{129}\text{I}$ 

Излучение	Энергия, кэВ	Число фотонов на 100 распадов
XL (Xe)	3,6—4,4	7,9 (4)
XK $\alpha_2$ (Xe)	29,459(2)	20,1(3)
XK $\alpha_1$ (Xe)	29,779(1)	37,2(6)
XK $\beta_3$ (Xe)	33,562(2)	3,49(16)
XK $\beta_1$ (Xe)	33,625(2)	6,7(3)
XK $\beta_5$ (Xe)	33,881(6)	0,068(4)
XK $\beta_2$ (Xe)	34,415(3)	2,03(11)
XK $\beta_4$ (Xe)	34,496(5)	0,0152(15)
XKO $_{2,3}$ (Xe)	34,552(10)	0,25(3)

Таблица 5

Оцененные значения характеристик электронов Оже в распаде  $^{129}\text{I}$ 

Излучение	Энергия, кэВ	Число электронов на 100 распадов
$e_{AL}$	2,4—5,4	73,9(12)
KLL	23,58—24,86	5,79(27)
KLX	27,89—30,68	2,70(13)
KXY	32,3—34,4	0,31(2)

Таблица 6

Оцененные значения характеристик конверсионных электронов в распаде  $^{129}\text{I}$ 

Излучение	Энергия, кэВ	Число электронов на 100 распадов
$ce_{1,0} K$	5,017(4)	78,6(12)
$ce_{1,0} L_1$	34,126(4)	9,6(3)
$ce_{1,0} L_2$	34,474(4)	0,86(3)
$ce_{1,0} L_3$	34,796(4)	0,30(1)
$ce_{1,0} M$	38,43—38,90	2,20(8)
$ce_{1,0} NO$	39,37—39,56	0,55(1)

Таблица 7

Оцененные значения характеристик  $\beta$ -излучения в распаде  $^{129}\text{I}$ 

Излучение	Энергия, кэВ	Число электронов на 100 распадов
$\beta_1$ max avg	151,2(11) 37(1)	99,5(5)
$\beta_0$ max	190,8(11)	0,5(5)

Вероятность  $\beta$ -перехода на возбужденный уровень  $^{129}\text{Xe}$  с энергией 39,58 кэВ принята равной 99,5(5) % на основе измерений [5].

Энергия  $\gamma$ -излучения (и соответственно  $\gamma$ -перехода) взята из [16] на основе точного измерения, выполненного с использованием планарного детектора из чистого германия и источника  $^{129}\text{Ina}$ . Принятое значение  $E_\gamma = 39,578(4)$  кэВ (см. табл. 2 и 3) совпадает со значением 39,578(2) кэВ, полученным в [17] для энергии первого возбужденного уровня  $^{129}\text{Xe}$  (из данных по распаду  $^{129}\text{Cs}$ ). Другие экспериментальные данные менее точны (кэВ): 39,58(3) [18], 39,6(2) [19], 39,4 (3) [20], 39,58(5) [21], 39,581(15) [22].

Абсолютная вероятность эмиссии  $\gamma$ -излучения  $P_\gamma$  (см. табл. 3) рассчитана исходя из  $P_{\beta_1} = 99,5(5) \%$  и  $\alpha_T = 12,41(13)$ . Таким образом, в расчет  $P_\gamma$  впервые включена оценка вероятности возможного  $\beta$ -перехода в основное состояние  $^{129}\text{Xe}$ .

Коэффициенты внутренней конверсии (см. табл. 2) получены по таблицам теоретических расчетов [23] для принятой мультипольности  $M1+0,07(3) \% E2$ . Интерполяция коэффициента внутренней конверсии выполнена по программе ICC99 [24], и относительные погрешности теоретических значений взяты равными 1 % для  $\alpha_K$  и 3 % для  $\alpha_L, \alpha_M, \alpha_{NO}$ . В пределах принятых погрешностей значения коэффициента внутренней конверсии, полученные по другим таблицам [25, 26], согласуются с приведенными в табл. 2. Оцененное значение  $\alpha_K^{\text{теор}} = 10,59(11)$  можно сравнить с измеренными  $\alpha_K^{\text{эсп}}$ : 10,6(4) [16], 10,6 [27], 9,8(9) [28], 10,2(4) [29], 10,2(5) [30].

Значения абсолютной вероятности эмиссии характеристического рентгеновского излучения и электронов Оже в распаде  $^{129}\text{I}$ , представленные соответственно в табл. 4 и 5, рассчитаны на основе принятых значений опорных характеристик  $\alpha_T, \alpha_K$  и атомных данных о выходах флуоресценции. Расчетное (оцененное) значение полной абсолютной вероятности эмиссии  $KX$ -излучения  $P_{XK} = \omega_K \alpha_K P_\gamma = 69,8(11) \%$  хорошо согласуется с результатом измерения  $P_{XK} = 70,2(8) \%$ , полученным в [16]. Это говорит о взаимной согласованности оценок  $P_\gamma, P_{XK}, \alpha_K$  и принятого из [31] значения  $\omega_K(\text{Xe}) = 0,888(5)$ .

