

## ИЗМЕРЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ УГЛОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ГАММА-ЛУЧЕЙ ИЗ РЕАКЦИИ $^{27}\text{Al}(p,\gamma)^{28}\text{Si}$

**Сафо Олимович Саидов**

Кандидат химических наук, доцент кафедры Физики Бухарского государственного университета

**Сирожиддин Комилевич Махмудов**

Старший научный сотрудник, Научно исследовательский институт физики полупроводников и микроэлектроники НУ Уз

**Санжар Ихтиёр ўғли Махмудов**

Магистрант 2 курса кафедры физики Бухарского государственного университета

### АННОТАЦИЯ

В статье обсуждены результаты измерения углового распределения гамма-лучей, определены и уточнены спины для 15 из наблюдаемых 68 уровней, определены коэффициенты смещения мультипольностей для 7 прямых переходов разряжающих резонансные уровни. Экспериментальные значения энергий четырех уровней и вероятности E2 переходов разряжающие эти уровни сравниваются с расчетами по модели Давыдова для неаксиального четно-четного ядра  $^{28}\text{Si}$ .

**Ключевые слова.** Электромагнитное излучение, гамма излучение, изучение спектров ядерного гамма-излучения и гамма-излучения, коэффициенты угловых распределений, прямой переход с резонансного уровня, квадрупольный момент, резонансные и нерезонансные уровни, переход, вероятность перехода, энергия и интенсивность перехода ...

### ABSTRACT

This article discusses the results of measuring the angular distribution of gamma rays, determines and refines the spins for 15 of levels among 68, determines the multipolarity shift coefficients for 7 direct transitions that discharge resonant levels. The experimental values of the energies of the four levels and the probabilities of E2 transitions that discharge these levels

are compared with calculations using the Davydov model for the nonaxial even-even  $28^{\text{Si}}$  nucleus

## ВВЕДЕНИЕ

Гамма излучение – электромагнитное излучение, принадлежащее наиболее высокочастотной (коротковолновой) части спектра электромагнитных волн [1,2]. В таблице 1 приведена классификация электромагнитных волн: на шкале электромагнитных волн гамма-излучение соседствует с рентгеновскими лучами, но имеет более короткую длину волны. Первоначально термин “гамма-излучение” относился к тому типу излучения радиоактивных ядер, который не отклонялся при прохождении через магнитное поле, в отличие от  $\alpha$ - и  $\beta$ -излучений. Условно верхней границей длин волн гамма-излучения, отделяющей его от рентгеновского излучения, можно считать величину  $10^{-10}$  м. При столь малых длинах волн первостепенное значение имеют корпускулярные свойства излучения.

## ЛИТЕРАТУРА И МЕТОДОЛОГИЯ

Гамма-излучение представляет собой поток частиц - гамма-квантов или фотонов, с энергиями  $E = h\nu$  ( $h$  – постоянная Планка, равная  $4.14 \cdot 10^{-15}$  эВ·с,  $\nu$  – частота электромагнитных колебаний). Условно, фотоны с энергиями  $E > 10$  кэВ относятся к гамма-квантам. Между длиной волны  $\lambda$  гамма-излучения и его частотой  $\nu$  существует то же соотношение, что и для других типов электромагнитных волн:  $\nu \cdot \lambda = c$  ( $c$  – скорость света).

Таблица 1. Классификация электромагнитных волн

Название	Длина волны, м	Частота, Гц
Радиоволны	$3 \cdot 10^5 - 3$	$10^3 - 10^8$
Микроволны	$3 - 3 \cdot 10^{-3}$	$10^8 - 10^{11}$
Инфракрасное излучение	$3 \cdot 10^{-3} - 8 \cdot 10^{-7}$	$10^{11} - 4 \cdot 10^{14}$
Видимый свет	$8 \cdot 10^{-7} - 4 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{14} - 8 \cdot 10^{14}$

Ультрафиолетовое излучение	$4 \cdot 10^{-7} - 3 \cdot 10^{-9}$	$8 \cdot 10^{14} - 10^{17}$
Рентгеновское излучение	$3 \cdot 10^{-9} - 10^{-10}$	$10^{17} - 3 \cdot 10^{18}$
Гамма-излучение	$< 10^{-10}$	$> 3 \cdot 10^{18}$

Частота гамма-излучения ( $>3 \cdot 10^{18}$  Гц) отвечает скоростям электромагнитных процессов, протекающих внутри атомных ядер и с участием элементарных частиц. Поэтому источниками гамма-излучения могут быть атомные ядра и частицы, а также ядерные реакции и реакции между частицами, в частности аннигиляция пар частица-античастица. И наоборот, гамма-излучение может поглощаться атомными ядрами и способно вызывать превращения частиц. Изучение спектров ядерного гамма-излучения и гамма-излучения, возникающего в процессах взаимодействия частиц, дает важную информацию о структуре этих микрообъектов.

