

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА ТРАНСФОРМАЦИИ КОНУСА ИЗЛУЧЕНИЯ ВАВИЛОВА–ЧЕРЕНКОВА В РЕНТГЕНОВСКОМ ДИАПАЗОНЕ В ПРОГРАММНОМ ПАКЕТЕ GEANT4

И. А. Кишин<sup>1,2</sup>, В. И. Дроник<sup>1</sup>, А. С. Кубанкин<sup>1,2</sup>,  
Р. М. Нажмудинов<sup>1,2</sup>, В. С. Сотникова<sup>1,3</sup>

*В статье представлены результаты моделирования излучения Вавилова-Черенкова в мягком рентгеновском диапазоне в программном пакете Geant4. Показан эффект трансформации конуса излучения Вавилова-Черенкова.*

**Ключевые слова:** излучение Вавилова–Черенкова, Geant4, релятивистские электроны, источник мягкого рентгеновского излучения.

*Введение.* Как известно, излучение Вавилова–Черенкова (ИВЧ) образуется, когда скорость заряженных частиц в прозрачной среде становится выше фазовой скорости света в этой среде, то есть должно выполняться условие  $n > 1/\beta$ ,  $\beta = v/c$ , где  $n$  – коэффициент преломления,  $v$  – скорость заряженной частицы,  $c$  – скорость света в вакууме. В видимой области спектра ИВЧ хорошо изучено теоретически и экспериментально, на основе ИВЧ разрабатываются детекторы заряженных частиц для идентификации и определения энергии частиц в пучках на ускорителях.

Существование ИВЧ в рентгеновском диапазоне считалось невозможным. В 1976 году было продемонстрировано [1], что благодаря резонансному поведению показателя преломления на краях фотопоглощения можно генерировать ИВЧ с энергией около 250 эВ в узких областях спектра. Позже возможность генерации ИВЧ в рентгеновском диапазоне была подтверждена экспериментально несколькими группами [2, 3]. Интерес

<sup>1</sup> НИУ “Белгородский государственный национальный исследовательский университет”, 308015 Россия, Белгород, ул. Победы, 85.

<sup>2</sup> ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: ivan.kishin@mail.ru.

<sup>3</sup> Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова, 308012 Россия, Белгород, ул. Костюкова, 46.

к ИВЧ в рентгеновском диапазоне вызван его квазимонохроматическим спектром и высокой спектральной плотностью. Эти свойства позволяют рассматривать возможности использования механизма ИВЧ в новых источниках мягкого рентгеновского излучения в диапазоне окна прозрачности углерода [4, 5]. Одним из препятствий для создания таких источников является низкая угловая плотность излучения, обусловленная большими значениями угла раствора черенковского конуса. Одно из решений этой проблемы – использование геометрии скользящего взаимодействия излучающих частиц с плоскостью поверхности мишени [6, 7]. При данной геометрии увеличивается длина пробега частицы в веществе и, следовательно, увеличивается количество генерируемых фотонов. Также был предсказан эффект трансформации конуса ИВЧ [7], реализующийся в случае, когда величина скользящего угла становится меньше угла между образующей и осью конуса ИВЧ. В этом случае конус излучения сужается, и угловая плотность излучения существенно возрастает. Эффект трансформации конуса ИВЧ был рассмотрен в случае вылета заряженной частицы из полубесконечной мишени [7] и в случае вылета электрона из слоя вещества [8].

Для моделирования ИВЧ в рентгеновском диапазоне вблизи линий фотопоглощения был использован программный пакет Geant4 [9], который представляет собой платформу для моделирования физических процессов на основе метода Монте-Карло. Ранее была показана применимость платформы Geant4 для моделирования ИВЧ в рентгеновском диапазоне [10], показано соответствие результатов моделирования с теоретическими расчетами по модели поляризационных токов [11].

