

УДК 621.386.2; 621.382; 621.387

© А. Ю. Портной, М. Ю. Портной, 2019

ИСТОЧНИКИ НЕПРЕРЫВНОГО СПЕКТРА, РЕГИСТРИРУЕМОГО ДЕТЕКТОРОМ, В СЛУЧАЕ РЕГИСТРАЦИИ ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ИЛИ БЕТА-ЧАСТИЦ

Рассмотрены процессы взаимодействия потока электронов с энергией до 500 кэВ с веществом мишени (анода рентгеновской трубки) и последующего взаимодействия рентгеновского излучения с полупроводниковыми Si- и Ge-детекторами. Для случая регистрации с помощью Si-детектора показано, что в области низких энергий регистрируемого излучения нельзя пренебрегать процессами регистрации в комптоновском плато потерь излучения с достаточно большой энергией, возникающего в мишени. В случае Ge-детектора в области низкой энергии регистрируемого излучения также нельзя пренебрегать регистрацией тормозного излучения в пике фотопотерь.

Кл. сл.: тормозное излучение, функция отклика детектора, пик фотопотерь, плато комптоновских потерь

ВВЕДЕНИЕ

Измерения с использованием твердотельных Si- и Ge-детекторов широко используются в экспериментальной технике во многих областях измерений.

Однако способ интерпретации полученных результатов при недостаточном понимании процессов, происходящих в детекторе, может приводить к существенным ошибкам.

Целью данной работы является оценка вкладов процессов как регистрации тормозного излучения в пике полного поглощения детектора, так и регистрации тормозного излучения в плато комптоновских потерь (горбе потерь) и пике фотопотерь.

Процесс вычислений, примененный в данной работе, показан на рис. 1.

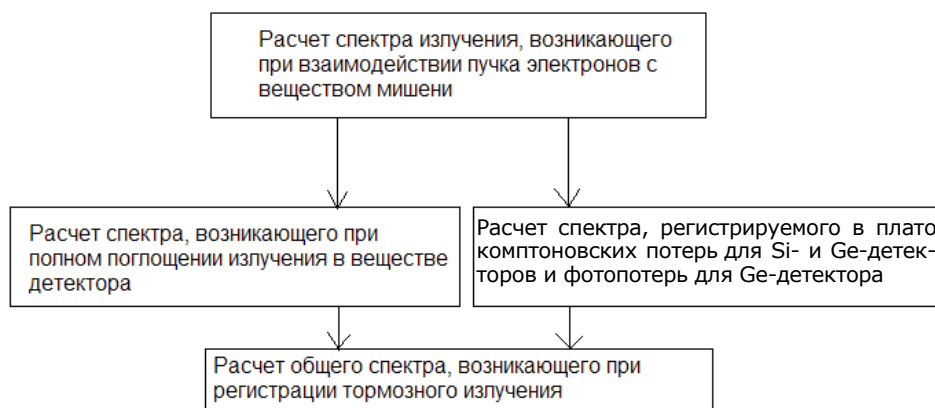


Рис. 1. Общий процесс вычислений

ОБЗОР МОДЕЛЕЙ ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

К настоящему времени достаточно много работ по расчету спектров излучения, возникающего при торможении электронов высокой энергии в поле атомов элементов мишени, основанных на [1–3]. Полученные выражения широко используются для расчетов тормозных спектров рентгеновских трубок. Данные модели будут применяться и для более высоких энергий тормозного излучения электронов и бета-частиц, возникающего при их взаимодействии с мишенью (анодом рентгеновской трубки).

Экспериментальные данные, касающиеся спектров рентгеновских трубок, приведены, например, в работах [4, 5].

В алгоритмах расчета спектров излучения рентгеновских трубок, используемых в рентгенофлуоресцентном анализе (РФА), спектр тормозного излучения удовлетворительно описывается формулой Крамерса [1] с коррекцией на обратное рассеяние электронов и поглощение возникшего излучения в аноде и окне трубки [6].

Пусть E_0 — энергия электронов, E_v — рассматриваемая энергия спектра. На основании аппроксимации [7] в работах [8, 9] показано, что распределение тормозного излучения может быть описано выражением $\frac{dN}{dE} = \text{const} \frac{E_0 - E_v}{E_v^{1+\alpha}}$, где α определяет отклонение от закона Крамерса.

В работе [6] приводится формула для расчета интенсивности тормозного излучения

$$N(\lambda) = 7.52 \cdot 10^{-5} \cdot Z \cdot \left(\frac{1}{\lambda_0} - \frac{1}{\lambda} \right) \frac{1}{\lambda} B(\lambda) \frac{T}{L} f(\chi) R \frac{1}{4\pi} W_a, \quad (1)$$

где $T = \pi / \sqrt{3}$; $B(\lambda) = \left(\frac{\lambda}{2\lambda_0} \right)^\alpha$; λ, λ_0 — длина волны тормозного излучения и коротковолновая граница тормозного спектра соответственно; Z — атомный номер элемента анода; $L = \ln \left(\frac{1166}{J} \frac{2E_0 + E_v}{3} \right)$; J — средний потенциал ионизации (эВ), принятый в работе [6] равным $J = 11.5 \cdot Z$ (значения E_0 и E_v — в кэВ). Поправка на поглощение в аноде по Филиберту [10] будет равна

$$f(\chi) = \frac{1}{\left(1 + \frac{\chi}{\sigma} \right) \cdot \left(1 + \frac{h}{1 + h} \frac{\chi}{\sigma} \right)}, \quad (2)$$

$$h = \frac{1.2A}{Z^2}, \quad \chi = \frac{\mu}{\sin(\psi)}, \quad \psi — \text{угол отбора излучения}$$

$$\text{анода, } \sigma = \frac{4.0 \cdot 10^5}{E_0^{1.65} - E_v^{1.65}} \text{ для тормозного спектра.}$$

Функция W_a учитывает поглощение излучения в Ве окне трубки. В данной работе поглощение в окне не учитывается и $W_a = 1$.

R — коэффициент, необходимый для коррекции интенсивности с целью учета обратнорассеянных электронов [11].

Выражение для интенсивности характеристического спектра в единицах фотон/(электрон $\times$ тел. угол [ср]) может быть представлено в виде, как в [12, 13].

ОБЗОР ПРОЦЕССОВ В ДЕТЕКТОРЕ ПРИ РЕГИСТРАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ

В основе регистрации рентгеновского и гамма-излучений лежат процессы фотопоглощения и комптоновского рассеяния для рассматриваемого в работе диапазона энергий [14]. Процессы регистрации части энергии фотона после комптоновского его рассеяния в детекторе рассмотрены, например, в работах [15–18]. В работе [19] показана возможность с использованием расчета методом Монте-Карло оптимизировать сигнал и фон при использовании детекторов разной толщины и материала (Si либо Ge). В работе [20] была предложена вычислительная модель комбинированного детектора со схемой антисовпадений для уменьшения вероятности поглощения в пике фотопотерь.