Гамма-излучение может также возникать при торможении быстрых заряженных частиц в среде (тормозное гамма-излучение) или при их движении в сильных магнитных полях (синхротронное излучение). Источниками гамма-излучения являются также процессы в космическом пространстве. Космические гамма-лучи приходят от пульсаров, радиогалактик, квазаров, сверхновых звезд.

Гамма-излучение ядер испускается при переходах ядра из состояния с большей энергией в состояние с меньшей энергией, и энергия испускаемого гамма-кванта с точностью до незначительной энергии отдачи ядра равна разности энергий этих состояний (уровней) ядра. Энергия ядерного гамма-излучения обычно лежит в интервале от нескольких кэВ до нескольких МэВ и спектр этого излучения линейчатый, т. е. состоит из ряда дискретных линий. Изучение спектров ядерного гамма-излучения позволяет определить энергии состояний (уровней) ядра.

При распадах частиц и реакциях с их участием обычно испускаются гамма-кванты с большими энергиями - десятки-сотни МэВ.

Гамма-излучение, образующееся при прохождении быстрых заряженных частиц через вещество, вызывается их торможением в кулоновском поле ядер вещества. Тормозное гамма-излучение имеет сплошной, спадающий с ростом энергии спектр, верхняя граница которого совпадает с кинетической энергией заряженной



частицы. На ускорителях заряженных частиц получают тормозное гамма-излучение с энергиями до нескольких десятков ГэВ и более.

Угловые распределения гамма-лучей из реакции  $(p,\gamma)$  измерялись для определения значения спина ряда резонансных состояний ядра  $^{28}\text{Si}$ . Угловые распределения измерялись HPGe детектором (из сверхчистого германия) на расстоянии 7 см от мишени и при углах  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  и  $90^\circ$  относительно направления пучка. Спектры, полученные при каждом из этих углов, хранились в персональном компьютере. Последовательность  $0^\circ \rightarrow 90^\circ \rightarrow 0^\circ$  повторялась несколько раз, пока не набралась необходимая статистика обеспечивающая точность не хуже 3% и проверялись центровка детектора и затухание  $\gamma$ -лучей.

Анализ данных методом наименьших квадратов в терминах полиномов Лежандра в выражении  $N(\theta) = B(1 + A_2P_2 + A_4P_4)$  дал значения для коэффициентов корреляции  $A_2$  и  $A_4$ . Результаты показаны в таблице 2.

Таблица 2. Нерезонансные уровни в  $^{28}\text{Si}$

Настоящая работа	Работа [3]	Возбуждается при резонансах, Ер, кэВ
7415.2±2.0	7418.6±1.0 <sup>a)</sup>	
9478.5±2.5	9480.4 ±1.5	
9765.0±2.2	9761.5±1.4	
9793.8±2.0		679, 1262, 1381
9929.3±2.0	9930±7	
10514.9±2.0		979, 1662
10541.0±2.0	10540±3	
10598.2±2.0	10594±2.0 <sup>b)</sup>	
10668.8±2.4	10668±5	
10884.1±2.0		937, 1172, 1262, 1502
10901.5±2.0	10901±3	
10915.9±2.0	10915.7±1.3	
10945.4±2.0	10945±3	
11078.1±2.0	11077.5±1.3	
11434.3±1.0	11432±2	937, 1090, 1900, 2132
11434.6±1.5		1118, 1800, 1900, 2303
11778.8±1.5		1588, 1911

Таблица 3. Коэффициенты угловых распределений гамма-лучей из реакции  $^{27}\text{Al}(p,\gamma)^{28}\text{Si}$  и выводы о спинах уровней  $^{28}\text{Si}$