В настоящей работе представлены результаты исследования ИВЧ в рентгеновском диапазоне, образующегося при прохождении электронного пучка через слой вещества. Показано влияние геометрии мишени на выход ИВЧ. Был продемонстрирован предсказанный ранее эффект трансформации конуса ИВЧ [7] для углеродной и алюминиевой мишени.

*Геометрия моделирования.* Для изучения ИВЧ в Geant4 была создана модель по облучению тонких мишеней (размером  $25 \times 25$  мм<sup>2</sup> и толщиной 300 нм) пучком электронов с энергией 7 МэВ под разными углами в диапазоне от  $3^\circ$  до  $90^\circ$ . Геометрия моделирования и окно визуализации модели в Geant4 показана на рис. 1. Электронный пучок с энергией 7 МэВ падает на мишень под углом  $\varphi$ . При взаимодействии пучка с мишенью генерируется ИВЧ, которое распространяется из мишени под “черенковским” углом  $\theta$  и регистрируется виртуальным детектором, который расположен на расстоянии 20 мм от мишени. При моделировании предполагалось, что мишень, источник электронов и

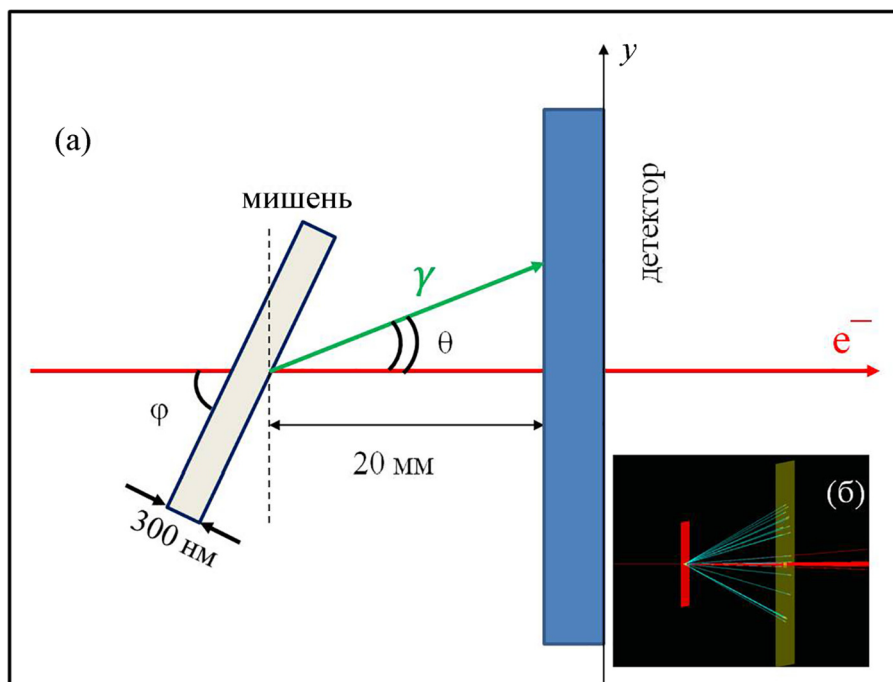


Рис. 1: (а) геометрия эксперимента:  $\gamma$  – направления распространения ИВЧ,  $e^-$  – направления распространения электронного пучка,  $\theta$  – “черенковский” угол,  $\varphi$  – угол ориентации мишени; (б) окно визуализации модели в Geant4.

детектор рентгеновского излучения размещены в общем вакуумном объеме. Эффективность регистрации фотонов детектором равна 100%. Для точного анализа все процессы, порождающие электромагнитное излучение, например, тормозное или переходное излучение, были отключены в симуляции, за исключением ИВЧ.

*Параметры моделирования.* Одним из параметров, используемым при моделировании ИВЧ в Geant4, является коэффициент преломления материала (приведен в табл. 1), для определения которого используется вещественная часть фактора рассеяния, зависящая от энергии фотонов [12]. На рис. 2 представлены посчитанные коэффициенты преломления для углерода вблизи  $K$ -края поглощения и для алюминия вблизи  $L$ -края поглощения.

