

07;12

## Экспериментальное исследование рассеяния гамма-квантов тормозного излучения электронов ( $E_e = 11.8 \text{ MeV}$ ) на сверхмалые углы

© Г.Р. Алимов,<sup>1</sup> М.А. Кумахов,<sup>2</sup> А.Т. Муминов,<sup>1</sup> Т.М. Муминов,<sup>1</sup> К.М. Норбоев,<sup>3</sup> Б.С. Османов,<sup>3</sup> У.С. Салихбаев,<sup>4</sup> А.Н. Сафаров,<sup>3</sup> В.В. Скворцов,<sup>1</sup> Р.Д. Сулейманов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт прикладной физики  
Национального университета Узбекистана,  
700174 Ташкент, Узбекистан  
e-mail: tolib\_m@uzsci.net

<sup>2</sup> Институт рентгеновской оптики,  
Москва, Россия

<sup>3</sup> Самаркандский государственный университет,  
Самарканд, Узбекистан

<sup>4</sup> Институт ядерной физики АН Узбекистана,  
Ташкент, Узбекистан

(Поступило в Редакцию 18 августа 2006 г.)

В исследованиях углового распределения  $\gamma$ -квантов тормозного излучения электронов, рассеянных от поверхности рефлектора на угол  $166 \mu\text{rad}$ , обнаружен факт, соответствующий проявлению полного внешнего отражения  $\gamma$ -квантов с энергией  $E_\gamma \leq 300 \text{ keV}$ .

PACS: 23.20.En

### Введение

В соответствии с классической волновой теорией электромагнитного излучения [1] при падении мягкого ( $E \leq 10 \text{ keV}$ ) рентгеновского излучения с длиной волны  $\lambda$  на границу раздела двух сред с межатомными расстояниями  $d$  под углом меньше критического

$$\alpha_{\text{cr}} = (e \cdot h/E)(\rho Z N_A / \pi A m)^{1/2},$$

где  $E$  — энергия  $X$ -излучения;  $e$  и  $m$  — заряд и масса электрона;  $Z$ ,  $A$  и  $\rho$  — заряд, атомная масса и плотность вещества отражающей поверхности;  $h$  — постоянная Планка,  $N_A$  — число Авогадро, при  $\lambda > \alpha$ , излучение испытывает полное внешнее отражение (ПВО). Это явление широко используется при решении самых разнообразных практических задач (см., например, [2]).

В [3,4] показано, что это выражение справедливо и в диапазоне жесткого  $X$ - и  $\gamma$ -излучения, где  $\lambda \ll d$ , и ПВО может проявляться при углах  $\alpha_{\text{cr}} \leq 100 \mu\text{rad}$  и шероховатостях отражающей поверхности, достигающих  $\sim 500 \text{ \AA}$ . Экспериментально эффект ПВО  $\gamma$ -излучения до настоящего времени не обнаружен. Его открытие означало бы зарождение новой области физики и техники —  $\gamma$ -оптики, обуславливающей мощный технологический прорыв во многих областях науки и производства.

Ранее сообщалось о результатах моделирования эксперимента по ПВО тормозного излучения электронов ( $E_e = 13 \text{ MeV}$ ) [5].

В настоящей работе приведены результаты экспериментального исследования углового распределения  $\gamma$ -квантов при рассеянии на сверхмалые углы, соответствующие ожидаемому проявлению эффекта ПВО.

### Постановка и условия эксперимента

Исследования проведены на пучке тормозного излучения электронов (ТИЭ) микротрона МТ-22С с использованием пролетной базы длиной 118 м и в отдельных экспериментах — 330 м [6].

Схема эксперимента приведена на рис. 1. Выведенный из микротрона пучок электронов (энергия  $E_e = 11.8 \text{ MeV}$ , средний ток  $I_e \sim 1.5\text{--}2 \mu\text{A}$ , длительность и частота импульсов —  $\tau = 2.5 \mu\text{s}$  и  $f = 386 \text{ Hz}$  соответственно, сечение  $\sim \varnothing 5 \text{ mm}$ ) падает на тормозную мишень —  $T$  (вольфрам,  $\varnothing 40 \times 1 \text{ mm}$ ). Генерируемое в тормозной мишени ТИЭ (естественная расходимость  $\delta_T \approx 35 \text{ mrad}$ ) формируется по вертикали щелевым коллиматором  $G$  (горизонтально установленная симметричная оси  $Z$  пара пластин освинцованного стекла, размеры  $\Delta Z = 800$ ,  $\Delta Y = 300$ ,  $\Delta X = 30 \text{ mm}$ ,