$E_p$ , кэВ	Переходы	$A_2$	$A_4$	Значение спина уровня	
				Настоящая работа	Работа[3]
406	$r \rightarrow 4.62$ $r \rightarrow 8.59$	$0.14 \pm 0.03$ $-0.23$ $\pm 0.14$	$-0.04 \pm 0.06$ $-0.28 \pm 0.21$	$2^+, 3^-, 4^+$	$(4^+)$
679	$r \rightarrow 1.78$ $r \rightarrow 4.62$ $r \rightarrow 7.42$	$-0.14$ $\pm 0.01$ $-0.09$ $\pm 0.02$ $-0.06$ $\pm 0.02$	$-0.01 \pm 0.03$ $-0.08 \pm 0.03$ $0.03 \pm 0.03$	3	$3^+$
742	$r \rightarrow 1.78$ $r \rightarrow 8.90$ $r \rightarrow 9.50$ $r \rightarrow 10.60$ $r \rightarrow 10.72$	$-0.03$ $\pm 0.07$ $-0.08$ $\pm 0.08$ $-0.17$ $\pm 0.06$ $-0.41$ $\pm 0.18$ $-0.03$ $\pm 0.08$	$-0.00 \pm 0.10$ $-0.10 \pm 0.11$ $-0.01 \pm 0.08$ $0.21 \pm 0.27$ $-0.16 \pm 0.11$	$1^-, 2^+$	$(2^+)$
1025	$r \rightarrow 1.78$ $r \rightarrow 7.80$ $r \rightarrow 8.26$	$-0.07$ $\pm 0.03$ $-0.13$ $\pm 0.01$ $-0.11$ $\pm 0.09$	$0.04 \pm 0.04$ $0.06 \pm 0.01$ $-0.06 \pm 0.14$	2	$(1^+, 2)$
1213	$r \rightarrow 1.78$ $r \rightarrow 6.69$	$-0.03$ $\pm 0.02$ $0.19$ $\pm 0.03$	$-0.03 \pm 0.03$ $0.03 \pm 0.05$	$1^+, 2^+$	$1^-, 2^+$

1328	$r \rightarrow 1.78$ $r \rightarrow 4.62$	-0.06 $\pm 0.01$ -0.06 $\pm 0.05$	$-0.10 \pm 0.02$ $-0.07 \pm 0.07$	$2^+, 3^+$	$2 - 4(2,3)^+$
1381	$r \rightarrow 1.78$ $r \rightarrow 4.62$ $r \rightarrow 6.28$	-0.10 $\pm 0.01$ -0.14 $\pm 0.04$ -0.09 $\pm 0.12$	$0.01 \pm 0.01$ $-0.05 \pm 0.05$ $-0.00 \pm 0.14$	$2^+, 3$	$(2,3)^+$
1388	$r \rightarrow 1.78$ $r \rightarrow 6.28$	-0.09 $\pm 0.01$ -0.08 $\pm 0.06$	$-0.03 \pm 0.01$ $0.03 \pm 0.08$	$2^+$	$2^+$
1457	$r \rightarrow 4.62$ $r \rightarrow 7.80$	0.32 $\pm 0.15$ -0.33 $\pm 0.08$	$0.05 \pm 0.19$ $-0.03 \pm 0.10$	$3^-$	$3^-$
1502	$r \rightarrow 1.78$ $r \rightarrow 4.62$	-0.29 $\pm 0.04$ -0.24 $\pm 0.12$	$-0.02 \pm 0.05$ $0.09 \pm 0.15$	2, 3	$2^+$
1520	$r \rightarrow 1.78$ $r \rightarrow 6.88$	-0.24 $\pm 0.02$ $0.07 \pm 0.06$	$0.10 \pm 0.03$ $-0.04 \pm 0.07$	2	$2^-$
1566	$r \rightarrow 6.89$ $r \rightarrow 7.80$ $r \rightarrow 9.32$	-0.14 $\pm 0.11$ $-0.29 \pm 0.08$ -0.27 $\pm 0.05$	$0.09 \pm 0.14$ $-0.09 \pm 0.10$ $0.09 \pm 0.05$		
1588	$r \rightarrow 1.78$ $r \rightarrow 4.62$ $r \rightarrow 6.28$	-0.09 $\pm 0.01$ -0.08 $\pm 0.03$ $0.05 \pm 0.08$	$-0.02 \pm 0.01$ $-0.00 \pm 0.04$ $0.01 \pm 0.09$		

