ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ, МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

УДК 539.1.074.55

ИЗМЕРЕНИЕ ФОНА ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ НА УСКОРИТЕЛЬНОМ ИСТОЧНИКЕ НЕЙТРОНОВ VITA

©2027 г. А. С. Козлов[b], В. И. Комаров[b], В. В. Поросев[a,b],*, С. Ю. Таскаев[a,b]

[a]*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера*

Сибирского отделения Российской академии наук

Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

[b]*Новосибирский государственный университет*

Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

**e-mail: porosev@inp.nsk.su*

Поступила в редакцию 29.09.2026

После доработки 29.10. 2026

Принята к публикации 06.11. 2026

С развитием методики бор-нейтронозахватной терапии на базе ускорительных источников нейтронов возникла необходимость создания систем, позволяющих локализовать в пространстве положение области, где реально накапливается препарат, содержащий ^{10}B в теле пациента. Основными маркерами реакции ^{10}B $(n,\alpha)^7$Li являются испускаемые гамма-кванты с энергией 478 кэВ. Вместе с тем сама генерация нейтронов неразрывно связана с генерацией сопутствующего гамма-излучения как из литиевой мишени, так и из активируемых нейтронами окружающих конструкционных материалов. Целью настоящей работы являлось измерение спектра и интенсивности фонового потока гамма-квантов с использованием пролетного детектора на основе CdTe. Интенсивность регистрируемого потока на расстоянии 1.3 м от мишени составила около 6.7 кГц при работы ускорителя с энергией пучка 2.1 МэВ и током 1мА, что позволяет оценить ожидаемый входной поток событий величиной до 70 кГц на канал электроники регистрации для реального сценария облучения. Энергетическое разрешение разработанного детектора составляет примерно 2.4 кэВ для фотонов с энергией 59.5 кэВ при постоянной времени интегрирования зарядочувствительного усилителя 100 мкс и 3.6 кэВ при постоянной времени 9.1 мкс, что достаточно для решения поставленной задачи.

Ключевые слова: спектроскопия, приборы для биологии и медицины.

1. ВВЕДЕНИЕ

Бор-нейтронозахватная терапия (БНЗТ) представляет собой метод избирательного уничтожения клеток злокачественных опухолей посредством облучения их тепловыми нейтронами, при котором в опухолевых клетках предварительно накапливается препарат, содержащий бор ^{10}B. Для исследования методики БНЗТ в Институте ядерной физики СО

РАН им. Г.И. Будкера был создан ускорительный источник нейтронов VITA, который состоит из электростатического тандемного ускорителя заряженных частиц, литиевой нейтроногенерирующей мишени и системы формирования потока эпитепловых нейтронов [1]. Основными маркерами реакции $^{10}B(n,\alpha)^{7}Li$ являются испускаемые гамма-кванты с энергией 478 кэВ. В качестве средств локализации источника такого излучения предлагаются решения на основе гамма-камер [2], так называемые системы BNCT-SPECT на основе массива полупроводниковых детекторов, а также системы узконаправленных коллиматоров [3] и гамма-спектрометров [4]. Вместе с тем генерация потока нейтронов неразрывно связана с получением сопутствующего гамма-излучения как из самой литиевой мишени [5], так и из активируемых нейтронами окружающих конструкционных материалов. Поэтому задача регистрации фотонов, ассоциированных с захватом нейтрона атомом бора в облучаемом объекте, осложняется необходимостью выделения полезного сигнала на фоне линии 511 кэВ, возникающей в результате аннигиляции позитронов, рождающихся из-за взаимодействия жесткого гамма-излучения с веществом детектора и материалом окружающих конструкций.

В качестве детектора, позволяющего осуществлять пространственную локализацию источника излучения на установке VITA, планируется реализовать комптоновскую гамма-камеру, которая состоит из двух основных детекторных слоев. В первом детекторе (рассеивателе) фотон передает часть своей энергии и отклоняется на угол θ, затем он попадает во второй детектор (поглотитель), где полностью теряет оставшуюся энергию. Измеряя координаты взаимодействий в обоих детекторах и переданную энергию, можно рассчитать конус возможных направлений на источник излучения для каждого события и далее реконструировать положение источника [6].