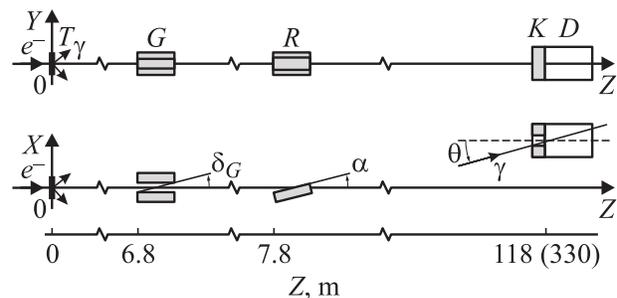
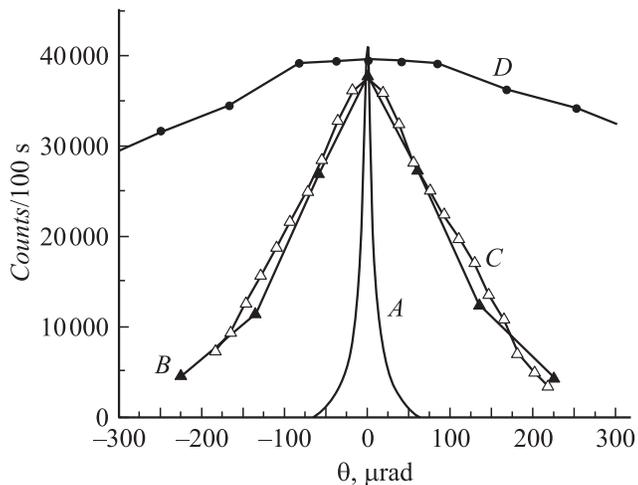


Рис. 1. Схема эксперимента:  $T$  — тормозная мишень,  $G$  — щелевой коллиматор,  $R$  — рефлектор,  $K$  — коллиматор детектора,  $D$  — детектор,  $Z$  — ось пучка ТИЭ.



**Рис. 2.** Угловые распределения сформированного пучка ТИЭ: *A* — расчетное  $\delta_G = 62.5 \mu\text{rad}$ ; *B, C, D* — экспериментальное  $\delta_G = 62.5, 62.5, 500 \mu\text{rad}$ ,  $Z_D = 118, 300, 118 \text{ m}$  соответственно (плато на вершине — эффект насыщения).

зазор щели  $\Delta h_G = 50 \mu\text{m}$ , полуапертура  $\delta_G = 62.5 \mu\text{rad}$ ). Сформированный пучок ТИЭ направляется на поверхность рефлектора *R* (пластина свинцованного стекла  $\Delta Z = 600$ ,  $\Delta Y = 300$ ,  $\Delta X = 30 \text{ mm}$ ), высота входного края которой, с учетом неопределенности в юстировке (см. ниже), составляет  $X_R = 25 \pm 10 \mu\text{m}$ , данные исследования проведены при углах падения  $\gamma$ -квантов на поверхность детектора  $\alpha \sim 0$ ,  $\sim 83$  и  $\sim 400 \mu\text{rad}$ . Гамма-кванты пучка ТИЭ, провзаимодействовавшие и не взаимодействовавшие с поверхностью рефлектора, регистрируются скintилляционным детектором *D* ( $\text{NaI(Tl)}$ ,  $\text{Ø} 63 \times 63 \text{ mm}$ ,  $\Delta E_\gamma / 1332 \text{ keV} \approx 10\%$ ) в свинцовом коллиматоре *K* с горизонтальной щелью ( $\Delta X_K = 1$ ,  $\Delta Y_K = 100$ ,  $\Delta Z_K = 150 \text{ mm}$ ). Угловые позиции детектора могут устанавливаться в интервале  $\theta \approx \pm 1 \text{ mrad}$  путем вертикального перемещения детектора с шагом  $\Delta X_D \geq 1 \text{ mm}$  ( $\Delta \theta \geq 8.5 \mu\text{rad}$ ) в плоскости  $Y_D = 0$ ,  $Z_D = 118 \text{ m}$  в пределах  $X_D = \pm 150 \text{ mm}$ . Запись спектрометрической информации на ИВМРС осуществлялась в совпадении с сигналами СВЧ-питания микротрона на период цикла ускорения, в котором регистрируется не более одного события (см. рис. 2, *D*).

