



УДК 539.1.074-5:620.179.152

**РЕГИСТРАЦИЯ ИЗЛУЧЕНИЙ С ЭНЕРГИЯМИ ДО 1,33 МэВ  
ДЕТЕКТОРАМИ МАЛЫХ РАЗМЕРОВ****REGISTRATION OF THE RADIATION WITH ENERGIES UP TO 1.33 MeV  
BY THE DETECTORS OF SMALL SIZES****А.С. Деев  
O.S. Deiev***НИЦ «Харьковский физико-технический институт»,  
ул. Академическая, 1, г. Харьков, 61108, Украина**NSC "Kharkov Institute of Physics and Technology",  
1 Akademicheskaya St, Kharkov, 61108, Ukraine**E-mail: deev@kipt.kharkov.ua*

*Аннотация.* Детектирующим модулем на основе неохлаждаемого кремниевого планарного детектора и детектирующим модулем типа «сцинтиллятор - кремниевый фотосенсор» измерены спектры гамма-излучения источников  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{60}\text{Co}$ . Спектры излучения для Si планарного детектора  $5 \times 5 \times 0.3 \text{ мм}^3$  содержат пики полного поглощения для энергий  $\gamma$ -квантов до 662 кэВ. Экспериментально измеренная ширина пиков (FWHM) для энергий  $E_\gamma$  от 59.54 до 662 кэВ находится в диапазоне от 1.3 до 3.6 кэВ. Разрешение детектирующей системы на основе сцинтиллятора CsI(Tl) размером  $2 \times 2 \times 2.4 \text{ мм}^3$  для энергий от 59.54 до 1332.5 кэВ составило 22.8–86 кэВ.

*Resume.* Spectra of gamma radiation of sources  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{60}\text{Co}$  were measured by the detecting module based on uncooled planar silicon detector and by the detecting module of the type "scintillator - silicon photo sensor". Spectra of radiation for planar Si detector  $5 \times 5 \times 0.3 \text{ мм}^3$  contain peaks of full absorption for  $\gamma$ -rays energies up to 662 keV. The experimentally measured width of the peaks (FWHM) for energies  $E_\gamma$  from 59.54 keV to 662 keV is in the range from 1.3 to 3.6 keV. The resolution of the detecting system based on scintillator CsI(Tl)  $2 \times 2 \times 2.4 \text{ мм}^3$  for the energies from 59.54 keV to 1332.5 keV was 22.8–86 keV.

*Ключевые слова:* кремниевые планарные детекторы, энергетическое разрешение детектора, источники гамма-излучения.

*Key words:* silicon planar detectors, energy resolution of the detector, sources of gamma rays.

**Введение**

Изготовленные в НИЦ ХФТИ герметизированные модули неохлаждаемых планарных кремниевых детекторов толщиной 300 мкм и детектирующие системы типа сцинтиллятор CsI (Tl) – кремниевый PIN фотодиод, а также считывающая электроника показали высокую стабильность при использовании в экспериментах физики высоких энергий, ядерно-физических экспериментах, в устройствах контроля концентрации элементов, в медицинских диагностических устройствах [1-6]. Конструкция неохлаждаемого планарного Si детектора подробно описана в [2]. Экспериментально детально изучены особенности регистрации гамма-излучений [4-5]. Размеры Si детекторов  $2 \times 2 \times 0.3 \text{ мм}^3$ ,  $5 \times 5 \times 0.3 \text{ мм}^3$ . Размеры сцинтилляторов  $2 \times 2 \times 10 \text{ мм}^3$ ,  $2 \times 2 \times 2.4 \text{ мм}^3$ ,  $5 \times 5 \times 10 \text{ мм}^3$  (Рис. 1).