Основной целью данной работы являлось измерение спектра и интенсивности фонового гамма-излучения на действующей установке БНЗТ, которое будет приходить на первый рассеивающий (пролетный) детектор, для формирования технических требований к нему.

2. ОПИСАНИЕ СПЕКТРОМЕТРА

Для моделирования работы пролетного детектора гамма-камеры использовался детектор на основе Pt/CdTe/In компании ACRORAD размером 6.1×6.1×1 мм^3. Сигнальный электрод площадью 4×4 мм^2 окружен охранным кольцом, а анод из индия формирует с материалом детектора диод Шоттки, что кардинально снижает величину токов утечки и позволяет работать при высоком напряжении, приложенном к детектору, даже при комнатной температуре [7]. Рабочее напряжение детектора составляет +700 В. Сигнал от детектора поступает на вход гибридного зарядочувствительного усилителя (ЗЧУ) на основе

дискретного полевого транзистора и малошумящего усилителя 1432УД19А (НПП “Пульсар”). Схема разработанного усилителя показана на рис. 1. Сигнал с выхода усилителя поступает на вход цифрового многоканального анализатора CAEN DT5780, оснащенного встроенным настраиваемым трапецеидальным фильтром [8]. В усилителе тестировались две модели малошумящих полевых транзисторов: 2П341Б (НПП “Пульсар”) и 2SK2394 (ON Semiconductor). Добавочное применение следящей обратной связи по питанию (bootstrapping) позволяет уменьшить влияние емкости детектора на шумы усилителя [9, 10].

Рис. 1. Схема спектрометрического усилителя.

Пример регистрируемого спектра от источника гамма-излучения Am-241 для детектора на основе CdTe (емкость примерно 1.5 пФ), а также кремниевого PIN-фотодиода площадью 7.5 мм^2 BP104 (Vishay) с емкостью около 7 пФ при напряжении смещения 30 В показан на рис. 2.

Рис. 2. Спектр гамма-излучения изотопа Am-241, регистрируемый детектором на основе CdTe и кремниевым PIN-диодом.

Применение кремниевого детектора рассматривается как возможная альтернатива детектору на основе CdTe. Низкая эффективность регистрации фотонов с энергией 59.5 кэВ кремниевым детектором приводит к существенно отличной форме спектра в области низких энергий при регистрации сравнимого числа событий в пике полного поглощения. Вместе с тем его применение позволяет получить амплитуду сигнала, в 1.22 раза большую, за счет меньшей величины работы на образование электрон-дырочных пар в материале по сравнению с амплитудой сигнала от детектора на основе CdTe. На рис. 3 представлена зависимость квадрата энергетического разрешения детектора (его ширины на полувысоте) от длительности фронта нарастания трапецеидального импульса T_{rise}, в то время как ширина плоской вершины импульса T_{flat} оставалась неизменной и равнялась 500 нс. Также на этом рисунке представлены результаты совместной аппроксимации данных выражением [11, 12], описывающим квадратичное значение энергетического разрешения детектора для трапецеидального фильтра:

$$\Delta E^2 = \frac{2\alpha(C_{\text{det}}+C_{\text{FET}})^2}{T_{\text{rise}}} + \beta(C_{\text{det}} + C_{\text{FET}})^2 + \mathrm{c}_{\text{par}}\left(I_L + \frac{2k_{\text{B}}T}{e^- R_f}\right)\left(T_{\text{flat}} + \frac{2T_{\text{rise}}}{3}\right).$$

Здесь C_{det} – емкость детектора, включая паразитную емкость монтажа, C_{FET} – входная емкость транзистора, I_L – ток утечки детектора, R_f – сопротивление резистора в обратной связи усилителя, k_{B} – постоянная Больцмана, T – температура, α, β и c_{par} – константы, описывающие вклад последовательных ($1/f$) и параллельных шумов.