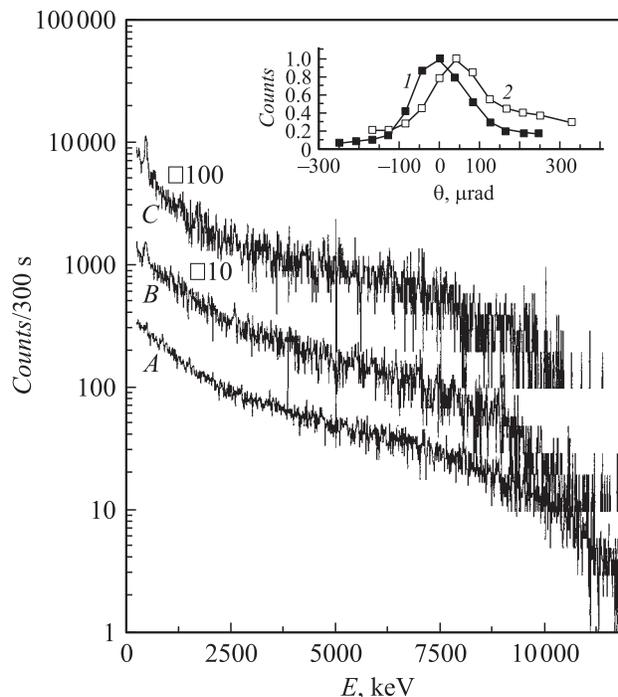
Угловые распределения (УР)  $\gamma$ -квантов ТИЭ в интервале углов  $\theta$  устанавливаются по интенсивностям (числу зарегистрированных событий)  $\gamma$ -спектров, измеренных в соответствующих позициях  $\theta$ .

Юстировка исходных ( $\alpha = 0$ ,  $X_D = 0$ ) вертикальных позиций входных и выходных краев щелевого коллиматора и рефлектора, а также центра детектора проводилась на пучке ТИЭ. Контроль и изменение этих позиций, а также параметров выведенного пучка электронов, падающих на тормозную мишень, осуществлялся дистанционно с использованием видеокамер с пульта микротрона [6]. Флуктуация установленных параметров

электронного пучка в течение 4–5 h — длительности отдельного эксперимента (юстировка элементов установки, градуировка спектрометра, измерения сигналов в выбранных позициях) не превышают 6%.

Отметим, что использование в щелевом коллиматоре и рефлекторе пластин освинцованного стекла обусловлено тем, что среди доступных материалов они имеют максимально гладкие поверхности, соответствующие 14-му классу чистоты. Тем не менее их использование ограничивает зазор щелевого коллиматора значением  $\Delta h_G = 50 \mu\text{m}$ . Кроме того, несмотря на достаточно большую протяженность пластин ( $\Delta Z_G = 800 \text{ mm}$ ) их относительно низкая плотность ( $\rho \sim 2.6 \text{ g/cm}^3$ ) приводит к уширению реального УР пучка ТИЭ по сравнению с расчетным значением ( $\delta_G = 62.5 \mu\text{rad}$ ) более чем в два раза ( $\delta_\gamma \sim 150 \mu\text{rad}$ ) и соответственно ограничивает значение угла наклона рефлектора величинами  $\alpha > g_x/2$ , и энергиями  $\gamma$ -квантов, при которых пик УР ожидаемого ПВО отделяется от пика УР не взаимодействовавших  $\gamma$ -квантов (рис. 2, *A, B* и *C*). Основной вклад в уширение сформированного пучка ТИЭ обусловлен процессами рассеяния  $\gamma$ -квантов на щелевом коллиматоре. Вклад рассеяния  $\gamma$ -квантов в воздухе невелик (см. [5] и рис. 2, *B* и *C*).

Влияние возможных вибраций на уширение пучка, по наблюдениям на расстоянии  $Z_D = 330 \text{ m}$  за пятном лазерного луча, прошедшего через зазор щелевого коллиматора, не обнаружено (установка размещена на глубине 10 m от поверхности Земли).



**Рис. 3.**  $\gamma$ -спектры сформированного пучка ТИЭ в позициях *A* —  $\theta = 0$ , *B* —  $100$ , *C* —  $290 \mu\text{rad}$ . На вставке — угловое распределение  $\gamma$ -квантов при угле наклона рефлектора: *1* —  $\alpha = 0$  и *2* —  $83 \mu\text{rad}$ .