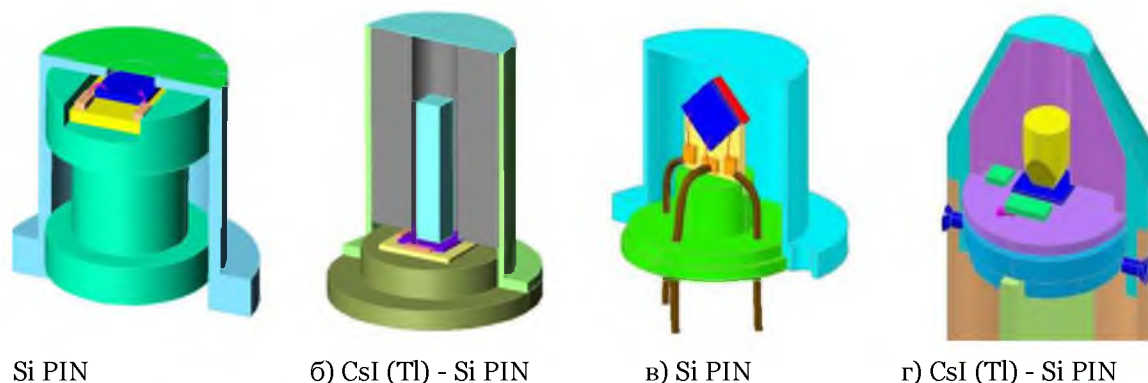


Рис. 1. Основные типы детектирующих модулей [1-3]  
 Fig. 1. Main types of detection modules [1-3]

После изготовления изделия тестируются по статическим характеристикам (токи утечки и емкость детектора в зависимости от напряжения обеднения) и по динамическим характеристикам (энергетическое разрешение детектора – полная ширина на полувысоте фотопика – FWHM). Ранее в [5,7] нами определены минимальные пороговые энергии, которые можно регистрировать такими детекторами и их предельное разрешение при комнатной температуре [7].

Для системы CsI (Tl) – Si минимальная энергия регистрации составила ~36 кэВ (ограничения обусловлены шумами регистрирующей системы) при разрешении FWHM ~25 кэВ. Для Si детектора минимальная энергия регистрации ~3,5 кэВ, а разрешение составило 0.7–0.9 кэВ для различных типов электроники [7].

Малый размер Si детекторов обуславливает трудности при регистрации квантов с высокими энергиями (большое количество комптоновски рассеянных квантов и низкая эффективность фотопоглощения).

Целью настоящей работы является определение верхнего энергетического предела регистрации гамма-квантов детектирующими модулями двух типов. Используются радиоактивные источники  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{60}\text{Co}$  с энергией в диапазоне 59.54 кэВ – 1332.5 кэВ. Изменялись и рассчитывались в GEANT 4 спектры выделенной энергии в детекторах малых размеров.

### Регистрация гамма-квантов с энергиями до 1,33 МэВ системами CsI(Tl) – Si PIN фотодиод малых размеров

Проведены измерения для детектирующей системы CsI(Tl) – Si PIN фотодиод с размером сцинтиллятора  $2 \times 2 \times 2.4 \text{ мм}^3$  (Рис. 2,3). Определено разрешение (FWHM) для линий излучения изотопов  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{60}\text{Co}$  с энергией в диапазоне 59.54 кэВ – 1332.5 кэВ.

Данные экспериментально определенного энергетического разрешения FWHM детектирующей системы на основе сцинтиллятора CsI(Tl) размером  $2 \times 2 \times 2.4 \text{ мм}^3$  в зависимости от энергии регистрируемого излучения представлены в табл. 1.