Рис. 3. Энергетическое разрешение детектора в зависимости от величины параметра T_{rise}.

Из представленных данных следует, что шумовые характеристики двух транзисторов обладают близкими характеристиками и энергетическое разрешение детектора достигает значения около 2.4 кэВ для энергии излучения 59.5 кэВ при времени формирования импульса, равном примерно 2.4 мкс.

3. ИЗМЕРЕНИЯ НА УСТАНОВКЕ VITA

При измерениях на установке VITA детектор располагался на расстоянии 1.3 м от мишени, генерирующей нейтроны, под углом 90° от оси источника. Сбоку детектор защищался бетонными блоками толщиной 15 см. Перед детектором был установлен свинцовый коллиматор толщиной 1.5 см с отверстием диаметром 5 мм. Для подавления низкоэнергетического излучения дополнительно перед детектором устанавливался фильтр толщиной 4 мм из свинца, а для защиты от нейтронов устанавливался слой полиэтилена толщиной 2 см с массовой долей лития 10%. На рис. 4 показан нормированный спектр излучения при времени экспозиции 1 ч для работы ускорителя с энергией пучка 2.1 МэВ и током 1мА.

Рис. 4. Спектр гамма-излучения, регистрируемый пролетным детектором на установке VITA.

Несмотря на отсутствие бора на установке, в спектре присутствует линия с энергией 478 кэВ за счет реакции неупругого рассеивания протонов на ядрах мишени из лития ^{7}Li(p,p'γ)^{7}Li. Линия с энергией 511 кэВ (аннигиляционный пик) имеет сравнимую интенсивность, она обусловлена реакцией рождения электрон-позитронных пар жесткими гамма-квантами за счет захвата рождающихся тепловых нейтронов водородом в контуре водяного охлаждения подложки ^{1}H(n,γ)^{2}H с испусканием фотонов с энергией 2.22 МэВ и захвата нейтронов азотом воздуха ^{14}N(n, γ)^{15}N. Кроме того, в спектре наблюдаются фотоны с энергией около 1.3 МэВ, которые связаны с активацией атмосферного аргона [13]

$$^{40}\mathrm{Ar}(n,\gamma)^{41}\mathrm{Ar} \xrightarrow{\beta^-} {}^{41}\mathrm{K} + \gamma(1293\ \text{кэВ})\ .$$

Линии излучения в области энергий 84.9, 72.8 и 74.9 кэВ обусловлены рентгеновской флуоресценцией свинца (Pb), который активируется под воздействием сопутствующего гамма-излучения. Линии с энергией 558, 651 и 95.9 кэВ в спектре гамма-излучения, регистрируемом CdTe-детектором, представляют собой линии радиационного захвата тепловых нейтронов изотопом ^{113}Cd, который является неотъемлемой частью самого кристалла детектора.