В работе [21] также упоминается о "плато комптоновских потерь", возникающем в германиевом детекторе, однако для германиевого детектора при энергии фотонов при рассматриваемой в работе энергии излучения 60 кэВ вероятность регистрации в нем не является существенной. В работе [22] для Ge-детектора было проведено моделирование параметров функции отклика Ge-детектора, в т.ч. плато комптоновских потерь в приближении угла комптоновского рассеяния 180° .

В нашей модели используются сечения фотопоглощения [23]. Для интегральной оценки комптоновского рассеяния в детекторе можно использовать сечение, например, как в [24], однако лучшие результаты при расчете дифференциальных сечений дает подход работы [25].

Функция отклика детектора $K_{\text{det}}(E_{\text{det}}, E)$ есть вероятность регистрации импульса с амплитудой, соответствующей энергии E , при попадании в детектор фотона с энергией E_{det} . Функция отклика детектора в данной работе оценивалась с помощью

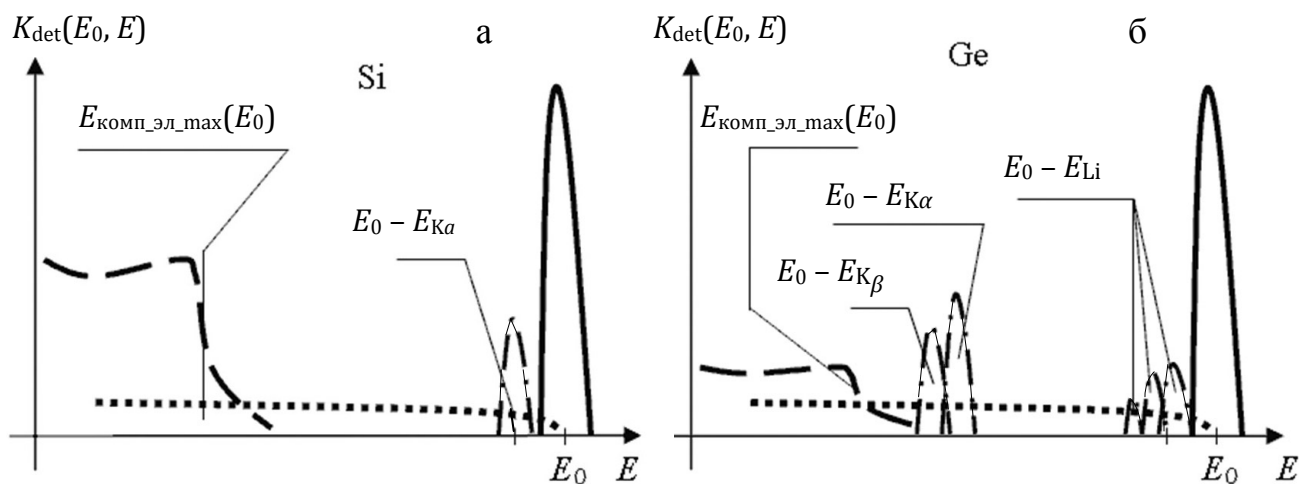


Рис. 2. Функции отклика Si и Ge детекторов.

а — Si-детектор, б — Ge-детектор.

— Пик полного поглощения (непрерывная линия); — · — · — пик К фотопотерь для Si-детектора (а), К и L фотопотерь для Ge-детектора (б) (штрихпунктирная линия); — — — плато комптоновских потерь (штриховая линия), электронный "хвост" потерь (точечная линия)

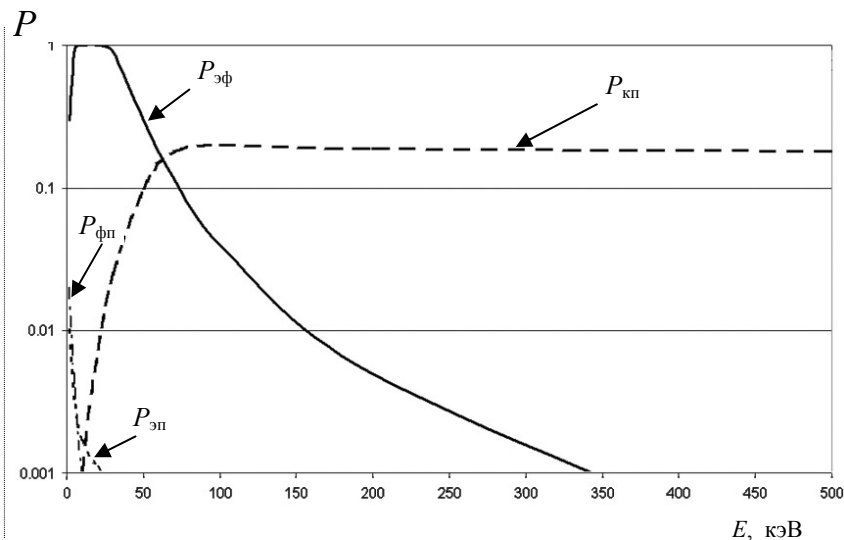


Рис 3. Расчетные зависимости вероятностей регистрации фотонов для Si-детекторов от энергии фотона при центральном нормальном к поверхности детектора падении пучка. Вероятности: непрерывная линия — $P_{эф}$ полного поглощения энергии фотона в детекторе; штриховая линия — $P_{кп}$ регистрации фотона в "горбе потерь"; штрихпунктирная линия — $P_{фп}$ регистрации фотона в пике К фотопотерь; точечная линия — $P_{эп}$ регистрации фотона в "хвосте", обусловленном выходом электронов высоких энергий. Толщина детектора 5 мм

метода Монте-Карло. В данной работе пренебрежем мертвым слоем и будем считать, что его толщина около 0.1 мкм. Это соответствует современным высококачественным детекторам и соответствующим системам сбора и позволяет оценивать только вероятности выхода из детектора электронов высоких энергий. Тем не менее следует иметь в виду, что затягивание импульсов вблизи мертвого слоя в зависимости от способа обработки сигнала может существенно повысить фон в области энергий ниже 2 кэВ (см., например, [26]). Двойными событиями, происходящими в детекторе и дающими импульс с суммарной амплитудой появившихся одновременно в детектор фотонов, в данной работе пренебрегаем.

На рис. 2, а, показана структура функции отклика Si-детектора. В случае полного поглощения энергии фотона в детекторе он будет зарегистрирован в пике полного поглощения с энергией E_0 , в случае фотопоглощения с последующим выходом флуоресцентного фотона Si — в "пике К фотопотерь" с энергией $E_0 - E_{K\alpha}$. В случае выхода электрона высокой энергии из чувствительной области детектора или неполного сбора заряда — в "хвосте" с энергией от 0 до E_0 , в случае комптоновского рассеяния с выходом рассеянного фотона из детектора — в плато комптоновских потерь с энергией от 0 до максимальной энергии электронов отдачи $E_{комп_эл_max}(E_0)$.