1911	$r \rightarrow 4.62$ $r \rightarrow 6.89$	$-0.92 \pm 0.03$ $-0.25 \pm 0.03$	$0.19 \pm 0.04$ $-0.02 \pm 0.04$	$5^+$	$2^+, 3^-$	$(3^-, 4^+)$
1969	$r \rightarrow 1.78$ $r \rightarrow 6.28$	$0.02 \pm 0.06$ $-0.17 \pm 0.10$	$-0.01 \pm 0.08$ $0.07 \pm 0.12$	2	3	$(2-4)$

Количество импульсов, наблюдаемых под каждым углом, использовалось в качестве входных данных для компьютерной программы, рассчитавшей значение  $Q^2 = \sum_{i=1}^4 \left( \frac{BN_i(\theta_i) - N(\theta_i)}{\Delta N(\theta_i)} \right)^2$ , где  $B$  - константа нормировки, а  $N_i(\theta_i)$  задается формулой:

$$N_i(\theta_i) = 1 + Q_2 A_2^* P_2(\cos\theta_i) + Q_4 A_4^* P_4(\cos\theta_i).$$

Величины  $Q_2$  и  $Q_4$  являются коэффициентами затухания, учитывающими конечный размер детектора, и  $A_2^*$  и  $A_4^*$  являются теоретическими коэффициентами, которые представляют собой функции параметров разрядки уровня и коэффициентов смешивания гамма-перехода.

Соответствующие параметры в теоретических выражениях для  $A_2^*$  и  $A_4^*$  были систематизированы, чтобы найти минимумы  $\chi^2$  из  $Q^2$ . Найденное значение спина считалось единственным, когда соответствующий  $\chi^2$  находился ниже предела 0,1%, тогда как все остальные спины дали значения  $\chi^2$  выше этого предела.

Таблица 4. Коэффициенты смешивания прямого перехода с резонансного уровня спин которого был определен однозначно

$E_p$	I	Переход	Коэффициент смешивания
679	$3^5$	$r \rightarrow 1.78$	$0.36 \pm 0.04$
		$r \rightarrow 4.62$	$-1.70 \pm 0.18$
		$r \rightarrow 7.42$	$0.00 \pm 0.03$
1911	5	$r \rightarrow 4.62$	$1.43 \pm 0.11$
		$r \rightarrow 6.89$	$0.00 \pm 0.03$
1969	2	$r \rightarrow 1.78$	$0.27 \pm 0.05$
		$r \rightarrow 6.28$	$-2.75 \pm 1.00$

Результаты и выводы измерений углового распределения показаны в таблице 3. Было обнаружено, что



$J^x$  резонанса  $E_p = 679$  кэВ  $3^+$  [4]. Вывод о положительной четности сделан из анализа параметров разрядки уровня. Коэффициенты смешивания прямых переходов, которые дали единственные значения спины, показаны в таблице 4.

Сравнение некоторых экспериментальных результатов производилось с известными теоретическим расчетами [5,6]. Уровни  $E_{ур} = 0, 1.78, 4.62$  и  $8.54$  МэВ со следующими спинами и четностями  $J^\pi = 0^+, 2_1^+, 4_1^+$  и  $6_1^+$  считаются членами вращательной полосы основного состояния аксиально-симметричного четно - четного ядра  $^{28}\text{Si}$ . Как было показано Давыдовым и др. [5,6], что нарушение аксиальной симметрии в четно-четных ядрах лишь незначительно влияет на спектр вращения осесимметричного ядра и в результате появляются новые уровни с  $J^\pi = 2_2^+, 3^+, 4_2^+ \dots$ . Если отклонение от аксиальной симметрии невелико, то эти уровни лежат очень высоко. С другой стороны, если отклонение от аксиальной симметрии увеличивается, некоторые дополнительные уровни лежат намного ниже. Выражения для энергий и сильных переходов были получены Давыдовым и др. в терминах параметра  $\gamma$ , который определяет отклонение формы ядра от аксиальной симметрии, собственного квадрупольного момента и энергетического параметра  $A$ .