Как видно из рис. 2, существует область, в которой коэффициент преломления становится больше 1, для углерода эта область от 281.5 до 286.7 эВ, для алюминия от 64.8 до 98.8 эВ. В этих спектральных областях условие  $n > 1/\beta$  выполняется и, как следствие, может образовываться ИВЧ.

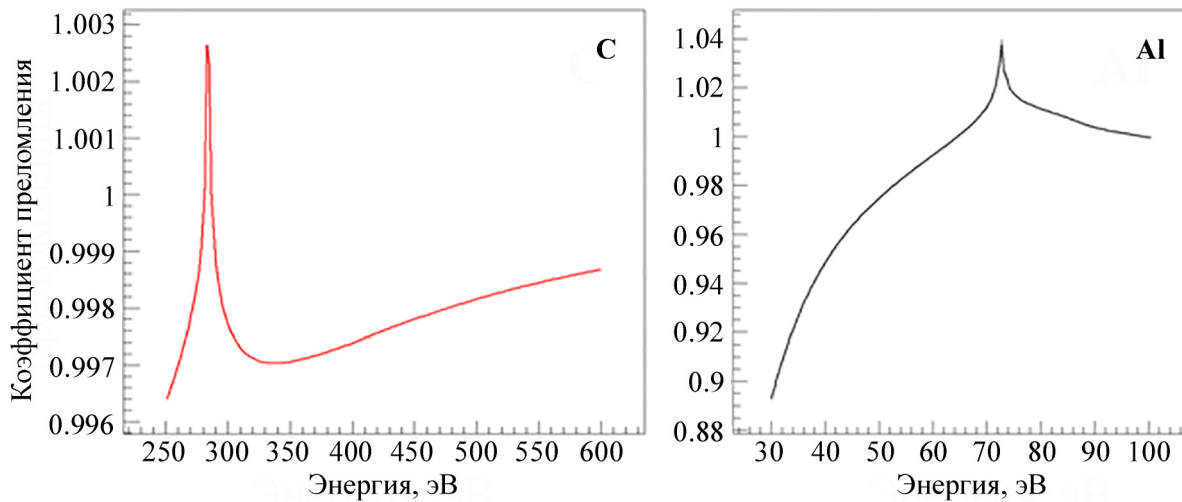


Рис. 2: Коэффициенты преломления для углерода (красная кривая, слева) и алюминия (черная кривая, справа).

Следующий параметр, который влияет на выход излучения – длина фотопоглощения в веществе ( $L_{\text{abs}} = 1/\mu\rho$ , где  $\mu$  – линейный коэффициент ослабления,  $\rho$  – плотность вещества), характеризующая процесс поглощения фотонов в материале мишени, которая также учитывается при моделировании.

Т а б л и ц а 1

Характеристики материалов, использованных при моделировании

Материал мишени	Край фотопоглощения	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Энергия фотонов $\omega_{\text{max}}$ , эВ	Черенковский угол, °	$n$ для $\omega_{\text{max}}$
Углерод	$K$	3.51	284	4.85	1.0059
Алюминий	$L_{III}$	2.7	72.5	15.28	1.0354

Длины фотопоглощения в области мягкого рентгеновского излучения от 20 эВ до 350 эВ для углерода и алюминия представлены на рис. 3. Реальная часть фактора рассеивания и коэффициенты ослабления были взяты для расчетов из базы данных Henke [13].