На рис. 3 и 4 показаны расчетные вероятности

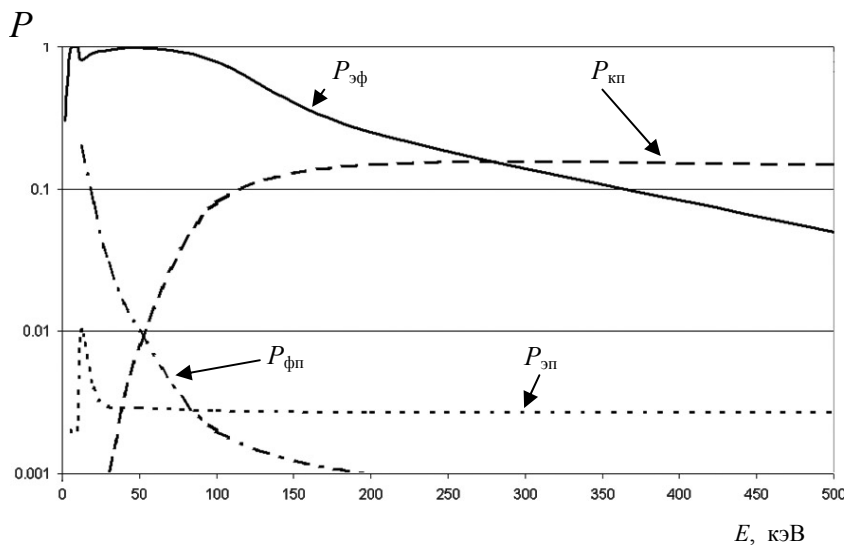


Рис 4. Расчетные зависимости вероятностей регистрации фотонов для Ge-детекторов от энергии фотона при центральном нормальном к поверхности детектора падении пучка. Вероятности: непрерывная линия — $P_{эф}$ полного поглощения энергии фотона в детекторе; штриховая линия — $P_{кп}$ регистрации фотона в "горбе потерь"; штрихпунктирная линия — $P_{фп}$ регистрации фотона в пиках К фотопотерь; точечная линия — $P_{эп}$ регистрации фотона в "хвосте", обусловленном выходом электронов высоких энергий. Толщина детектора 5 мм

регистрации фотона в различных областях функции отклика Si- и Ge-детектора соответственно.

Структура функции отклика Ge-детектора (рис. 2, б; 4) несколько отличается от функции отклика Si-детектора:

- в области энергий фотонов ниже К-края поглощения Ge, примерно до 5 кэВ, существенным является L-пик фотопотерь, содержащий компоненты, соответствующие L-излучению Ge;
- в области энергий фотонов выше К-края поглощения Ge очень большая вероятность выхода флуоресцентного фотона Ge из детектора вследствие большего чем у Si выхода флуоресценции. Это обуславливает очень большую вероятность (порядка 20 %) регистрации фотона в пике К фотопотерь.

При увеличении энергии фотона вероятность регистрации в пике К фотопотерь монотонно убывает, однако до энергий порядка 50–60 кэВ составляет не менее 1 %. Следствием этого в регистрируемых детектором спектрах будут "линии", отличающиеся от ярких линий спектра на энергию K_{α} и K_{β} флуоресцентных квантов Ge, а непрерывные спектры типа тормозных размазаны в более низкоэнергетическую область со смещением на эту же величину энергии.

Вероятность регистрации в плато комптоновских потерь для Ge-детектора примерно на порядок меньше таковой для Si-детектора для областей энергий до 100 кэВ, однако при более высоких энергиях эта вероятность для Si- и Ge-детектора становятся соизмеримыми.

Для Si-детектора энергия фотонов, при которой вероятность регистрации в плато комптоновских потерь, обусловленном выходом комптоновски

рассеянных фотонов, становится равной вероятности регистрации в хвосте, обусловленном выходом из детектора электронов высокой энергии, равна примерно 15 кэВ. Начиная примерно с этой энергии можно говорить о необходимости учета регистрации в плато потерь для корректного описания формы функции отклика детектора. Для Ge-детектора эта энергия составляет около 150 кэВ.

Для Si-детектора вероятности регистрации в плато комптоновских потерь и в пике полного поглощения становятся равными при энергии фотонов 60–70 кэВ. Это обусловлено тем, что комптоновски рассеянный фотон в этом диапазоне энергий и толщин вероятнее всего выходит из детектора после однократного акта комптоновского рассеяния.

ВЫЧИСЛЕНИЕ СПЕКТРОВ

Для дальнейших расчетов и их детального описания примем следующие упрощения:

- т.к. для Si-детектора при энергиях фотонов более 10 кэВ больший вклад дадут процессы регистрации в комптоновском плато выхода и в пике полного поглощения, процессами регистрации в пике фотопотерь и хвосте потерь, связанном с электронами высоких энергий, пренебрежем;
- для Ge-детектора также пренебрежем регистрацией в L-пиках фотопотерь и в хвостах потерь, связанных с выходом электронов высоких энергий;
- т.к. придется соотносить линии излучения и тормозной спектр, энергетическая ширина расчетной линии излучения составляет 100 эВ.

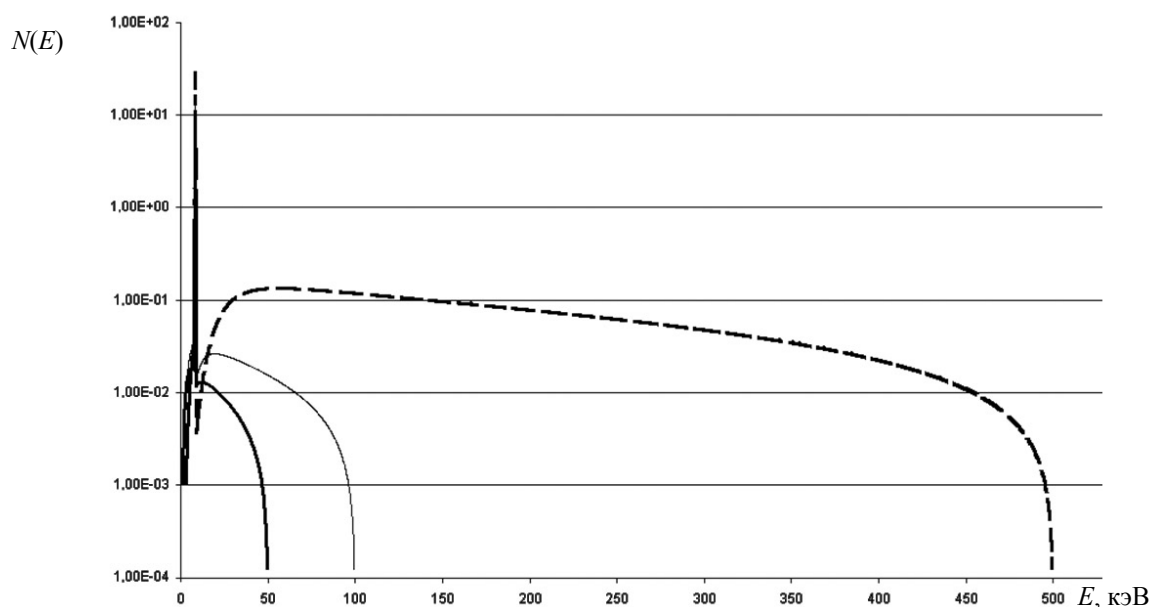


Рис. 5. Спектр рентгеновской трубки с медным анодом при напряжениях 50 кВ (непрерывная толстая линия), 100 кВ (непрерывная тонкая линия), 500 кВ (штриховая линия). Разрешение 0.1 кэВ на К-линиях меди

Спектральное распределение тормозного излучения Cu-трубки согласно формуле (1) представлено на рис. 5 для энергий электронов 50, 100, 500 кэВ.