Интенсивность регистрируемого потока событий составила $6.7\cdot10^{3}$ с$^{-1}$, что позволяет оценить ожидаемый входной поток на уровне примерно $7\cdot10^{4}$ с$^{-1}$ на канал электроники регистрации при планируемом токе ускорителя 10 мА.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из полученных данных можно сформулировать следующие требования к каналам регистрации пролетного детектора для комптоновской гамма-камеры. При планируемых режимах работы ускорителя ожидаемый поток событий будет составлять $7 \cdot 10^4$ $с^{-1}$. При среднем энерговыделении около 400 кэВ на регистрируемую частицу средний входной ток в канале детектора будет 1.5 нА, что не будет существенно ограничивать работу ЗЧУ, но будет приводить к заметному смещению нулевой линии. При переходе на сопротивление R_f=10 МОм, как показано на рис. 3, энергетическое разрешение детектора ухудшается до 3.6 кэВ, но, тем не менее, оно остается достаточным для разрешения линий с энергией 478 и 511 кэВ. Вместе с тем даже при значении параметра T_{rise}= 1 мкс для трапецеидального фильтра около 20% импульсов будет искажено из-за наложений, что требует наличия схемы блокировки регистрации импульсов, если интервал между ними меньше времени установления пиковой амплитуды импульса. Измерение спектра излучения из объекта на реальной установке требует создания коллиматора, исключающего регистрацию излучения из самой мишени, и установки дополнительной защиты для уменьшения потока фоновых событий от взаимодействия рассеянных нейтронов с элементами конструкции детектора. Применение Pt/CdTe/In-детектора позволяет реализовать пролетный детектор с хорошим энергетическим разрешением, однако кремниевые PIN-диоды могут представлять собой более доступную альтернативу.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Taskaev S., Berendeev E., Bikchurina M. et al.* Biology. 2021. V. 10. № 5. P. 350. https://doi.org/10.3390/biology10050350
2. *Chiu I-H., Osawa T., Sumita T., Ninomiya K., Takeda S., Takahashi T.* Med. Phys. 2025. V. 52 P. e70062. https://doi.org/10.1002/mp.70062
3. *Manabe M., Nakamura S., Murata I.* Rep. Pract. Oncol. Radiother. 2016. V. 21. № 2. P. 102. https://doi.org/10.1016/j.rpor.2015.04.002
4. *Maltseva V.D., Bykov T.A., Chesnokova Y.L. et al.* Appl. Radiat. Isot. 2026. V. 234. P. 112648. https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2026.112648
5. *Taskaev S., Bykov T., Kasatov D. et al.* Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2021. V. 502. P. 85. https://doi.org/10.1016/j.nimb.2021.06.010

6. *Kim S.M., Lee J.S.* Biomed. Eng. Lett. 2024. V. 14. P. 1175. https://doi.org/10.1007/s13534-024-00418-8
7. *Nakazawa K., Oonuki K., Tanaka T. et al.* IEEE Trans. Nucl. Sci. 2004. V. 51. № 4. P. 1881. https://doi.org/10.1109/TNS.2004.832684
8. *Jordanov V.T., Knoll G.F., Huber A.C., Pantazis J.A.* Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 1994. V. 353. P. 261. https://doi.org/10.1016/0168-9002(94)91652-7
9. *Zhou H., Yang W., Li Z., Li X., Zheng Y.* Rev. Sci. Instrum. 2014. V. 85. № 1. P. 013111. https://doi.org/10.1063/1.4862295
10. *Hoyle C., Peyton A.J.* IEE Colloq. Anal. Signal Process. Oxford, UK, 1998. P. 7/1. https://doi.org/10.1049/ic:19980849
11. *Goulding F.S.* Instrum. Methods. 1972. V. 100. № 3. P. 493. https://doi.org/10.1016/0029-554X(72)90828-2
12. *Spieler H.* Semiconductor Detector Systems. Oxford University Press, Series on Semiconductor Science and Technology. V. 12, 2005.
13. *Magni C., Postuma I., Ferrarini M. et al.* Appl. Radiat. Isot. 2020. V. 165. P. 109314. https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2020.109314.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Схема спектрометрического усилителя

Рис. 2. Спектр гамма-излучения изотопа Am-241, регистрируемый детектором на основе CdTe и кремниевым PIN-диодом

Рис. 3. Энергетическое разрешение детектора в зависимости от величины параметра T_{rise}. Показаны данные для разных типов используемых транзисторов и детекторов излучения

Рис. 4. Спектр гамма-излучения, регистрируемый пролетным детектором на установке VITA.