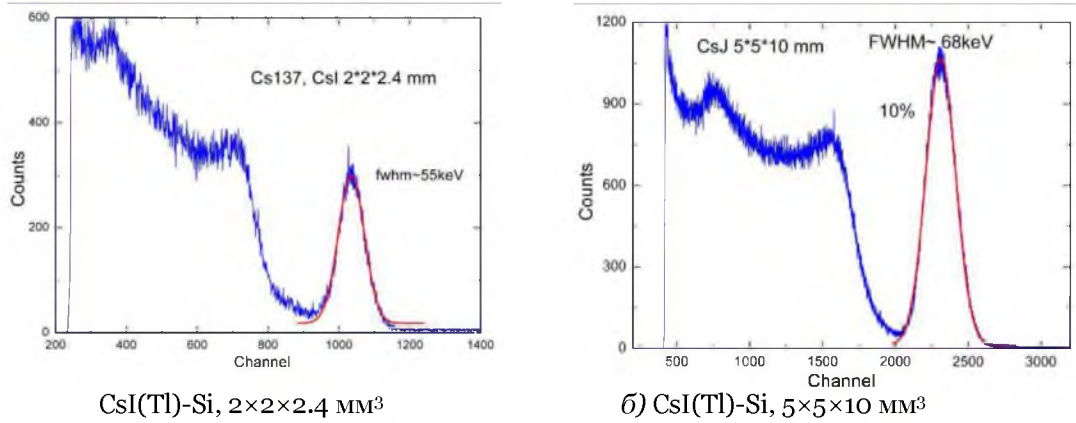


Рис. 2. Экспериментальные спектры излучения источника  $^{137}\text{Cs}$  измеренные детектором CsI(Tl)-Si  
 Fig. 2. Experimental spectra of a  $^{137}\text{Cs}$  source measured with a detector CsI(Tl)-Si

Таблица 1

Table 1

**Разрешение детектирующей системы на основе сцинтиллятора CsI(Tl) размером 2×2×2.4 мм<sup>3</sup>**  
**Resolution of the detector system based scintillator CsI (Tl) measuring 2 × 2 × 2.4 mm<sup>3</sup>**

Энергия, кэВ	59.54	122	511	662	1274.5	1332.5
FWHM	~22.8	~26.4	~52	~58	~71	~86

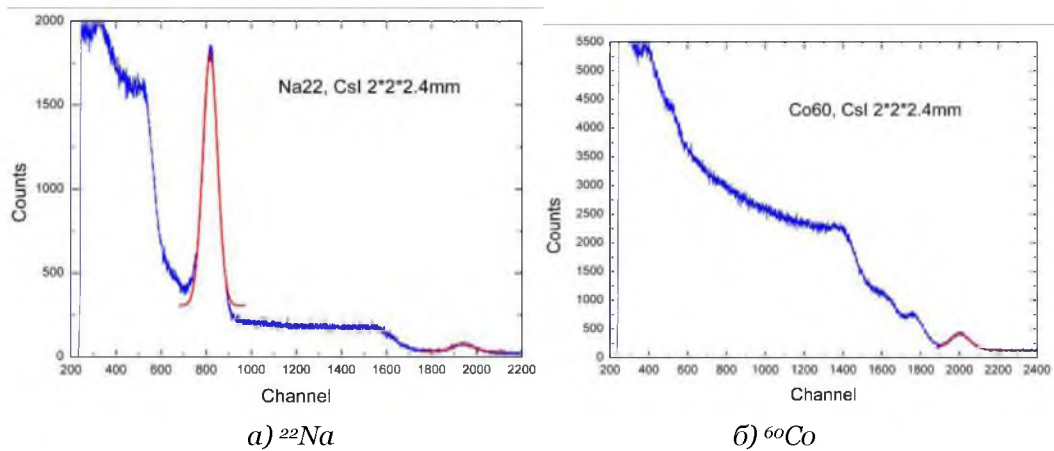


Рис. 3. Экспериментальные спектры излучения источников  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{60}\text{Co}$  измеренные детектором CsI(Tl)-Si  
 Fig. 3. Experimental emission spectra of the sources  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{60}\text{Co}$  measured with a detector CsI(Tl)-Si

Типичные расчеты в GEAN4 выделенной энергии, например, для  $^{60}\text{Co}$  показаны на рис. 4.