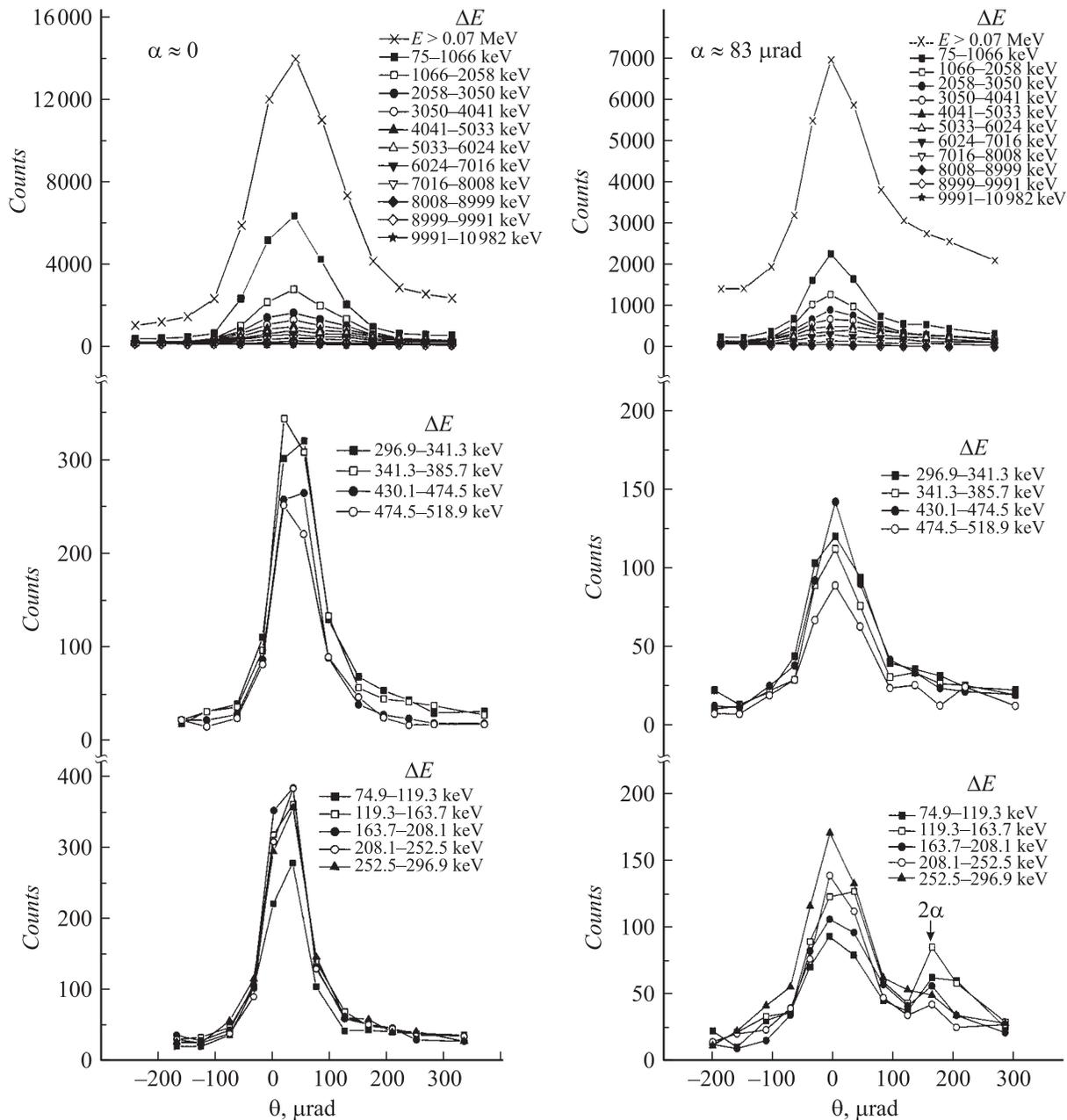


Рис. 4. Угловые распределения  $\gamma$ -квантов ТИЭ в отдельных энергетических интервалах, измеренных при угле наклона рефлектора  $\alpha \approx 0$  и  $83 \mu\text{rad}$ .

### Экспериментальные результаты и их обсуждение

Экспериментальные спектры непроявляющихся  $\gamma$ -квантов и ожидаемого ПВО имеют интенсивную „фоновую“ составляющую, генерируемую в процессах неупругого рассеяния  $\gamma$ -квантов на элементах установки, краях коллиматоров и рефлектора.

Ситуация осложняется ограничением числа измерительных позиций и длительности отдельных измерений до 100–300 с в одном эксперименте. В результате этих ограничений статистика в отдельных  $\gamma$ -спектрах (рис. 3)

недостаточна для детального анализа их трансформации в зависимости от угла  $\theta$ , но достаточна для установления УР интегрального потока  $\gamma$ -квантов и потоков в выбранных энергетических интервалах  $\Delta E$  (рис. 4).