Таблица 5. Энергия и интенсивность перехода в неаксиальном ядре  $^{28}\text{Si}$

Начальный уровень, МэВ		Переход	$I_i \rightarrow I_t$	Вероятность E2 перехода (в.е.)	
Эксперимент	Теория[7,8]			Эксперимент	Теория[7,8]
1.78	1.55	$1.78 \rightarrow 0$	$2_1^+ \rightarrow 0^+$	$13 \pm 1$	$14 \pm 1$
4.62	4.90	$4.62 \rightarrow 1.78$	$4_1^+ \rightarrow 2_1^+$	$22 \pm 4$	$20 \pm 1$
7.38	7.19	$7.38 \rightarrow 0$	$2_2^+ \rightarrow 0^+$	$0.3 \pm 0.1$	$0.9 \pm 0.1$
		$7.38 \rightarrow 1.78$	$2_2^+ \rightarrow 2_1^+$	$2.2 \pm 0.6$	$3.6 \pm 0.2$
8.54	9.76	$8.54 \rightarrow 4.62$	$6_1^+ \rightarrow 4_1^+$	$>34$	$23 \pm 2$

Уровни  $E_{ур} = 1,78, 4,62, 7,38$  и  $8,54$  МэВ считались членами вращательной полосы  $2_1^+, 4_1^+, 2_2^+$  и  $6_1^+$  неаксиально-симметричного ядра  $^{28}\text{Si}$ . Квадрупольный момент уровня  $E_{ур} = 1,78$  МэВ равен  $Q(2_1^+) = +0,16 \pm 0,03$  е · в [9]. Поэтому внутренний квадрупольный момент  $Q_0 = - (0,62 \pm 0,12)$  е · в для  $\gamma = 180$ . Это значение для  $\gamma$  дает



наблюдаемую спиновую последовательность в  $^{28}\text{Si}$ . Интенсивность нескольких E2 переходов, рассчитанные с этими значениями  $\gamma$  и  $Q_0$ , показаны в таблице 5. Энергии уровней были рассчитаны с приведенным выше значением  $\gamma$  и  $A = 318$  кэВ. Результаты показаны в таблице 6 и находятся в разумном согласии с экспериментальными значениями.

Сравнение некоторых экспериментальных результатов производилось с известными теоретическим расчетами [5,6]. Уровни  $E_{ур} = 0, 1.78, 4.62$  и  $8.54$  МэВ со следующими спинами и четностями  $J^\pi = 0^+, 2_1^+, 4_1^+$  и  $6_1^+$  считаются членами вращательной полосы основного состояния аксиально-симметричного четно - четного ядра  $^{28}\text{Si}$ . Как было показано Давыдовым и др. [5,6], что нарушение аксиальной симметрии в четно-четных ядрах лишь незначительно влияет на спектр вращения осесимметричного ядра и в результате появляются новые уровни с  $J^\pi = 2_2^+, 3^+, 4_2^+ \dots$ . Если отклонение от аксиальной симметрии невелико, то эти уровни лежат очень высоко. С другой стороны, если отклонение от аксиальной симметрии увеличивается, некоторые дополнительные уровни лежат намного ниже. Выражения для энергий и сильных переходов были получены Давыдовым и др. в терминах параметра  $\gamma$ , который определяет отклонение формы ядра от аксиальной симметрии, собственного квадрупольного момента и энергетического параметра  $A$ .

Таблица 6. Энергия и интенсивность перехода в неаксиальном ядре  $^{28}\text{Si}$

Начальный уровень, МэВ		Переход	$I_i \rightarrow I_t$	Вероятность E2 перехода (в.е.)	
Эксперимент	Теория[7,8]			Эксперимент	Теория[7,8]
1.78	1.55	$1.78 \rightarrow 0$	$2_1^+ \rightarrow 0^+$	$13 \pm 1$	$14 \pm 1$
4.62	4.90	$4.62 \rightarrow 1.78$	$4_1^+ \rightarrow 2_1^+$	$22 \pm 4$	$20 \pm 1$
7.38	7.19	$7.38 \rightarrow 0$	$2_2^+ \rightarrow 0^+$	$0.3 \pm 0.1$	$0.9 \pm 0.1$
		$7.38 \rightarrow 1.78$	$2_2^+ \rightarrow 2_1^+$	$2.2 \pm 0.6$	$3.6 \pm 0.2$
8.54	9.76	$8.54 \rightarrow 4.62$	$6_1^+ \rightarrow 4_1^+$	$>34$	$23 \pm 2$