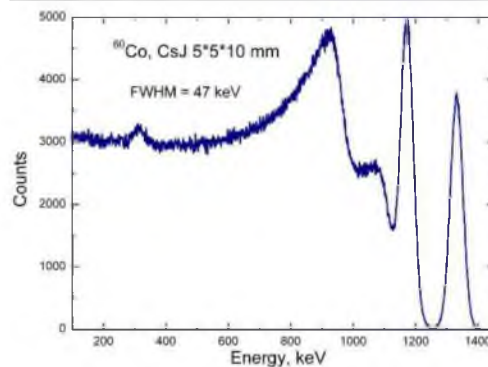


Рис. 4. Расчетные спектры выделенной энергии гамма-квантов от источника  $^{60}\text{Co}$  в детекторе CsI(Tl)-Si размером 5×5×10 мм<sup>3</sup>  
 Fig. 4. The calculated spectra of deposited energy of gamma rays from  $^{60}\text{Co}$  source in the detector a CsI(Tl)-Si with a size of 5×5×10 mm<sup>3</sup>

Измерения показывают возможность определения энергии излучения с энергией вплоть до 1.5 МэВ. Однако разрешение системы CsI(Tl)-Si падает, и в случае сложного спектра гамма-излучения, состоящего из нескольких линий, разделить близлежащие линии становится сложно.

### Регистрация гамма-квантов с энергиями до 0.662 МэВ планарными Si детекторами

Нижний предел измерений  $\sim 3.5$  кэВ ограничен защитной Al фольгой и шумами электроники системы  $\sim 1.5$  кэВ. Для определения верхнего энергетического предела регистрации гамма-квантов планарным детектором использовались источники излучения  $^{133}\text{Ba}$  и  $^{137}\text{Cs}$ .

Относительная интенсивность линий  $^{133}\text{Ba}$  составляет (энергия излучения в кэВ к интенсивности в процентах)  $E_\gamma/I_\gamma$ : 35/22.6; 53/2; 79.6/3; 81/34; 276/34; 276/7; 303/18; 356/62; 383/9.

На Рис. 5,6 представлены экспериментальные спектры излучения линий  $^{133}\text{Ba}$  для Si детектора  $5 \times 5 \times 0.3$  мм<sup>3</sup>, измеренные при падении квантов под прямым углом ( $90^\circ$ ) к поверхности детектора и под нулевым углом ( $0^\circ$ ) к поверхности детектора.

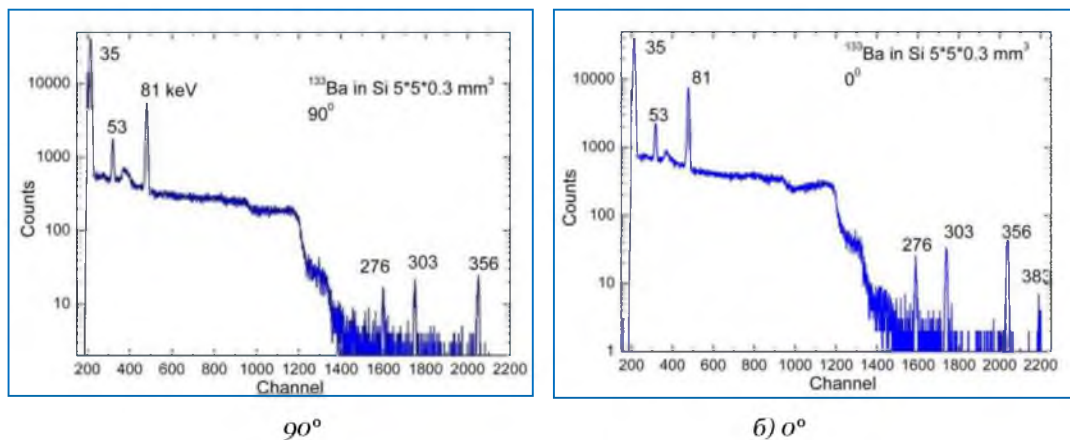


Рис. 5. Экспериментальные спектры излучения  $^{133}\text{Ba}$  измеренные Si детектором  $5 \times 5 \times 0.3$  мм<sup>3</sup>  
 Fig. 5. Experimental emission spectra of  $^{133}\text{Ba}$  are measured by the Si detector of  $5 \times 5 \times 0.3$  мм<sup>3</sup>