Оцененное значение полной абсолютной вероятности эмиссии  $XL$ -излучения  $P_{XL} = 7,9(4) \%$  (см. табл. 4) рассчитано



с использованием значений  $\omega_L = 0,097(5)$ ,  $n_{KL} = 0,902(4)$  [31],  $P(\text{ce}_K) = 78,6(12)\%$  и  $P(\text{ce}_L) = 10,8(4)\%$ .

Абсолютные интенсивности  $K$ -электронов Оже (см. табл. 5) получены стандартным расчетным способом с использованием коэффициента выхода  $K$ -электронов Оже  $a_K = 1 - \omega_K = 0,112(5)$ . Аналогичным образом с использованием  $a_L = 1 - \omega_L = 0,903(5)$  рассчитана полная абсолютная интенсивность  $L$ -электронов Оже.

Абсолютные интенсивности конверсионных электронов (см. табл. 6) вычислены с учетом  $P_\gamma$  и коэффициента внутренней конверсии. Для  $L$ -оболочки их можно сравнить с экспериментальными относительными интенсивностями  $L_1 : L_2 : L_3 = 1,00 : 0,100(4) : 0,031(3)$ , измеренными в [18] для распада  $^{129}\text{Cs} \rightarrow ^{129}\text{Xe}$ .

Средняя энергия  $\beta^-$ -частиц  $^{129}\text{I}$ , рассчитанная по программе LOGFT [32], равна 40,6(3) кэВ (для разрешенной формы  $\beta^-$ -спектра). Однако  $\beta^-$ -переход с энергией  $E_{\beta^-} = 151,2(11)$  кэВ относится к запрещенным (неуникальным) II порядка, поэтому для адекватной оценки  $\langle E_{\beta^-} \rangle$  была использована программа SPEBETA [33]:  $\langle E_{\beta^-} \rangle = 37$  кэВ. Это значение согласуется с расчетом [34]:  $\langle E_{\beta^-} \rangle = 36$  кэВ.

В заключение отметим, что характеристики распада  $^{129}\text{I}$  имеют существенное значение для исследований по мониторингу окружающей среды и проблемам переработки радиоактивных отходов. Кроме того, этот нуклид используется для калибровки спектрометров  $\gamma$ -излучения в области энергий 30—40 кэВ. Поэтому представляется интересным и важным выполнить экспериментальное уточнение интенсивности  $\beta^-$ -распада  $^{129}\text{I}$  в основное состояние  $^{129}\text{Xe}$ , что можно сделать путем непосредственного детального анализа  $\beta^-$ -спектра  $^{129}\text{I}$  методом  $\beta^-$ - $\gamma$ -антисовпадений или косвенным образом, проведя прецизионное измерение (с погрешностью не более 0,5%) абсолютной вероятности эмиссии  $\gamma$ -излучения с энергией 39,58 кэВ.

Существует еще одно важное обстоятельство, связанное с различием измеренной в [18] относительной интенсивности конверсионных электронов  $L_1 : L_2$  (см. выше) и рассчитанной из мультипольного состава  $\gamma$ -перехода 39,58 кэВ (см. табл. 6). Наиболее чувствительным к примеси  $E2$  является отношение  $L_1 : L_3$ , которое и позволяет определить примесь  $E2$  как 0,07(3)%. Для этой примеси измеренное отношение  $L_1 : L_2 = 0,100(4)$  отличается от рассчитанного  $L_1 : L_2 = 0,089(4)$  независимо от выбора таблиц коэффициентов, используемых для расчета [23, 25, 26].

Расхождение может быть связано с проявлением эффекта проникновения в  $M1$ -переходе 39,58 кэВ, который не учитывается в таблицах [23, 25, 26]. Согласно оболочечной модели ядра этот переход происходит между состояниями  $d^{3/2}$  и  $s^{1/2}$  и является  $l$ -запрещенным. Коэффициенты конверсии таких переходов могут быть аномальными [35]. Если принять, что в  $M1$ -переходе 39,58 кэВ коэффициент проникновения  $\lambda = +5 \pm 2$ , то расчетные отношения  $L_1 : L_2 : L_3$  получаются равными  $1,00 : 0,096(4) : 0,033(5)$  в согласии с экспериментально определенными  $L_1 : L_2 : L_3 = 1,00 : 0,100(4) : 0,031(3)$ . При этом расчетное значение  $\alpha_K = 9,84(24)$  согласуется с измеренным в [28], но оказывается меньше среднего взвешенного по нескольким экспериментальным работам.

Полный коэффициент внутренней конверсии  $\alpha_\gamma$  в данном случае существенно влияет на определение абсолютной вероятности эмиссии  $\gamma$ -излучения с энергией 39,58 кэВ ( $P_\gamma$ ), т. е. при выборе коэффициента проникновения  $\lambda = +5 \pm 2$ , при котором отношение  $L_1 : L_2$  согласуется с экспериментом,  $\alpha_\gamma = 11,54(26)$  и  $P_\gamma = 7,93(18)\%$ . Таким образом, при

наличии эффекта проникновения в  $M1$ -переходе 39,58 кэВ рассчитанная абсолютная вероятность эмиссии  $\gamma$ -излучения существенно превышает значение  $P_\gamma = 7,42(8)\%$ , вычисленное без учета аномалии. Это ставит задачу прецизионного измерения коэффициента внутренней конверсии  $\alpha_K$  (с погрешностью не больше 1—2%) и экспериментального уточнения данных об отношении  $L_1 : L_2$ .