Очевидно, что интенсивность тормозного излучения в низкоэнергетической части резко падает, что обусловлено поправкой на поглощение по Филлиберту (2) в аноде. А появляющийся в низкоэнергетической области непрерывный спектр требует дополнительного объяснения.

Функция отклика детектора и вероятности регистрации в различных областях функции отклика детектора для рассмотренных энергий вычислялись с помощью метода Монте-Карло для энергий 1–1000 кэВ с шагом 0.1 кэВ при количестве импульсов для каждого шага 10^6 , с последующим сглаживанием результатов полученных вероятностей.

Результаты расчетов для случая рентгеновской трубки с Cu-анодом и с напряжением 50, 100, 500 кВ и Si-детектора толщиной 5 мм показаны в Приложении, рис. П1–П3.

Из результатов расчетов видно, что спектр рентгеновской трубки в пике полного поглощения, регистрируемый 5 мм Si-детектором, начинает уменьшаться с энергий около 30 кэВ для всех рассматриваемых случаев. С ростом напряжения на рентгеновской трубке увеличивается вероятность регистрации в комптоновском плато потерь. В случае же напряжения на трубке 500 кВ в области

энергий ниже 20 кэВ регистрируемого Si-детектором спектра импульсов регистрация в плато комптоновских потерь становится доминирующей.

Результаты расчетов спектров для случая применения Ge-детектора для регистрации излучения рентгеновской трубки с медным анодом представлены графически в Приложении, рис. П4–П6.

Отличием является то, что регистрацией в плато комптоновских потерь для напряжений на трубке 50 и 100 кВ можно пренебречь. Однако для напряжения на трубке 500 кВ данный процесс также является доминирующим в области спектра импульсов с энергией ниже 15 кэВ.

Кроме того, для всех рассмотренных напряжений трубки для Ge-детектора в области спектра импульсов детектора с энергией до 10 кэВ важна регистрация спектра рентгеновской трубки в пике фотопотери Ge-детектора, доминирующая в низкоэнергетической части спектра регистрируемых импульсов при напряжениях на трубке 50 и 100 кВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В низкоэнергетическом (1–10 кэВ) диапазоне регистрируемого детектором рентгеновского излучения рентгеновской трубки или мишени (в случае возбуждения электронами с энергией 500 кэВ) при 5 мм толщине Si-детектора нельзя

пренебрегать регистрацией высокоэнергетического тормозного излучения в плато комптоновских потерь. Соотношение вероятности регистрации высокоэнергетического фотона в плато комптоновских потерь и вероятности регистрации низкоэнергетического фотона в этой области (1–10 кэВ) может достигать соотношения 100:1.

2. При регистрации в подобных условиях Ge-

детектором соотношение вероятности регистрации высокоэнергетического излучения в плато комптоновских потерь и регистрации низкоэнергетического тормозного излучения в пике полного поглощения может достигать 10:1, при этом также необходимо учитывать регистрацию фотонов в пиках фотопотерь Ge-детектора.

ПРИЛОЖЕНИЕ

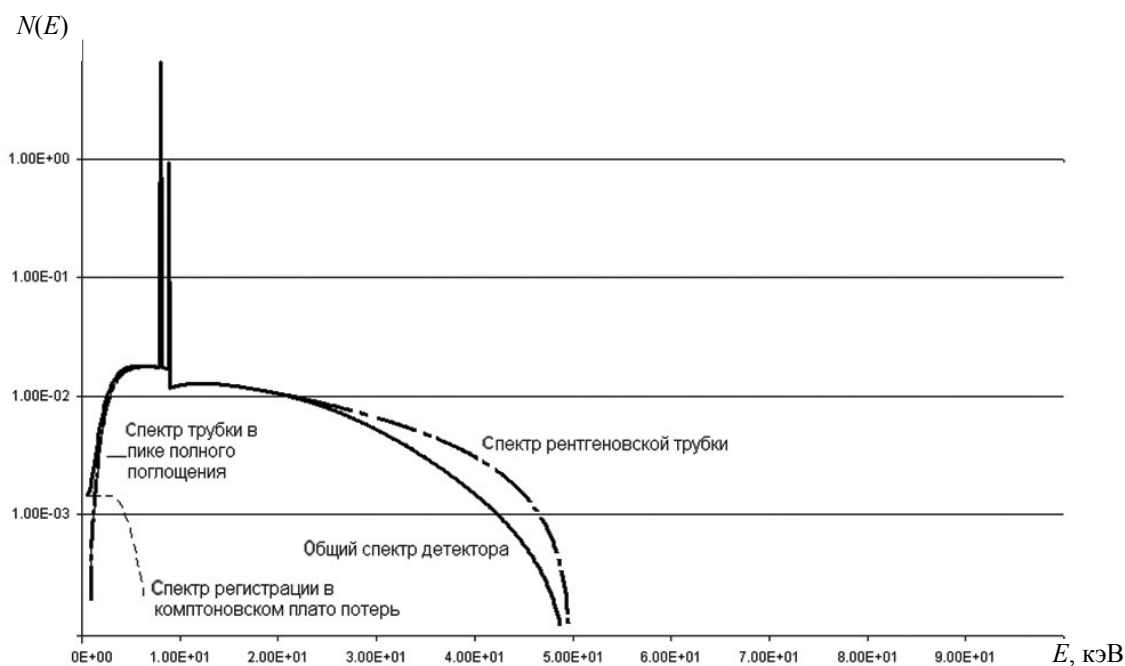


Рис. П1. Спектральное распределение (расчет) регистрируемых Si-детектором импульсов излучения рентгеновской трубки с медным анодом при напряжении на аноде 50 кВ. Спектр рентгеновской трубки — штрихпунктирная линия (для справки); спектр трубки, зарегистрированный в пике полного поглощения детектора, — тонкая непрерывная линия, совпадает со штрихпунктирной в диапазоне энергий до 10 кэВ и с толстой в остальном диапазоне энергий; спектр трубки, зарегистрированный детектором в комптоновском плато потерь, — линия из коротких штрихов; общий спектр детектора — толстая непрерывная линия