*Моделирование ИВЧ в Geant4.* Для наблюдения эффекта трансформации конуса ИВЧ было проведено моделирование падения пучка электронов на мишень под разными углами. На рис. 4 показан полученный энергетический спектр ИВЧ при моделировании взаимодействия электронного пучка энергией 7 МэВ с углеродной и алюминиевой мишенью, для разных углов ориентации мишени: 3°, 5°, 7°, 15°, 45° и 90°. Максимум

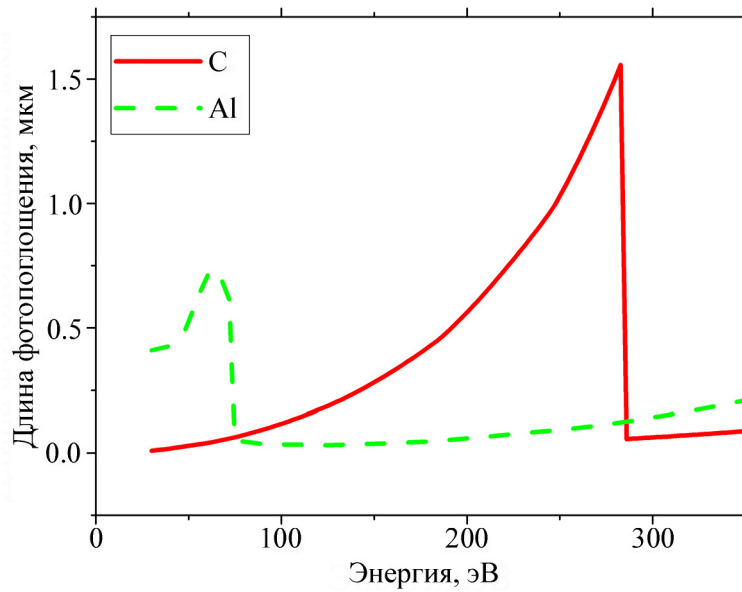


Рис. 3: Длины фотопоглощения углерода (алмаз) – красная кривая и алюминия – зеленая кривая.

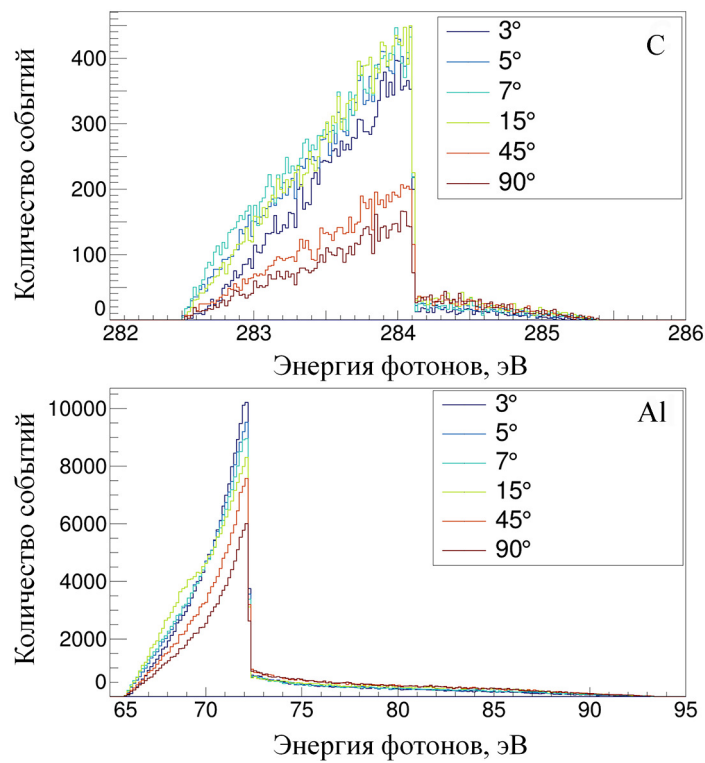


Рис. 4: Спектр ИВЧ из углеродной и алюминиевой мишени с учетом фотопоглощения.

выхода ИВЧ наблюдается при энергии около 284 эВ для углеродной мишени и 72 эВ для алюминиевой мишени.

Полученные ширины на полувысоте FWHM спектральных линий при моделировании представлены в табл. 2. Можно отметить, что ширины на полувысоте не превышают 1 эВ для углеродной мишени и 2.5 эВ для алюминиевой мишени для всех углов падения электронного пучка, что показывает монохроматичность спектра ИВЧ.