Сравнение УР  $\gamma$ -квантов с  $E_\gamma \leq E_e$ , измеренных при углах  $\alpha \approx 0$  и  $83 \mu\text{rad}$  (рис. 3, вставка), позволяет заключить, что закономерности геометрической оптики при взаимодействии  $\gamma$ -излучения с поверхностью рефлектора сильно „размыты“ процессами неупругого рассеяния и краевыми эффектами:

— нижние ( $\theta \leq 0$ ) склоны УР вместо ожидаемого резкого спада затянуты, но их относительное смещение

соответствует ожидаемому из геометрического рассмотрения значению  $\Delta\theta \sim 30 \mu\text{rad}$ ;

— верхние ( $\theta > 0$ ) склоны УР затянuty относительно нижних, причем при  $\alpha \sim 83 \mu\text{rad}$  они заметно выше, чем при  $\alpha \sim 0$ ;

Очевидно, что эти факты обусловлены процессами рассеяния и, возможно, ожидаемым эффектом ПВО.

Более интересную информацию можно получить при выделении из интегральных УР их составляющих в отдельных  $\Delta E_\gamma$  энергетических интервалах  $\gamma$ -квантов (рис. 4):

— в УР  $\gamma$ -квантов, измеренных при  $\alpha = 83 \mu\text{rad}$  в интервалах  $\Delta E_\gamma = 75-119, \dots, 253-297 \text{ keV}$ , помимо пика не взаимодействовавших с рефлектором  $\gamma$ -квантов при  $\theta \sim 0$ , в позиции  $\theta \approx 2\alpha \approx 166 \mu\text{rad}$  наблюдается дополнительный пик, соответствующий ожидаемому проявлению ПВО  $\gamma$ -квантов с энергией  $E_\gamma \leq 300 \text{ keV}$  и длиной свободного пробега в воздухе  $l \leq 80 \text{ m}$ . Здесь следует отметить низкую по сравнению с соседними интервалами интенсивность УР в самом „мягком“ интервале  $\Delta E_\gamma = 75-119 \text{ keV}$ , которую можно объяснить энергетической зависимостью коэффициента ослабления  $\gamma$ -квантов;

— в УР более жестких интервалов и в соответствующих интервалах УР, измеренных при  $\alpha \approx 0$ , этот пик отсутствует.

Обнаружить ожидаемое проявление ПВО  $\gamma$ -квантов при угле наклона рефлектора  $\alpha \approx 400 \mu\text{rad}$ , полностью перекрывающего сформированный пучок в условиях эксперимента, практически невозможно, так как критическому углу ПВЛ  $\alpha_{\text{cr}} \approx 400 \mu\text{rad}$  соответствуют  $\gamma$ -кванты с энергией  $E_\gamma \leq 50 \text{ keV}$  (уровень шумов спектрометра  $\sim 70 \text{ keV}$ ) и длиной свободного пробега в воздухе  $l \leq 40 \text{ m}$  (длина пролетной базы  $\sim 118 \text{ m}$ ). В соответствии с этим в измеренных УР проявились только слабоинтенсивные распределения рассеянных и прошедших через вещество рефлектора  $\gamma$ -квантов.

Таким образом, в проведенных экспериментах обнаружен факт, соответствующий ожидаемому проявлению ПВО  $\gamma$ -квантов. Очевидно, что для однозначного установления его физической природы необходимо проведение экспериментов на пучках  $\gamma$ -квантов, сформированных с минимальной вертикальной расходимостью. В данной связи в настоящее время проводятся работы по изготовлению щелевого коллиматора из более тяжелого материала.

## Список литературы

- [1] *Физика рентгеновских лучей* / М.А. Блохин. М.: Гос. изд-во тех.-геогр. лит., 1957. 455 с.
- [2] *Kumakhov M.A.* // Int. Conf. of X-ray and Neutron Capillary Optics. 8–12 September 2001, Zvenigorod, Russia. Proc. SPIE. 2002. Vol. 4765.
- [3] *Аркадьев В.А., Кумахов М.А., Огнев Л.И.* // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. Вып. 21. С. 1307.

- [4] *Глебов В.И., Денисов Е.И., Жеваго Н.К.* и др. // ЖТФ. 1985. Т. 55. Вып. 9. С. 1785.
- [5] *Алиев Ф.К., Алимов Г.Р., Муминов А.Т.* и др. // ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 8. С. 90.
- [6] *Alimov G.R., Kumakhov M.A., Muminov A.T.* et al. // NIMB. 2004. Vol. 222. P. 681.