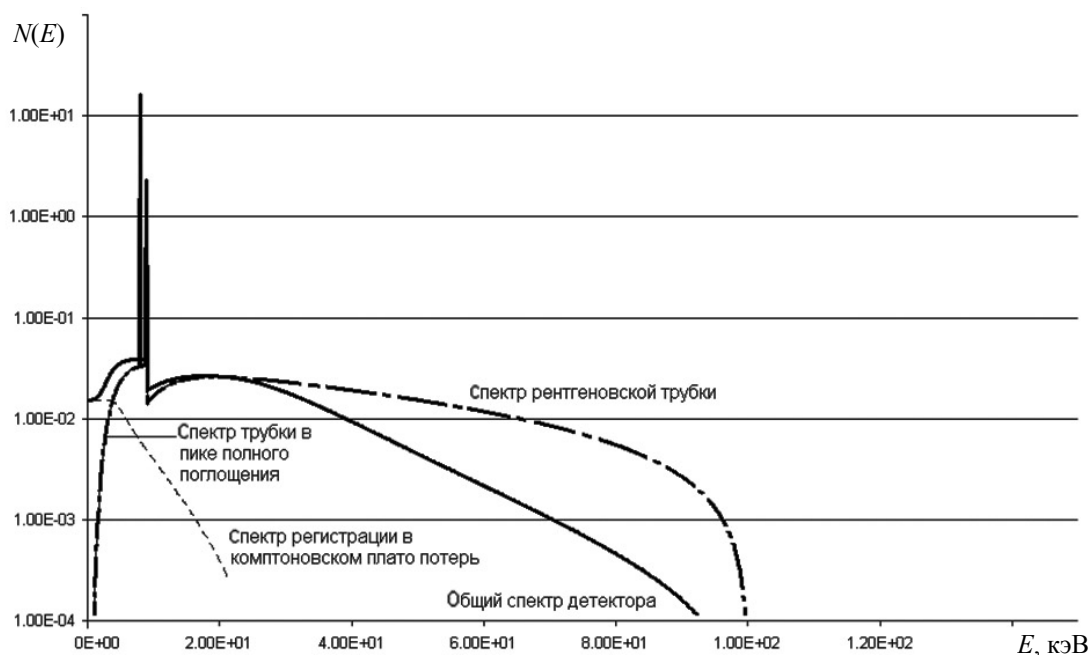


Рис. П2. Спектральное распределение (расчет) регистрируемых Si-детектором импульсов излучения рентгеновской трубки с медным анодом при напряжении на аноде 100 кВ. Спектр рентгеновской трубки — штрихпунктирная линия (для справки); спектр трубки, зарегистрированный в пике полного поглощения детектора, — тонкая непрерывная линия, совпадает со штрихпунктирной в диапазоне энергий до 10 кэВ и с толстой в остальном диапазоне энергий; спектр трубки, зарегистрированный детектором в комптоновском плато потерь, — линия из коротких штрихов; общий спектр детектора — толстая непрерывная линия

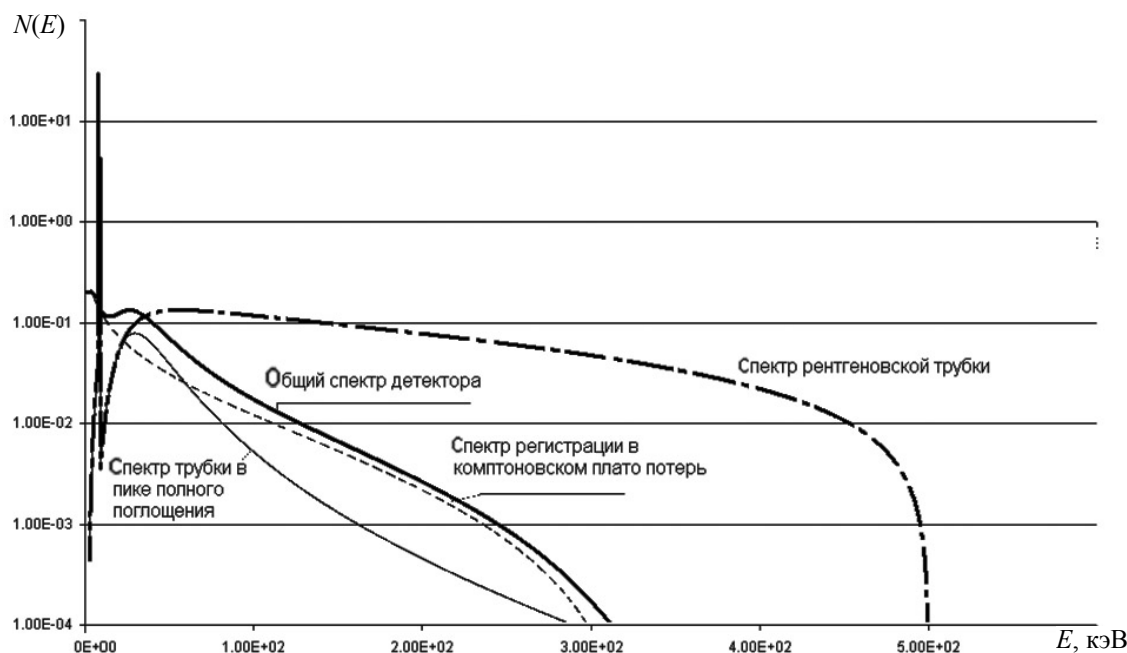


Рис. П3. Спектральное распределение (расчет) регистрируемых Si-детектором импульсов излучения рентгеновской трубки с медным анодом при напряжении на аноде 500 кВ. Спектр рентгеновской трубки — штрихпунктирная линия (для справки); спектр трубки, зарегистрированный в пике полного поглощения детектора, — тонкая непрерывная линия; спектр трубки, зарегистрированный детектором в комптоновском плато потерь, — линия из коротких штрихов; общий спектр детектора — толстая непрерывная линия

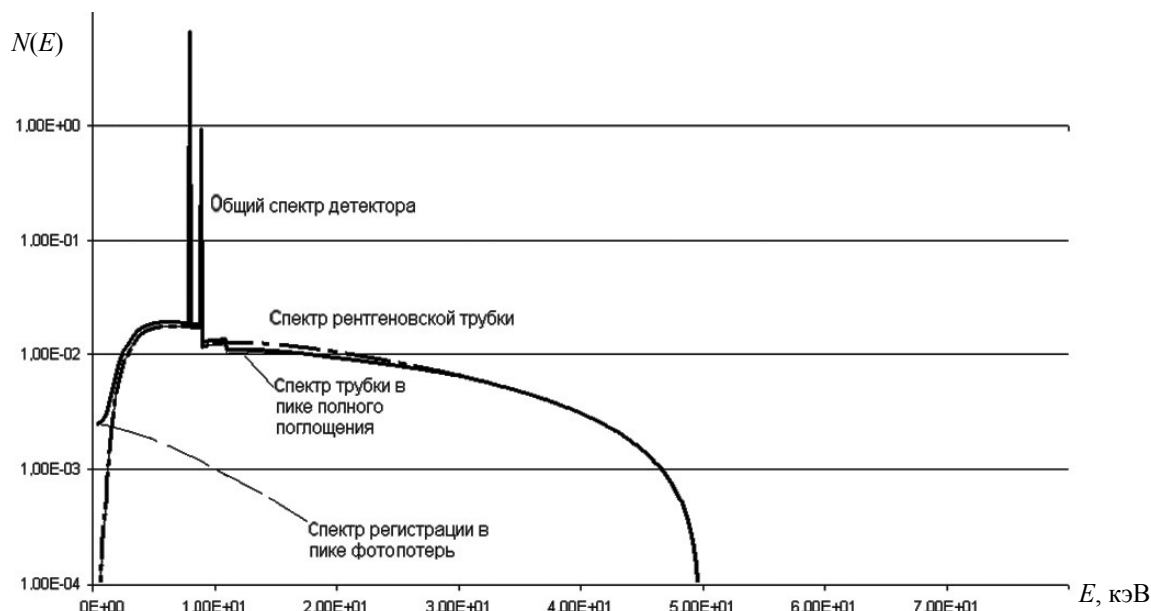


Рис. П4. Спектральное распределение (расчет) регистрируемых Ge-детектором импульсов излучения рентгеновской трубки с медным анодом при напряжении на аноде 50 кВ.