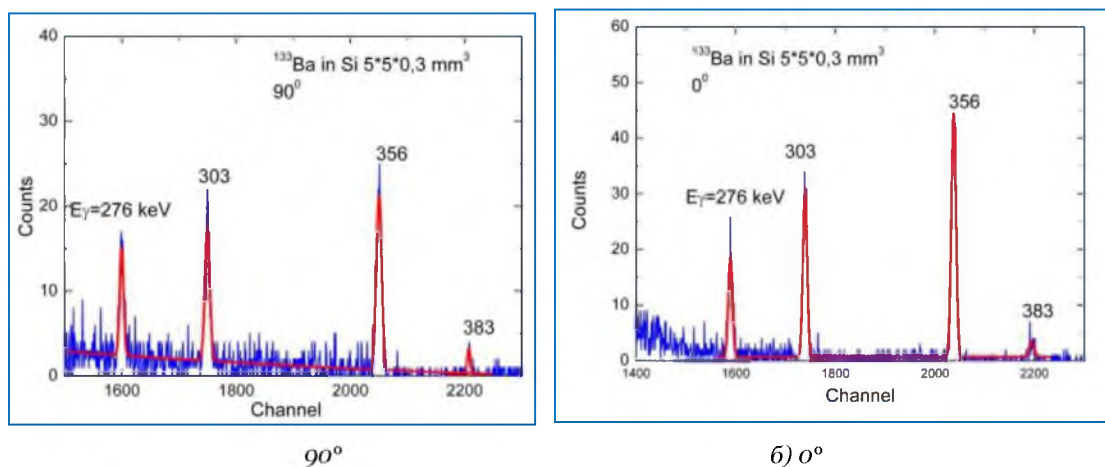


Рис. 6. Экспериментальные спектры излучения  $^{133}\text{Ba}$  измеренные Si детектором  $5 \times 5 \times 0.3$  мм<sup>3</sup> (высокоэнергетическая часть). Фитирование пиков проведено в ORIGIN 8  
 Fig. 6. Experimental emission spectra of  $^{133}\text{Ba}$  are measured by the Si detector of  $5 \times 5 \times 0.3$  мм<sup>3</sup> (high-coenergy part). The fitting of peaks is carried out in ORIGIN 8

Под углом  $0^\circ$  регистрируется в 2.5-3 раза больше высокоэнергетичных квантов. Расположение детектора – «ласточкин хвост» (Рис. 1,в). Линии легко идентифицируются, определены ширины линий излучения (FWHM). Расчет в GEANT4 согласуется с экспериментом (рис. 7).

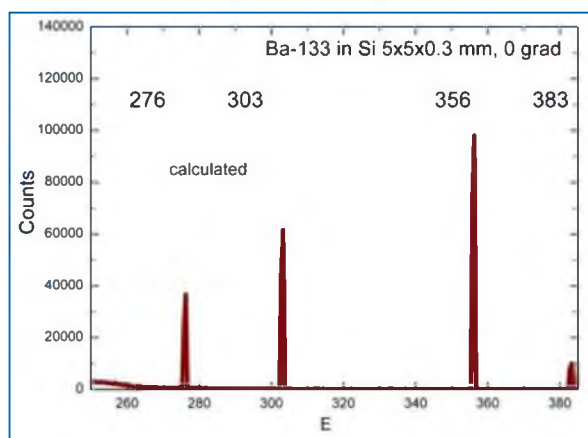


Рис. 7. Расчетные спектры выделенной энергии источника  $^{133}\text{Ba}$  в Si детекторе  $5 \times 5 \times 0.3 \text{ мм}^3$  (высокоэнергетическая часть)

Fig. 7. The calculated spectra of deposited energy of the  $^{133}\text{Ba}$  source in Si-detector  $5 \times 5 \times 0.3 \text{ мм}^3$  (high energy part)

Данные экспериментально определенного энергетического разрешения FWHM детектирующей системы на базе Si детектора размером  $5 \times 5 \times 0.3 \text{ мм}^3$  в зависимости от энергии регистрируемого излучения представлены в табл. 2.