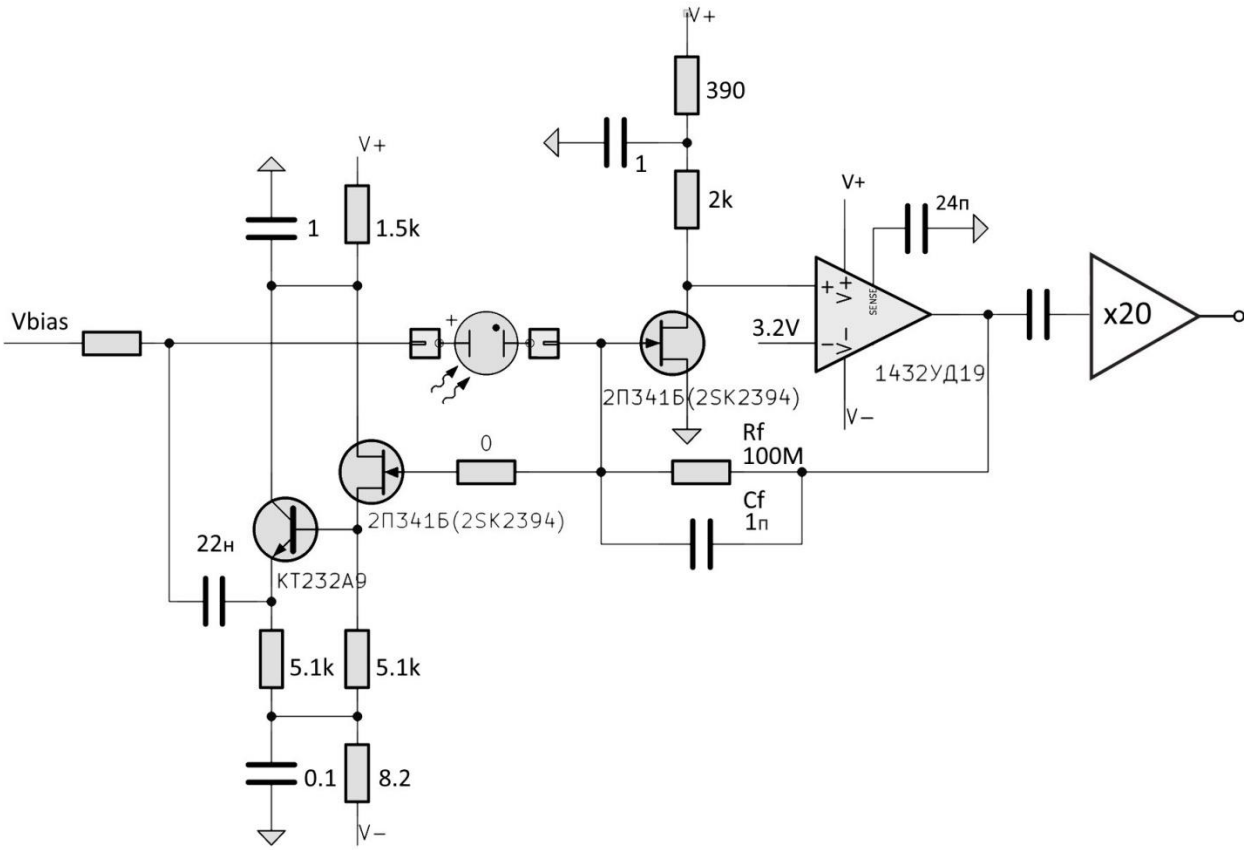

V+
390
1
2k
V+
24п
1
1.5k
Vbias
3.2V
1432УД19
x20
2П341Б(2SK2394)
V−
0
Rf
100M
Cf
1п
2П341Б(2SK2394)
22н
КТ232А9
5.1k
5.1k
0.1
8.2
V−

Рис. 1.