Спектр рентгеновской трубки — штрихпунктирная линия (для справки); спектр трубки, зарегистрированный в пике полного поглощения детектора — тонкая непрерывная линия, совпадает со штрихпунктирной в диапазоне энергий до 10 кэВ и с толстой в остальном диапазоне энергий; общий спектр детектора — толстая непрерывная линия; спектр регистрации излучения трубки, зарегистрированный детектором в пике фотопотерь, — штриховая линия

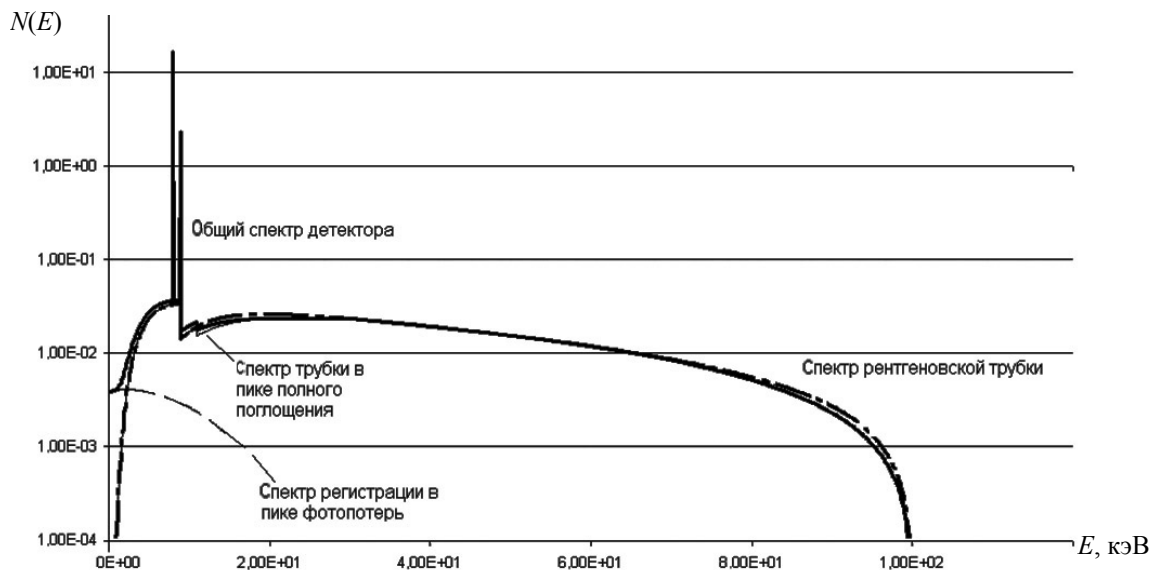


Рис. П5. Спектральное распределение (расчет) регистрируемых Ge-детектором импульсов излучения рентгеновской трубки с медным анодом при напряжении на аноде 100 кВ.

Спектр рентгеновской трубки — штрихпунктирная линия (для справки); спектр трубки, зарегистрированный в пике полного поглощения детектора, — тонкая непрерывная линия, совпадает со штрихпунктирной в диапазоне энергий до 10 кэВ и с толстой в диапазоне энергий выше 20 кэВ; общий спектр детектора — толстая непрерывная линия; спектр регистрации излучения трубки, зарегистрированный детектором в пике фотопотерь, — штриховая линия

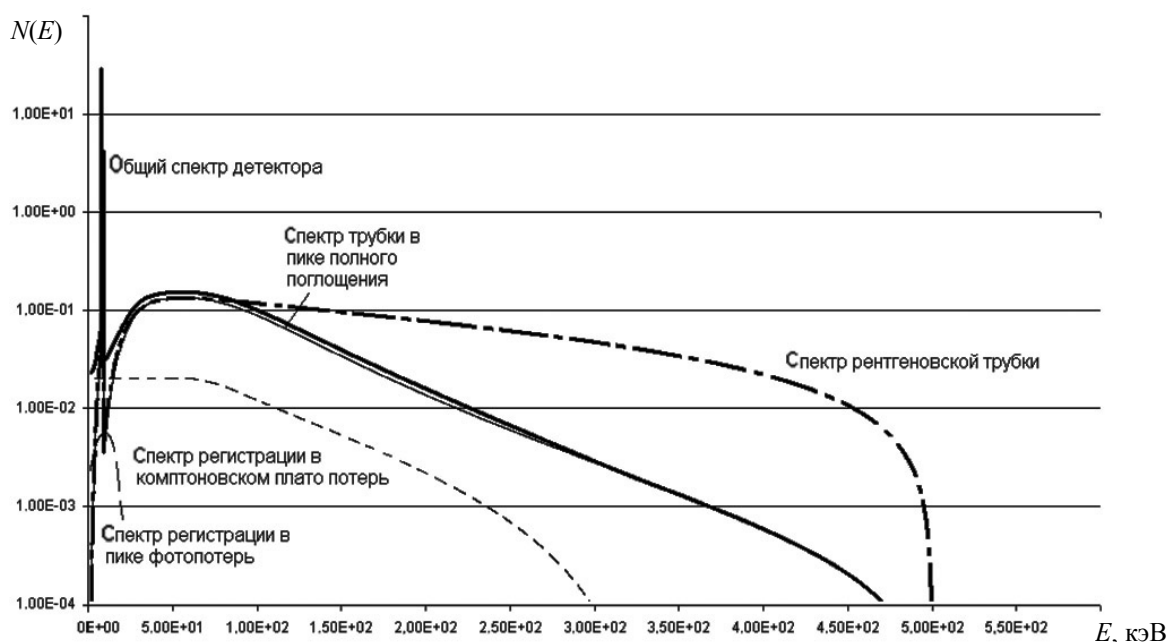


Рис. Пб. Спектральное распределение (расчет) регистрируемых Ge-детектором импульсов излучения рентгеновской трубки с медным анодом при напряжении на аноде 500 кВ. Спектр рентгеновской трубки — штрихпунктирная линия (для справки); спектр трубки, зарегистрированный в пике полного поглощения детектора, — тонкая непрерывная линия; спектр трубки, зарегистрированный детектором в комптоновском плато потерь, — линия из коротких штрихов; общий спектр детектора — толстая непрерывная линия; спектр регистрации излучения трубки, зарегистрированный детектором в пике фотопотерь, — штриховая линия