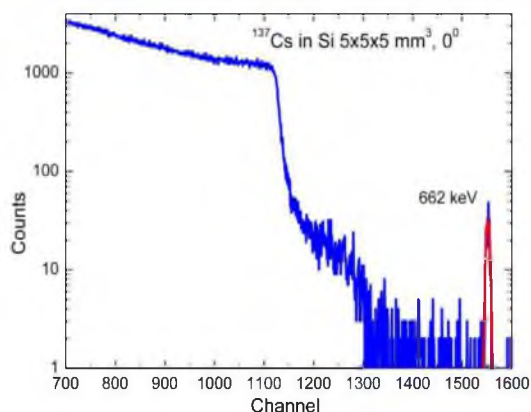
Таблица 2

Table 2

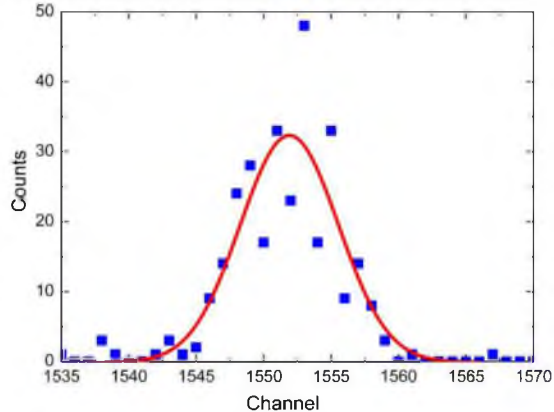
**Разрешение детектирующей системы на базе Si детектора размером  $5 \times 5 \times 0.3 \text{ мм}^3$**   
**The resolution of the detection system based on Si detector with a size of  $5 \times 5 \times 0.3 \text{ мм}^3$**

Энергия, кэВ	59.54	53	81	276	303	356	383	662
FWHM	~1.3	~1.62	~1.67	~1.58	~1.78	~1.94	~2.03	~3.6

На рис. 8–10 представлены экспериментальные и расчетный спектры излучения источника  $^{137}\text{Cs}$ ,  $E_\gamma=662 \text{ кэВ}$ , измеренные Si детектором  $5 \times 5 \times 0.3 \text{ мм}^3$ , измеренные при падении квантов под прямым углом ( $90^\circ$ ) к поверхности детектора и под нулевым углом ( $0^\circ$ ) к поверхности детектора.



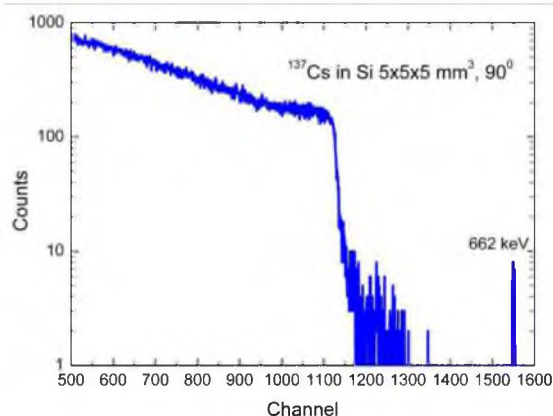
а) Экспериментальный спектр



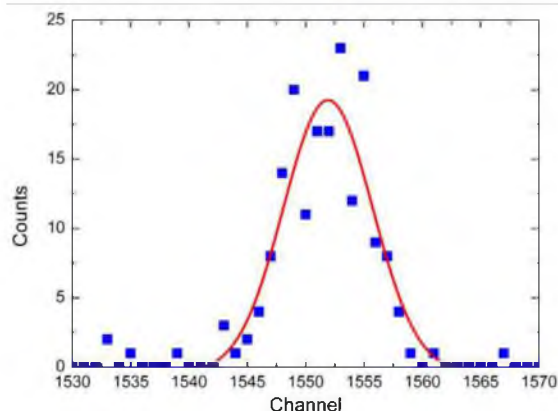
б) Пик фотопоглощения

Рис. 8. Экспериментальные спектры излучения источника  $^{137}\text{Cs}$ , измеренные Si детектором  $5 \times 5 \times 0.3 \text{ мм}^3$  при падении квантов под углом  $0^\circ$  к поверхности детектора