Т а б л и ц а 2

Ширины на полувысоте спектральных линий (в эВ)

Материал мишени	Угол $\varphi$					
	3°	5°	7°	15°	45°	90°
Углерод	0.84	0.82	0.90	0.86	0.84	0.68
Алюминий	1.95	2.25	2.40	3.0	2.10	1.95

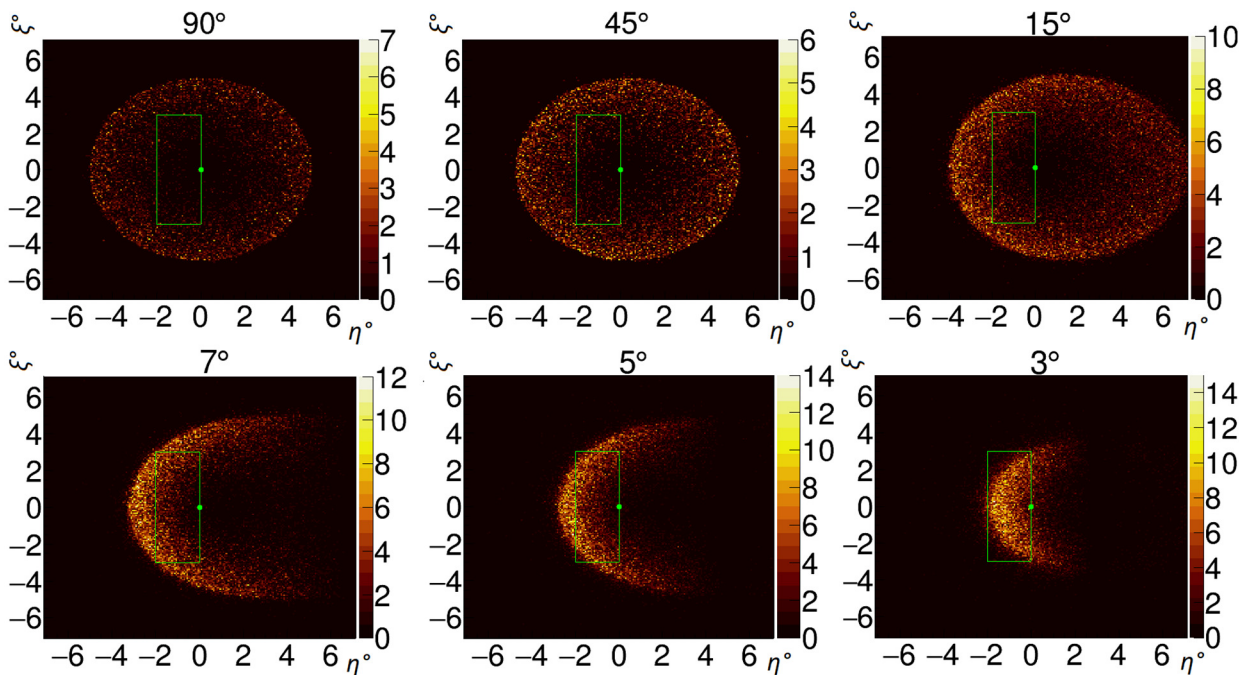


Рис. 5: Тепловые карты распределения излучения из углеродной мишени в зависимости от угла падения электронного пучка на мишень. Количество падающих частиц –  $10^8$ .