#### Литература

1. Helmer R. G., Browne E., Be M.-M. // J. Nucl. Sci. Techn. — 2002. — Suppl. 2. — V. 1. — P. 455.
2. Хольнов Ю. В. и др. Характеристики излучений радиоактивных нуклидов, применяемых в народном хозяйстве. Оцененные данные: Справ. пособие. — М.: Атомиздат, 1980.
3. Чечев В. П., Чукреев Ф. Е. Характеристики распада и излучений долгоживущих радионуклидов, применяемых в народном хозяйстве и научных исследованиях (Оцененные данные): Справ. пособие. — М.: Ин-т атомной энергии им. И. В. Курчатова, 1990.
4. Чечев В. П. // Сб. докл. VIII семинара по точным измерениям в ядерной спектроскопии (Ужгород, 12—13 июня 1990 г.). — Вильнюс: Ин-т физики Литовской АН ССР, 1990. — С. 149.
5. Mateosian Der E., Wu C. S. // Phys. Rev. — 1954. — V. 95. — P. 458.
6. Singh B. e. a. // Nucl. Data Sheets. — 1998. — V. 84. — P. 487.
7. Venkata R. K., Seshi R. T., Venkata Red. K. // Current Sci. (India). — 1974. — V. 43. — P. 406.
8. Katcoff S., Schaeffer O. A., Hastings J. M. // Phys. Rev. — 1951. — V. 82. — P. 688.
9. Russell H. T. // Rep. ORNL-2293. — 1957.
10. Emery J. F. e. a. // Nucl. Sci. Eng. — 1972. — V. 48. — P. 319.
11. Kuhry J. G., Bontems G. // Radiochem. Radioanal. Let. — 1973. — V. 15. — P. 29.
12. Чечев В. П. // Измерительная техника. — 1998. — N 8. — С. 47.
13. Chechev V. P., Egorov A. G. // Appl. Radiat. Isotop. — 2000. — V. 52. — N 3. — P. 601.
14. Coursol N. // Thèse doct. es-sciences Phys. Univ. Paris Sud, 2166. 1979.
15. Audi G., Wapstra A. H. // Nucl. Phys. — 1995. — V. A595. — P. 409.
16. Barci-Funel G., Kouassi M. C., Ardisson G. // Nucl. Instrum. Meth. — 1985. — V. 241. — P. 252.
17. Tendow Y. // Nucl. Data Sheets. — 1996. — V. 77. — P. 631.
18. Geiger J. S. e. a. // Nucl. Phys. — 1965. — V. 68. — P. 352.
19. Rezanka I. e. a. // Nucl. Phys. — 1966. — V. 89. — P. 609.
20. Graeffe G., Walters W. B. // Phys. Rev. — 1967. — V. 153. — P. 1321.
21. Taylor H. W., Singh B. // J. Phys. Soc. Jap. — 1972. — V. 32. — P. 1472.
22. Meyer R. A. e. a. // Phys. Rev. — 1976. — V. C14. — P. 1152.
23. Rosel F. e. a. Atomic Data and Nucl. Data Tabl. — 1978. — V. 21. — P. 91.
24. Coursol N. e. a. // Appl. Radiat. Isotop. — 2000. — V. 52. — P. 557.
25. Hager R. S., Seltzer E. C. // Nucl. Data Tabl. — 1968. — V. A4. — P. 1.

26. **Band I. M., Trzhaskovskaya M. B.** // Atomic Data and Nucl. Data Tabl. — 1993. — V. 55. — P. 43.
27. **Reynolds S. A., Emery J. F.** // Report ORNL-4343. — 1968. — P. 78.
28. **Gygaх F. N., Jenefsky R. F., Leisi H. J.** // Phys. Let. — 1970. — V. 32B. — P. 359.
29. **Sastry K. S. R. e. a.** // Bull. Am. Phys. Soc. — 1970. — V. 15(4). — P. 623.
30. **Рагимов Т. К., Рау Д. Ф., Тимошин В. И.** // Изв. АН СССР. Сер. Физика. — 1977. — Т. 41. — С. 1222.
31. **Schönfeld E., Janssen H.** // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. — 1996. — V. A369. — P. 527.

32. **ENSDF: LOGFT-program, ENSDF analysis and checking codes** // Brookhaven National Lab.

33. **Ве М.-М.** // INDC(NDS)-422. — Vienna: IAEA, 2001. — P. 112.

34. **Колобашкин В. М. и др.** Бета-излучение продуктов деления. — М.: Атомиздат, 1978.

35. **Банд И. М., Листенгартен М. А., Фересин А. П.** Аномалия в коэффициентах внутренней конверсии гамма-лучей. — Л.: Наука, 1976.

*Дата одобрения 12.11.2003 г.*