Fig. 8. Experimental spectra of a  $^{137}\text{Cs}$  source measured with a Si detector  $5 \times 5 \times 0.3 \text{ мм}^3$  in the fall of quanta at an angle of  $0^\circ$  to the surface of the detector

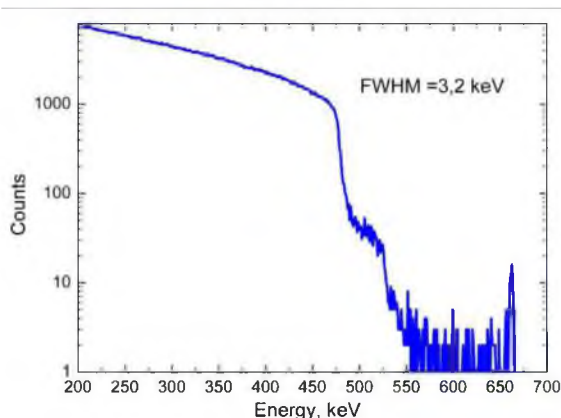


а) Экспериментальный спектр

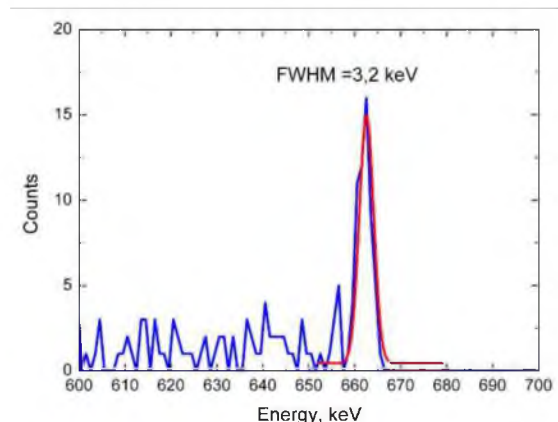


б) Пик фотопоглощения

Рис. 9. Экспериментальные спектры излучения источника  $^{137}\text{Cs}$ , измеренные Si детектором  $5 \times 5 \times 0.3 \text{ мм}^3$  при падении квантов под углом  $90^\circ$  к поверхности детектора  
 Fig. 9. Experimental spectra of a  $^{137}\text{Cs}$  source measured with a Si detector  $5 \times 5 \times 0.3 \text{ мм}^3$  in the fall of quanta at an angle of  $90^\circ$  to the surface of the detector



а) Расчетный спектр



б) Пик фотопоглощения

Рис. 10. Расчетный спектр излучения источника  $^{137}\text{Cs}$  в Si детекторе  $5 \times 5 \times 0.3 \text{ мм}^3$  при падении квантов под углом  $90^\circ$  к поверхности детектора  
 Fig. 10. The calculated spectrum of a  $^{137}\text{Cs}$  source in Si-detector  $5 \times 5 \times 0.3 \text{ мм}^3$  in the fall of quanta at an angle of  $90^\circ$  to the surface of the detector

Зарегистрированных квантов в фотопике больше при падении квантов под нулевым углом ( $0^\circ$ ) к поверхности детектора. Линии идентифицируются, определена ширина фотопика FWHM  $\sim 3,6 \text{ кэВ}$ . Требуется очень длительные экспозиции. Расчет в GEANT 4 подобен экспериментальным данным. Для получения фотопика в случае поглощения кванта с  $E_\gamma = 662 \text{ кэВ}$  необходимо поглотить электрон с энергией  $\sim 660 \text{ кэВ}$ , средний пробег которого в кремнии около 1.5 мм. Траектория электрона должна лежать в плоскости детектора. Регистрация таких квантов является почти предельным случаем для тонкого планарного детектора.

### Выводы

Таким образом, определены верхние энергетические пределы регистрации гамма-квантов детектирующими модулями малых размеров и двух типов. Использованы радиоактивные источники  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{60}\text{Co}$  с энергией в диапазоне  $59.54 \text{ кэВ} - 1332.5 \text{ кэВ}$ .