На рис. 5 и 6 приведены полученные тепловые карты угловых распределений зарегистрированных фотонов в детекторе. Как видно из рис. 5 и 6, при уменьшении угла падения электронов на мишень ИВЧ смещается к оси пучка. Когда угол падения

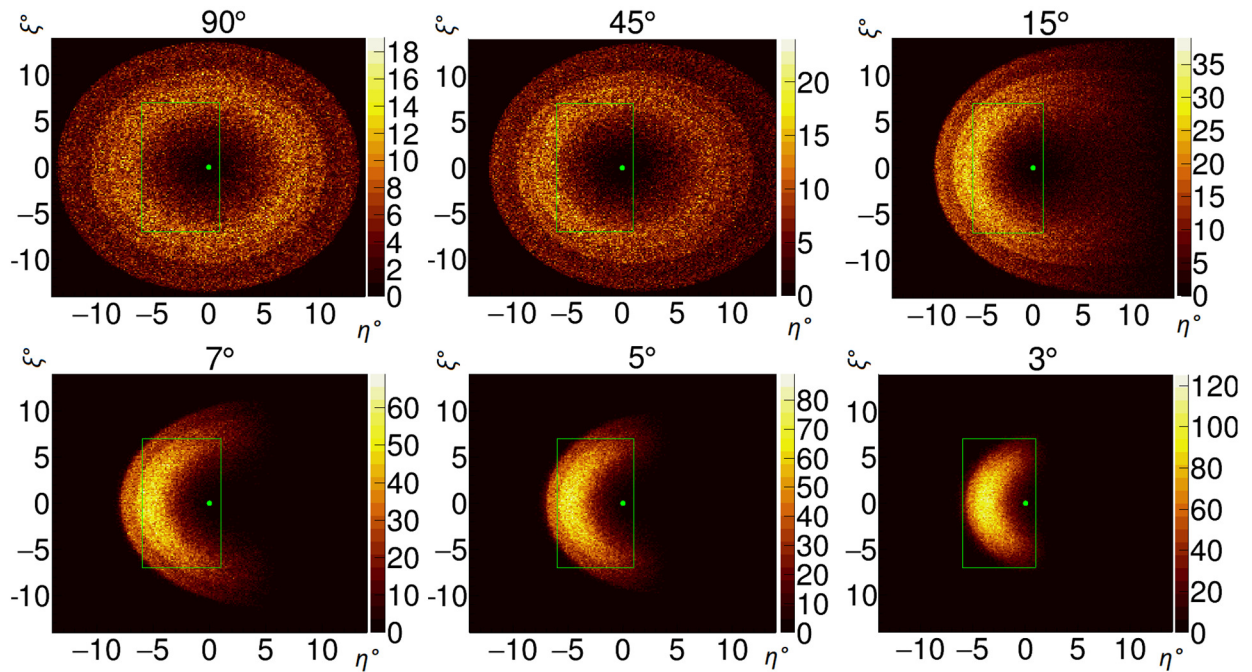


Рис. 6: Тепловые карты распределения излучения из алюминиевой мишени в зависимости от угла падения электронов на мишень. Количество падающих частиц –  $10^8$ .

электронов становится меньше “черенковского” угла (значения приведены в табл. 1), угловая плотность излучения увеличивается, это явление называют трансформацией конуса ИВЧ [7].

На рис. 7 представлены поперечные профили углового распределения ИВЧ при  $\xi = 0$ , полученные результаты показывают рост угловой плотности излучения и смещение фотонов к центральной оси пучка при уменьшении угла падения электронов.

Для количественной оценки выхода ИВЧ была выбрана область интегрирования, которая на рис. 5 и 6 выделена прямоугольником. Выбранная область имеет угловой размер  $2^\circ$  на  $6^\circ$  для углерода и  $7^\circ$  на  $14^\circ$  для алюминия. Просуммированное количество фотонов было поделено на количество электронов ( $10^8$  частиц), прошедших сквозь мишень. Полученный результат приведен на рис. 8.

Таким образом, показано, что угловая плотность излучения увеличивается при уменьшении угла падения электронов на мишень и максимальное значение имеет при угле падения  $3^\circ$ . Количество фотонов в выделенной области при угле падения  $90^\circ$  и  $3^\circ$  различается в 25.7 раз для углерода и в 9.0 раз для алюминия.