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kramers H.A.* On the theory of X-ray absorption and of the continuous X-ray spectrum // *Phil. Mag. Ser. 6.* 1923. Vol. 46, is. 275. P. 836–871.
2. *Bethe H.* Zur Theorie des durchgang schneller korpuskularstrahlen durch materie // *Annalen der Physik (Leipzig).* 1930. Vol. 397, no. 3. P. 325–400. DOI: 10.1002/andp.19303970303
3. *Зоммерфельд А.* Строение атома и спектры. М.: ГИТИЛ, 1956. Т. 1., 591 с., т. 2, 694 с.
4. *Loomis T.C., Keith H.D.* Spectral distribution of x-rays produced by a General electric EA 75 Cr/W tube at various applied constant voltages // *X-ray spectrometry.* 1976. Vol. 5, is. 2. P. 104–114. DOI: 10.1002/xrs.1300050211
5. *Arai T., Shoji T., Omote K.* Measurement of the spectral distribution emitted from spectrographic tubes // *Advances in X-ray analysis.* 1985. Vol. 29. P. 413–422. DOI: 10.1154/S0376030800010521
6. *Finkelstein A.L., Pavlova T.O.* Calculation of X-ray tube distribution // *X-ray spectrometry.* 1999. Vol. 28, is. 1. P. 27–32. DOI: 10.1002/(SICI)1097-4539(199901/02)28:1<27::AID-XRS302>3.0.CO;2-R
7. *Kirkpatrick P., Wiedman L.* Theoretical continuous X-ray energy and polarization // *Physical Review.* 1945. Vol. 67, no. 11-12. P. 321–329. DOI: 10.1103/PhysRev.67.321
8. *Reed S.J.B.* The shape of the continuous x-ray spectrum and background correction for energy-dispersive electron microprobe analysis // *X-ray spectrometry.* 1975. Vol. 4, is. 1. P. 14–17. DOI: 10.1002/xrs.1300040105
9. *Statham P.J.* The generation, absorption and anisotropy of thick target bremsstrahlung and implication for quantitative energy disperse analysis // *X-ray spectrometry.* 1976. Vol. 5, is. 3. P. 154–168. DOI: 10.1002/xrs.1300050310
10. *Philibert J.* A method for calculating the absorption corrections in electron probe microanalysis // *X-ray optics and X-ray microanalysis.* N.Y.: Acad. Press, 1963. P. 379–392. DOI: 10.1016/B978-1-4832-3322-2.50039-1
11. *Пуд С.* Электронно-зондовый микроанализ. М.: Мир, 1979. 423 с.
12. *Green M., Crosslet V.E.* The efficiency of production of characteristic X-radiation in thick targets of a pure element // *Proc. Phys. Soc.* 1961. Vol. 78, no. 6. P. 1206–1214. DOI: 10.1088/0370-1328/78/6/315
13. *Green M.* The target absorption correction in X-ray microanalysis // *X-ray optics and X-ray microanalysis.* N.Y.: Acad. Press, 1963. P. 361–377.
14. *Дирнли Дж., Нортрон Д.* Полупроводниковые счетчики ядерных излучений. М.: Мир, 1966. 260 с.

15. Keith H.D., Loomis T.C. Calibration and use of a lithium drifted silicon detector for accurate analysis of X-ray spectra // X-ray spectrometry. 1976. Vol. 5, is. 4. P. 93–103. DOI: 10.1002/xrs.1300050210
16. Felsteiner J., Kahane S., Rosner B. Effect of the electron momentum distribution on the shape of the Compton edge of Si(Li) detectors // Nuclear instruments and methods. 1973. Vol. 118, is. 1. P. 253–255.
17. Серебряков А.С. Вычислительные модели детекторов ядерного и рентгеновского излучения. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Л., 1983.
18. Портной А.Ю. Метод оценки энергетических и пространственных параметров рентгеновского и гамма детекторов // Научное приборостроение. 2009. Т. 19, № 4. С. 13–23.
URL: <http://iairas.ru/mag/2009/abst4.php#abst2>
19. Portnoy A.Yu., Pavlinsky G.V., Gorbunov M.S. An estimation of the signal to background ratio limited by photon and electron transport in EDXRF // X-ray spectrometry. 2010. Vol. 39, no. 1. P. 41–51. DOI: 10.1002/xrs.1220
20. Portnoy A.Yu., Pavlinsky G.V., Gorbunov M.S., Sidorova Yu.I. An estimation of EDXRF spectrometer properties, based on a two-layer composite Si-Ge detector // X-ray spectrometry. 2012. Vol. 41, is. 1. P. 298–303. DOI: 10.1002/xrs.2396
21. Can C. Escape of photoelectrons and Compton-scattered photons from an HPGe detector // X-ray spectrometry. 2003. Vol. 32, is. 4. P. 280–284. DOI: 10.1002/xrs.650
22. Pekoz R., Can C. Components of detector response function: Monte Carlo simulations and experiment // X-ray spectrometry. 2006. Vol. 35, is. 6. P. 347–351. DOI: 10.1002/xrs.917
23. Tinh T.P., Leroux J. New basic empirical equation for computing of X-ray mass attenuation coefficients // X-ray spectrometry. 1979. Vol. 9, no. 2. P. 85–91. DOI: 10.1002/xrs.1300080211
24. Hubbell J.H., Veigele Wm.J., Braggs E.A., Brown R.T., Cromer D.T., Howerton R.J. Atomic form factors, incoherent scattering functions, and photon scattering cross sections // J. Phys. Chem. Ref. Data. 1975. Vol. 4, is. 3. P. 471–538. DOI: 10.1063/1.555523
25. Reed W.A., Eisenberger P. Gamma ray Compton profiles of diamond, silicon and germanium // Phys. Rev. B. 1972. Vol. 6, is. 12. P. 4596–4604. DOI: 10.1103/PhysRevB.6.4596
26. Papp T., Maxwell J.A., Papp A., Nejedly Z., Campbell J.L. On the role of the signal processing electronics in X-ray analytical measurements // Nuclear instruments and methods in physics research B. 2004. Vol. 219-220. P. 503–507. DOI: 10.1016/j.nimb.2004.01.111

**Иркутский государственный университет путей
сообщения, Иркутск**

Контакты: Портной Александр Юрьевич,
portnoyalex@yandex.ru

Материал поступил в редакцию 10.10.2019

ORIGIN OF CONTINUOUS SPECTRUM OF THE DETECTOR IN A CASE OF ELECTRONS OR BETA PARTICLES BREMSSTRAHLUNG REGISTRATION

A. Yu. Portnoy, M. Yu. Portnoy

Irkutsk state university of transport, Irkutsk, Russia

The processes of interaction of an electron flux with an energy of up to 500 keV with the target material (anode of an X-ray tube) and the subsequent interaction of X-ray radiation with semiconductor Si and Ge detectors are considered. The dependences of the photon detection probability on the photon energy by Si and Ge detectors are calculated. Presented graphically. The calculated spectral distributions of the radiation pulses of an X-ray tube with a copper anode at anode voltage of 50, 100, and 500 kV recorded by Si and Ge detectors are presented.

In the case of registration with a Si detector, it's shown that in the low-energy region of the detected radiation, the registration processes in the Compton plateau of radiation losses with a sufficiently high energy arising in the target cannot be neglected. In the case of a Ge detector, the registration of bremsstrahlung at the peak of photo loss cannot be neglected in the low energy region of the detected radiation.