Экспериментально определенное разрешение детектирующей системы на основе сцинтиллятора CsI(Tl) размером  $2 \times 2 \times 2.4$  мм<sup>3</sup> составило: для энергии 59.54 кэВ – FWHM  $\sim 22.8$  кэВ, для энергии 122 кэВ – FWHM  $\sim 26.4$  кэВ, для энергии 511 кэВ – FWHM  $\sim 52$  кэВ, для энергии 662 кэВ – FWHM  $\sim 58$  кэВ, для энергии 1274.5 кэВ – FWHM  $\sim 71$  кэВ, для энергии 1332.5 кэВ – FWHM  $\sim 86$  кэВ. Спектры излучения для Si планарного детектора  $5 \times 5 \times 0.3$  мм<sup>3</sup>, несмотря на чрезвычайно малую эффективность регистрации, содержат пики полного поглощения для энергий квантов до 662 кэВ. Экспериментально определенное разрешение детектирующей системы Si детектором  $5 \times 5 \times 0.3$  мм<sup>3</sup> составило: для энергии 59.54 кэВ – FWHM  $\sim 1.3$  кэВ, для энергии 53 кэВ – FWHM  $\sim 1.62$  кэВ, для энергии 81 кэВ – FWHM  $\sim 1.67$  кэВ, для энергии 276 кэВ – FWHM  $\sim 1.58$  кэВ, для энергии 303 кэВ – FWHM  $\sim 1.78$  кэВ, для энергии 356 кэВ – FWHM  $\sim 1.94$  кэВ, для энергии 383 кэВ – FWHM  $\sim 2.03$  кэВ, для энергии 662 кэВ – 3.6 кэВ.

### Список литературы

1. Vasilyev G.P., Voloshin V.K., Kiprich S.K. et al. 2010. Encapsulated modules of silicon detectors of ionizing radiation. Problems of atomic science and technology, № 3, Series: Nuclear Physics Investigations (54): 200-204.
  2. Maslov N.I. 2013. Physical and technological aspects of creation and applications of silicon planar detectors. Problems of atomic science and technology, № 2, Series: Nuclear Physic Investigations (84): 165-171.
  3. Kulibaba V.I., Maslov N.I., Naumov S.V., Ovchinnik V.D., Prokhorets I.M. 2001. Readout electronics for multichannel detectors. Problems of Atomic Science and Technology. Ser.:NPI. 5(39): 177-179.
  4. Bochek G.L., Deiev O.S., Maslov N.I., Voloshyn V.K. 2011. X-ray lines relative intensity depending on detector efficiency, foils and cases thickness for primary and scattered spectra. Problems of atomic science and technology, № 3, Series: Nuclear Physic Investigations (55): 42-49.
  5. Vasiliev G.P., Voloshyn V.K., Deiev O.S. et al. 2014. Measurement of Radiation Energy by Spectrometric Systems Based on Uncooled Silicon Detectors. Journal of Surface Investigation. X ray. Synchrotron and Neutron Techniques. 2(8): 391-397.
  6. Vasiliev G.P., Voloshyn V.K., Deiev O.S. et al. 2012. Radiation dose determination by dual channel spectrometr in energy range 0.005...1 MeV. Problems of atomic science and technology, 4 (80). Series: Nuclear Physic Investigations (59): 205-209.
  7. Деев А.С., Мазилов А.А., Наумов С.В., Шулика М.Ю. 2015. Энергетическое разрешение спектрометра на основе неохлаждаемого Si планарного детектора и предварительного усилителя с емкостной и резистивно-емкостной обратной связью. Belgorod State University Scientific Bulletin, Mathematics & Physics, 23 (220), вып. 41: 62-70.
- Deiev O.S., Mazilov A.A., Naumov S.V., Shulika M.Yu. 2015. Energy resolution of the spectrometer based on uncooled planar Si detector and pre-amplifier with capacitive and resistive-capacitive feedback. Belgorod State University Scientific Bulletin, Mathematics & Physics, 23 (220), issue 41: 62-70.