*Выводы.*

1. Выполнено моделирование ИВЧ в программном пакете Geant4 для разных сортов

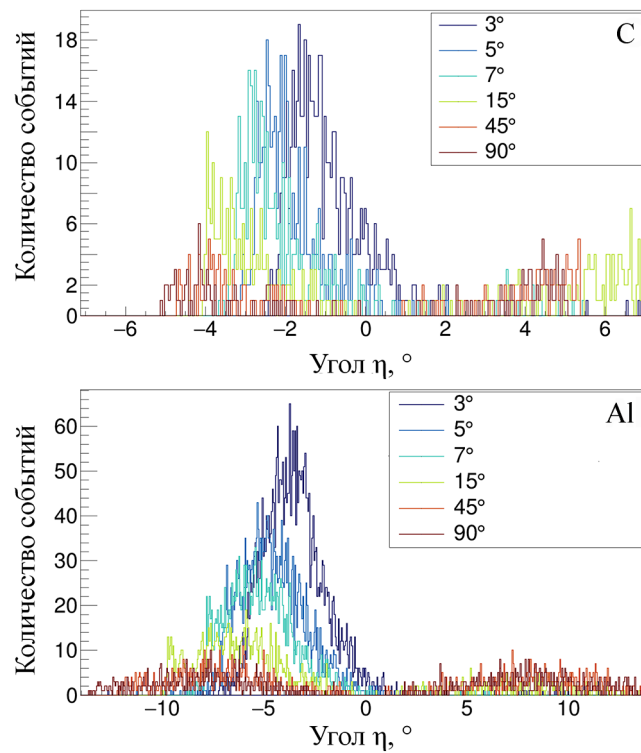


Рис. 7: Угловое распределение ИВЧ из углеродной и алюминиевой мишени для разных углов  $\varphi$  от  $3^\circ$  до  $90^\circ$ .

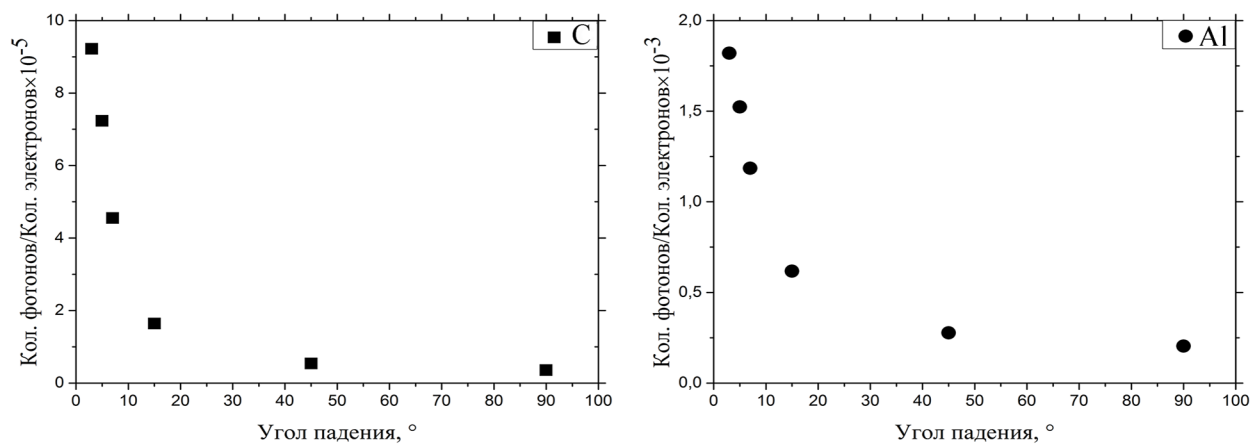


Рис. 8: Количество фотонов ИВЧ, образованных в углеродной и алюминиевой мишени в зависимости от угла  $\varphi$ .

мишеней при энергии электронного пучка 7 МэВ. Показано, что максимум энергетического спектра соответствует энергии краев фотопоглощения. Энергия пучка подобра-



на для возможности провести эксперимент на микротроне ускорительного комплекса “Пахра” на установке “Рентген 1”, предназначенной для низкофоновых исследований рентгеновского излучения [14, 15].