Уровни  $E_{ур} = 1,78, 4,62, 7,38$  и  $8,54$  МэВ считались членами вращательной полосы  $2_1^+, 4_1^+, 2_2^+$  и  $6_1^+$  неаксиально-симметричного ядра  $^{28}\text{Si}$ . Квадрупольный момент уровня  $E_{ур}$

= 1,78 МэВ равен  $Q(2_1^+) = + 0,16 \pm 0,03 \text{ e} \cdot \text{b}$  [9]. Поэтому внутренний квадрупольный момент  $Q_0 = - (0,62 \pm 0,12) \text{ e} \cdot \text{b}$  для  $\gamma = 180$ . Это значение для  $\gamma$  дает наблюдаемую спиновую последовательность в  $^{28}\text{Si}$ . Интенсивность нескольких E2 переходов, рассчитанные с этими значениями  $\gamma$  и  $Q_0$ , показаны в таблице 6. Энергии уровней были рассчитаны с приведенным выше значением  $\gamma$  и  $A = 318$  кэВ. Результаты показаны в таблице 6 и находятся в разумном согласии с экспериментальными значениями.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований подтверждены существование 53 резонансных, 15 нерезонансных уровней и установлены гамма-распад (коэффициенты ветвления) резонансных и нерезонансных уровней ядра  $^{28}\text{Si}$  возбуждаемые в реакции  $^{27}\text{Al}(\text{p},\gamma)$  в энергетическом интервале налетающих протонов 0,3-2,0 МэВ. Четыре уровни с энергиями  $E_{\text{ур}} = 9793,8 \pm 2,0$ ,  $10513,5 \pm 1,0$ ,  $10884,1 \pm 2,0$  и  $11778,8 \pm 1,5$  кэВ установлены впервые. Установлено, что уровень при  $E_{\text{ур}} = 11,43$  МэВ является дублетом.

По результатам измерения углового распределения гамма-лучей определены или уточнены спины для 15 из наблюдаемых 68 уровней, определены коэффициенты смещения мультипольностей для 7 прямых переходов разряжающих резонансные уровни.

Экспериментальные значения энергий четырех уровней и вероятности E2 переходов разряжающие эти уровни сравниваются с расчетами по модели Давыдова для неаксиального четно-четного ядра  $^{28}\text{Si}$ .

## REFERENCES

1. C. Angulo et al. Nucl. Phys. A656 (1999) 3.
2. E.G. Adelberger et al. Rev. Mod. Phys. 83 (2011) 195.
3. Arazi et al., Nucl. Instr. and Meth. B 223 (2004) 259.
4. Арифов А.Я. и др. Относительная вероятность заселения изомеров в реакциях радиационного захвата. - Ядерная физика, т.34, вып.4, 1981, с. 1028-1043.
5. У.А.Фаулер. Экспериментальная и теоретическая ядерная астрофизика, поиски происхождения элементов. УФН,1983, т.145(3), с.441- 488.
6. Ядерная астрофизика. Под ред. Ч.Барнса, Д.Клейтона, Д.Шрамма. Пер. с английского, М.:Мир,1986.-519с.

7. Методика выполнения измерений удельной активности радионуклидов радия-226, тория-232, калия-40, цезия-137, стронция-90 в пробах продукции промышленных предприятий, предприятий сельского хозяйства и объектов окружающей среды. Инструкция по отбору проб из водных объектов и изготовлению счетных образцов Санкт-Петербург (2005). Свидетельство об аттестации 805/05. ФГУП ВНИИМ им Д.И.Менделеева.

8. Методика выполнения измерений плотности потока Радона-222 с различных поверхностей. ООО РАДЭК, Санкт-Петербург 2007. Свидетельство об аттестации №225/09. ФГУП ВНИИМ им Д.И.Менделеева.

9. Давыдов М. Г., Магеров В. Г., Тулухов А. В. Изомерные отношения выходов сечений фотоядерных реакций. – Атомная энергия, 1987, Т. 62, вып. 4, с. 232 – 243.