Keywords: electron beam bremsstrahlung, detector response function, Compton escape plateau, photo escape peak

REFERENCES

1. Kramers H.A. On the theory of X-ray absorption and of the continuous X-ray spectrum. *Phil. Mag.*, Ser. 6, 1923, vol. 46, is. 275, pp. 836–871.
2. Bethe H. Zur Theorie des durchgang schneller korpuskularstrahlen durch materie. *Annalen der Physik (Leipzig)*, 1930, vol. 397, no. 3, pp. 325–400. DOI: 10.1002/andp.19303970303
3. Sommerfeld A. *Atomic Structure and Spectral Lines (Atombau und Spektrallinien)*. Methuen & Co. Ltd. 1923, 626 p. (Russ. ed.: Zommerfeld A. *Stroenie atoma i spektry*. Translate K.P. Gurov, ads. I.B. Borovskoy. Moscow, GITIL Publ., 1956, vol. 1, 591 p., vol. 2, 694 p.).
4. Loomis T.C., Keith H.D. Spectral distribution of x-rays produced by a General electric EA 75 Cr/W tube at various applied constant voltages. *X-ray spectrometry*, 1976, vol. 5, is. 2, pp. 104–114. DOI: 10.1002/xrs.1300050211
5. Arai T., Shoji T., Omote K. Measurement of the spectral distribution emitted from spectrographic tubes. *Advances in X-ray analysis*, 1985, vol. 29, pp. 413–422. DOI: 10.1154/S0376030800010521
6. Finkelshtein A.L., Pavlova T.O. Calculation of X-ray tube distribution. *X-ray spectrometry*, 1999, vol. 28, is. 1, pp. 27–32. DOI: 10.1002/(SICI)1097-4539(199901/02)28:1<27::AID-XRS302>3.0.CO;2-R
7. Kirkpatrick P., Wiedman L. Theoretical continuous X-ray energy and polarization. *Physical Review*, 1945, vol. 67, no. 11-12, pp. 321–329. DOI: 10.1103/PhysRev.67.321
8. Reed S.J.B. The shape of the continuous x-ray spectrum and background correction for energy-dispersive electron microprobe analysis. *X-ray spectrometry*, 1975, vol. 4, is. 1, pp. 14–17. DOI: 10.1002/xrs.1300040105
9. Statham P.J. The generation, absorption and anisotropy of thick target bremsstrahlung and implication for quantitative energy disperse analysis. *X-ray spectrometry*, 1976, vol. 5, is. 3, pp. 154–168. DOI: 10.1002/xrs.1300050310
10. Philibert J. A method for calculating the absorption corrections in electron probe microanalysis. *X-ray optics and X-ray microanalysis*. N.Y.: Acad. Press, 1963, pp. 379–392. DOI: 10.1016/B978-1-4832-3322-2.50039-1
11. Reed S.J.B. *Electron microprobe analysis*. Cambridge [Eng], New York, Cambridge University Press, 1975. 400 p. (Russ. ed.: Rid S. *Elektronno-zondoviy mikroanaliz*. Moscow, Mir Publ., 1979. 423 p.).
12. Green M., Crosslet V.E. The efficiency of production of characteristic X-radiation in thick targets of a pure element. *Proc. Phys. Soc.*, 1961, vol. 78, no. 6, pp. 1206–1214. DOI: 10.1088/0370-1328/78/6/315
13. Green M. The target absorption correction in X-ray microanalysis. *X-ray optics and X-ray microanalysis*, N.Y., Acad. Press, 1963, pp. 361–377.
14. Dearnaley G., Northrop D.C. *Semiconductor counters for nuclear radiations*. New York, Wiley, 1963. 331 p. (Russ. ed.: Dirnli G., Nortrop D. *Poluprovodnikovye schetchiki yadernyh izluchenij*. Moscow, Mir Publ., 1966. 260 p.).
15. Keith H.D., Loomis T.C. Calibration and use of a lithium drifted silicon detector for accurate analysis of X-ray spectra. *X-ray spectrometry*, 1976, vol. 5, is. 4, pp. 93–103. DOI: 10.1002/xrs.1300050210
16. Felsteiner J., Kahane S., Rosner B. Effect of the electron momentum distribution on the shape of the Compton edge of Si(Li) detectors. *Nuclear instruments and methods*, 1973, vol. 118, is. 1, pp. 253–255.
17. Serebryakov A.S. *Vychislitelnye modeli detektorov yadernogo i rentgenovskogo izlucheniya*. Diss. kand. fiz.-mat. nauk. [Computational models of nuclear and X-ray detectors. cand. phys.-math. sci. diss.]. Leningrad, 1983. (In Russ.).
18. Portnoy A.Yu. [An estimation method of energetic and spatial parameters of x-ray and gamma detectors]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2009, vol. 19, no. 4, pp. 13–23. (In Russ.). URL: <http://iairas.ru/en/mag/2009/abst4.php#abst2>
19. Portnoy A.Yu., Pavlinsky G.V., Gorbunov M.S. An estimation of the signal to background ratio limited by photon and electron transport in EDXRF. *X-ray spectrometry*, 2010, vol. 39, no. 1, pp. 41–51. DOI: 10.1002/xrs.1220
20. Portnoy A.Yu., Pavlinsky G.V., Gorbunov M.S., Sidorova Yu.I. An estimation of EDXRF spectrometer properties, based on a two-layer composite Si-Ge detector. *X-ray spectrometry*, 2012, vol. 41, is. 1, pp. 298–303. DOI: 10.1002/xrs.2396
21. Can C. Escape of photoelectrons and Compton-scattered photons from an HPGe detector. *X-ray spectrometry*, 2003, vol. 32, is. 4, pp. 280–284. DOI: 10.1002/xrs.650
22. Pekoz R., Can C. Components of detector response function: Monte Carlo simulations and experiment. *X-ray spectrometry*, 2006, vol. 35, is. 6, pp. 347–351. DOI: 10.1002/xrs.917
23. Tinh T.P., Leroux J. New basic empirical equation for computing of X-ray mass attenuation coefficients. *X-ray spectrometry*, 1979, vol. 9, no. 2, pp. 85–91. DOI: 10.1002/xrs.1300080211
24. Hubbell J.H., Veigele Wm.J., Bragg E.A., Brown R.T., Cromer D.T., Howerton R.J. Atomic form factors, incoherent scattering functions, and photon scattering cross sections. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 1975, vol. 4, is. 3, pp. 471–538. DOI: 10.1063/1.555523
25. Reed W.A., Eisenberger P. Gamma ray Compton profiles of diamond, silicon and germanium. *Phys. Rev. B*, 1972, vol. 6, is. 12, pp. 4596–4604. DOI: 10.1103/PhysRevB.6.4596
26. Papp T., Maxwell J.A., Papp A., Nejedly Z., Campbell J.L. On the role of the signal processing electronics in X-ray analytical measurements. *Nuclear instruments and methods in physics research B*, 2004, vol. 219-220, pp. 503–507. DOI: 10.1016/j.nimb.2004.01.111