2. Показан эффект трансформации конуса ИВЧ. Установлено, что максимальный выход фотонов при угле падения электронов на мишень меньше “черенковского” угла.

3. Представленные результаты моделирования в совокупности с экспериментальными [4, 5] и теоретическими [6, 8] данными могут быть использованы для создания интенсивного источника мягкого рентгеновского излучения в диапазонах энергий от 70 до 300 эВ на основе ИВЧ.

Работа выполнена при финансовой поддержке конкурсной части госзадания по созданию и развитию лабораторий, проект № FZWG-2020-0032 (2019-1569) и при поддержке гранта Президента РФ для молодых ученых-кандидатов наук МК-1320.2022.1.2.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] В. А. Базылев, В. И. Глебов, Э. И. Денисов и др., Письма в ЖЭТФ **24**(7), 406 (1976). DOI: [http://jetpletters.ru/ps/1814/article\\_27732.pdf](http://jetpletters.ru/ps/1814/article_27732.pdf)
- [2] В. А. Базылев, В. И. Глебов, Э. И. Денисов и др., ЖЭТФ **81**(5), 1664 (1981). DOI: [http://jetp.ras.ru/cgi-bin/dn/e\\_054\\_05\\_0884.pdf](http://jetp.ras.ru/cgi-bin/dn/e_054_05_0884.pdf)
- [3] M. J. Moran, B. Chang, M. B. Schneider, X. K. Maruyama, Nucl. Instrum. Methods B **48**(1–4), 278 (1990). DOI: 10.1016/0168-583X(90)90124-D.
- [4] W. Knulst, van der M. J. Wiel, O. J. Luiten, J. Verhoeven, Appl. Phys. Lett. **83**, 4050 (2003). DOI: 10.1063/1.1625999.
- [5] A. E. Kaplan, P. L. Shkolnikov, Appl. Phys. Lett. **86**, 024107 (2005). DOI: 10.1063/1.1850190.
- [6] N. K. Zhevago, V. I. Glebov, Phys. Lett. A **160**(6), 564 (1991). DOI: 10.1016/0375-9601(91)91069-P.
- [7] C. Gary, V. Kaplin, A. Kubankin, et al., Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B **227**, 95 (2005). DOI: 10.1016/j.nimb.2004.06.015.
- [8] И. А. Кищин, А. С. Кубанкин, Т. Б. Никуличева и др., Ядерная физика и инжиниринг **7**(1), 47 (2016). DOI: 10.1134/S1063778816130044.
- [9] GEANT4 collaboration, GEANT4 Physics Reference Manual Release 10.7. (CERN, 2020).

- [10] Б. А. Алексеев, М. В. Шевелев, А. С. Коньков, Препринт ResearchGate (2020). DOI: 10.13140/RG.2.2.18109.20960.
- [11] M. Shevelev, A. Konkov, B. Alekseev, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B **464**(1), 117 (2020). DOI: 10.1016/j.nimb.2019.12.010.
- [12] W. Knulst, Cherenkov radiation in the soft X-ray region: towards a compact narrowband source. A dissertation for the degree of Ph.D, Technische Universitat Eindhoven, 2004. <http://alexandria.tue.nl/extra2/200410462.pdf>.
- [13] B. Henke, E. Gullikson, J. Davis, Atom. Data Nucl. Data **54**(2), 181 (1993). DOI: 10.1006/adnd.1993.1013.
- [14] В. И. Алексеев, В. А. Астапенко, А. Н. Елисеев и др., Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, № 7, 13 (2017). DOI: 10.1134/S1027451017040036.
- [15] В. И. Алексеев, А. Н. Елисеев, И. А. Кицин и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **48**(2), 9 (2021). DOI: 10.3103/S1068335621020056.

Поступила в редакцию 16 мая 2022 г.

После доработки 29 августа 2022 г.

Принята к публикации 30 августа 2022 г.