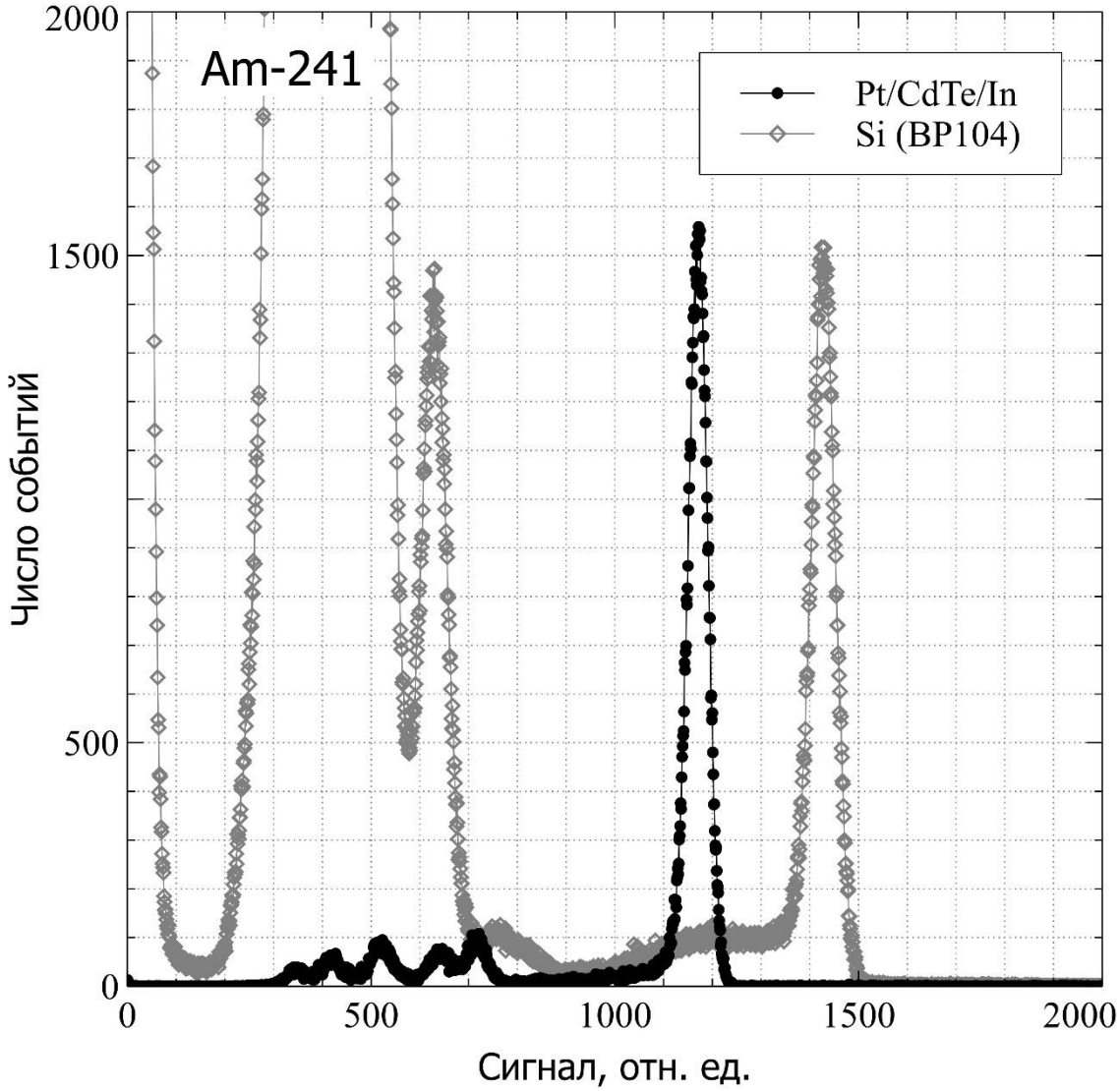

Am-241
Pt/CdTe/In
Si (BP104)
Число событий
Сигнал, отн. ед.
0
500
1000
1500
2000

Рис. 2.

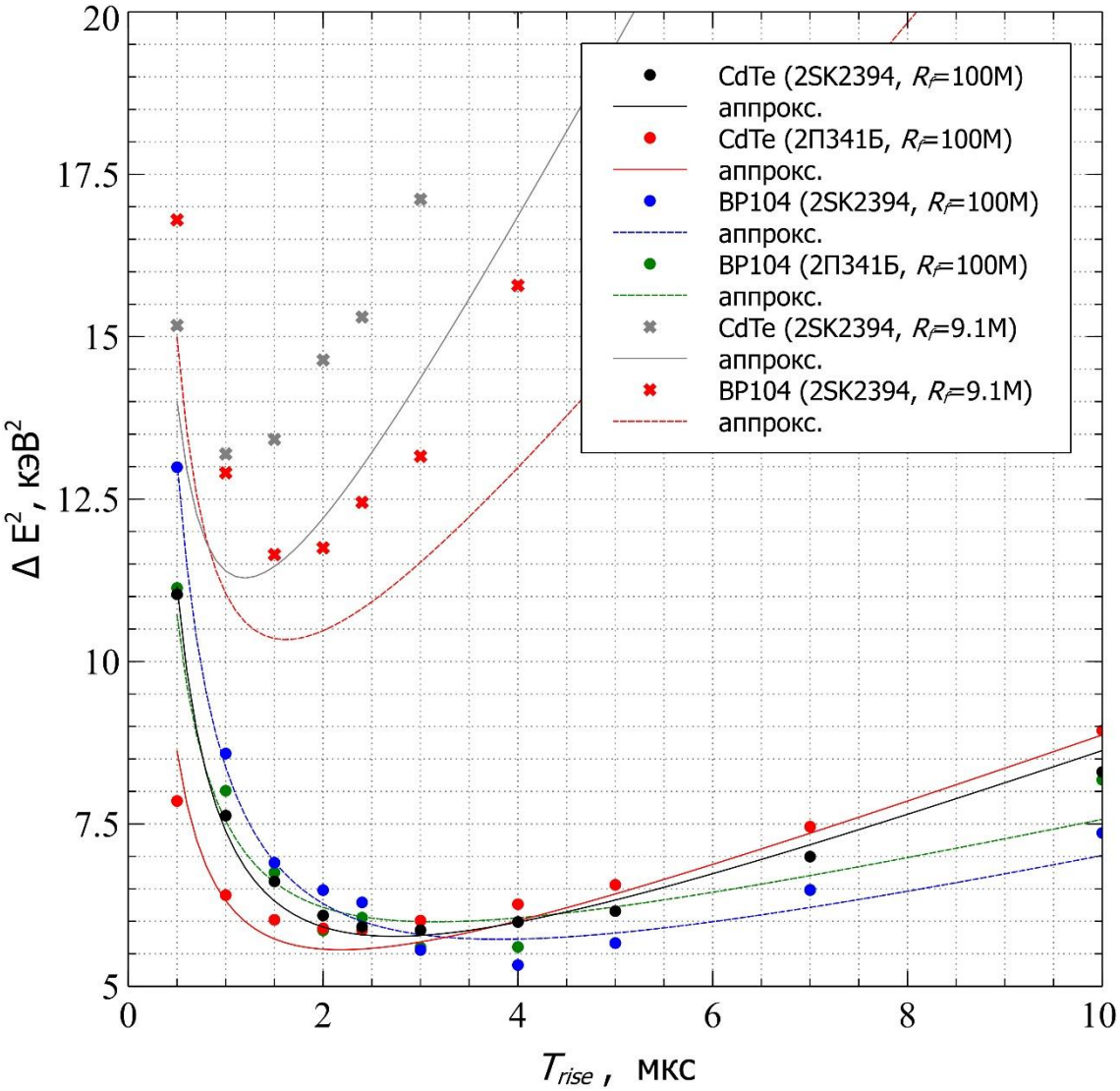

CdTe (2SK2394, R_f=100M)
аппрокс.
CdTe (2П341Б, R_f=100M)
аппрокс.
BP104 (2SK2394, R_f=100M)
аппрокс.
BP104 (2П341Б, R_f=100M)
аппрокс.
CdTe (2SK2394, R_f=9.1M)
аппрокс.
BP104 (2SK2394, R_f=9.1M)
аппрокс.
ΔE^2, кэВ^2
T_{rise}, мкс
20
17.5
15
12.5
10
7.5
5
0
2
4
6
8
10

Рис. 3.

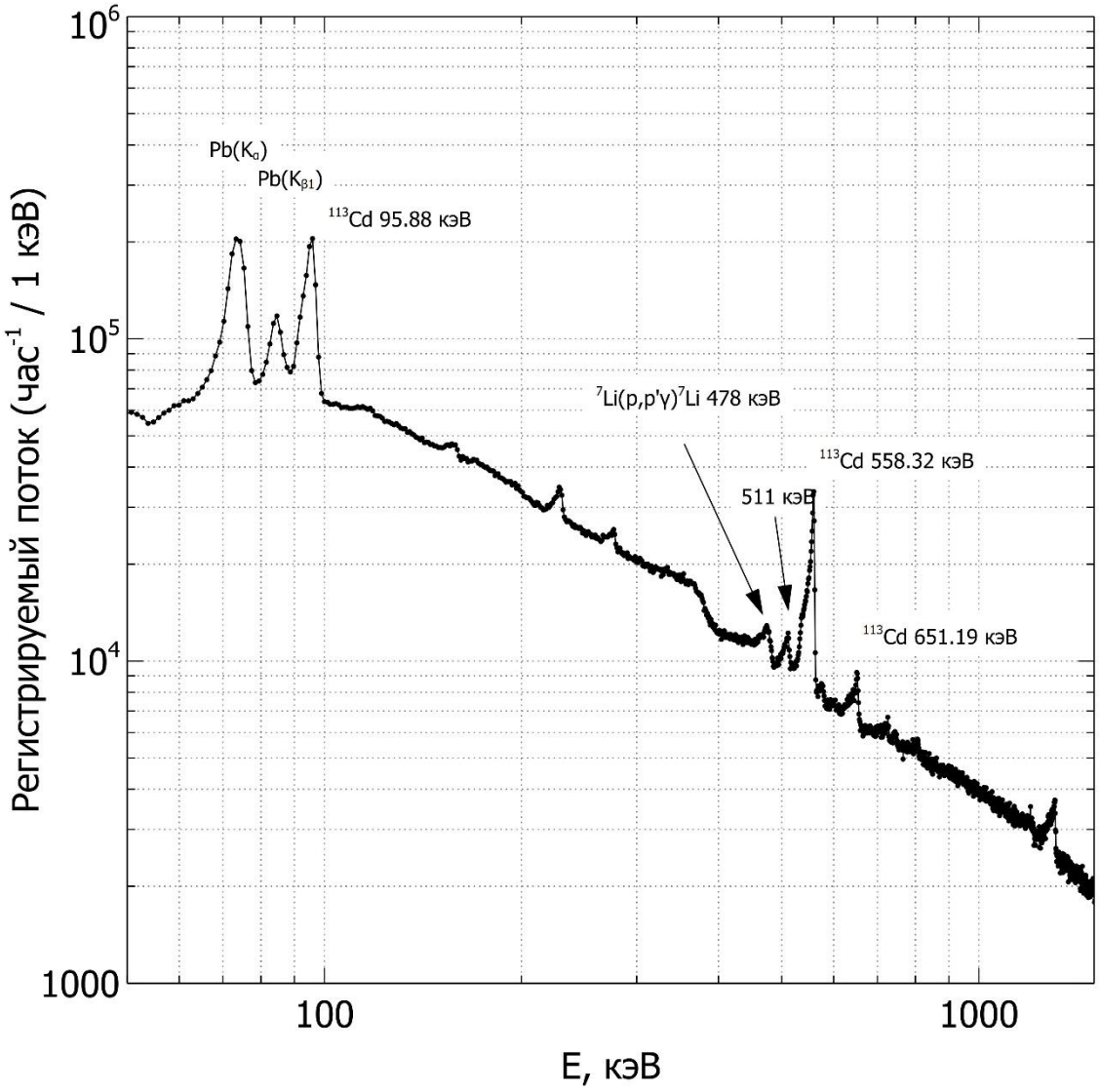

Pb(Kα)
Pb(Kβ1)
113Cd 95.88 кэВ
7Li(p,p'γ)7Li 478 кэВ
113Cd 558.32 кэВ
511 кэВ
113Cd 651.19 кэВ
Регистрируемый поток (час-1 / 1 кэВ)
E, кэВ
10^6
10^5
10^4
1000
100
1000

Рис. 4.