

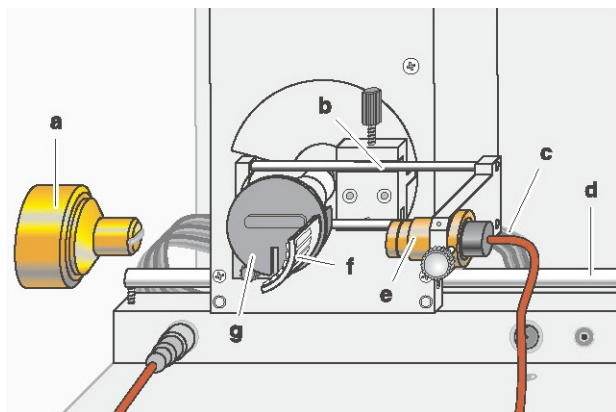
# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

## ИЗУЧЕНИЕ ПОГЛОЩЕНИЯ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ

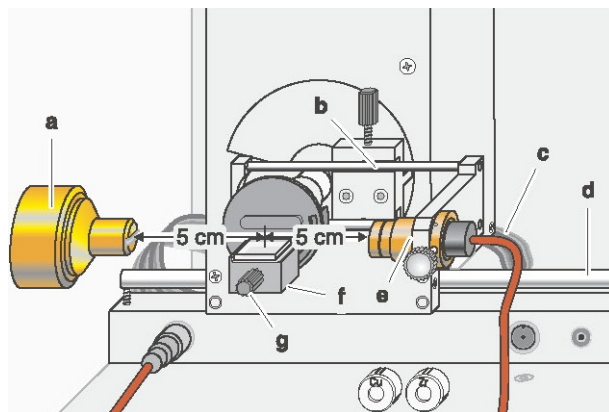
Поляков Даниил, 19.Б23-фз

**Цель работы:** исследовать поглощение рентгеновских лучей в зависимости от материала, толщины поглотителя и длины волны излучения.

### Схема установки



**Рисунок 1.** Экспериментальная камера рентгеновской установки с набором поглотителей



**Рисунок 2.** Экспериментальная камера рентгеновской установки с монокристаллом

**a** — коллиматор;

**g** — гониометр;

**f** — кассета с набором поглотителей / столик с монокристаллом;

**e** — счётчик Гейгера — Мюллера.

## Расчётные формулы

- Закон ослабления интенсивности:

$$T = \frac{I}{I_0} = e^{-\mu d}$$

$T$  — коэффициент пропускания вещества;

$I$  — интенсивность излучения на выходе;

$I_0$  — интенсивность излучения на входе;

$$\mu = -\frac{\ln(T)}{d}$$

$\mu$  — линейный коэффициент ослабления вещества;

$d$  — толщина вещества.

- Массовый коэффициент ослабления вещества:

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho}$$

$\mu$  — линейный коэффициент ослабления вещества;

$\rho$  — плотность вещества.

- Массовый коэффициент рассеяния вещества:

$$\sigma_m = \frac{8\pi}{3} r_e^2 Z \frac{N_A}{M}$$

$r_e$  — классический радиус электрона;

$Z$  — атомный номер вещества;

$N_A$  — постоянная Авогадро;

$M$  — молярная масса вещества.

- Массовый коэффициент истинного поглощения вещества:

$$\tau_m = \mu_m - \sigma_m$$

$\mu_m$  — массовый коэффициент ослабления вещества;

$$\tau_m = k_1 \lambda^\alpha$$

$\sigma_m$  — массовый коэффициент рассеяния вещества;

$\lambda$  — длина волны излучения;

$$\tau_m = k_2 Z^\beta$$

$Z$  — атомный номер вещества;

$k_1, k_2, \alpha, \beta$  — коэффициенты степенного закона между скачками.

- Атомный номер элемента, отвечающий К-скачку:

$$Z_K = \frac{1}{\sqrt{\lambda_K R}}$$

$\lambda_K$  — длина волны К-линии;

$R$  — постоянна Ридберга для тяжёлых атомов.

- Условие Брэгга — Вульфа:

$$n\lambda = 2D\sin(\theta)$$

$n$  — порядок дифракции;

$\lambda$  — длина волны излучения;

$D$  — межплоскостное расстояние кристалла;

$\theta$  — угол скользющего падения.

- Формулы для вычисления погрешностей:
  - Абсолютная погрешность косвенных измерений:

$$\Delta_{f(x_1, x_2, \dots)} = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \cdot \Delta_{x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \cdot \Delta_{x_2}\right)^2 + \dots}$$

$$\Delta_{\mu_m} = \left| \frac{\partial \mu_m}{\partial \mu} \cdot \Delta_{\mu} \right| = \left| \frac{\Delta_{\mu}}{\rho} \right|$$

$$\Delta_{\tau_m} = \Delta_{\mu_m}$$

## Порядок измерений

1. Запускаем ПО для работы с установкой. Устанавливаем в гониометр кассету с набором алюминиевых поглотителей разной толщины. Измеряем зависимость интенсивности излучения  $I$  от толщины поглотителя  $d$ , сначала без фильтра, а затем с циркониевым фильтром.
2. Устанавливаем в гониометр кассету с набором из шести поглотителей C, Al, Fe, Cu, Zr, Ag толщиной  $d = 0.5$  мм каждый. Измеряем зависимость интенсивности излучения  $I$  от материала поглотителя, сначала без фильтра, а затем с циркониевым фильтром. Проводим измерения в прямом пучке, с C и Al при эмиссионном токе 0.02 мА, а с Fe, Cu, Zr, Ag — при эмиссионном токе 1.00 мА.
3. Устанавливаем столик с монокристаллом NaCl в гониометр и проводим автоматическую калибровку прибора. Измеряем зависимость интенсивности излучения  $I$  от угла скользкого падения  $\theta$  в 1-ом порядке дифракции. Всего выполняем три измерения: без поглотителя, с медной фольгой и с циркониевой фольгой.
4. Устанавливаем угол для измерения, значение которого выше коротковолновой границы, но при этом ниже К-краёв поглощения для всех поглотителей. Измеряем интенсивность излучения прямого пучка, а затем повторяем измерение с поглотителями из Al, Fe, Cu, Zr, Ag.

## Результаты

Примечание: построение графиков и аппроксимация зависимостей выполнены с помощью ПО MATLAB. Погрешности прямых измерений и коэффициентов аппроксимации рассчитаны с доверительной вероятностью  $P = 95\%$ .

## 1. Ослабление рентгеновских лучей в зависимости от толщины поглотителя

Таблица 1. Зависимость коэффициента пропускания от толщины алюминия

| $d$ , мм | $T$ без фильтра | $T$ с фильтром |
|----------|-----------------|----------------|
| 0.5      | 0.45208         | 0.44718        |
| 1.0      | 0.21761         | 0.20141        |
| 1.5      | 0.11654         | 0.09639        |
| 2.0      | 0.05507         | 0.04170        |
| 2.5      | 0.03598         | 0.02583        |
| 3.0      | 0.01800         | 0.01085        |

Построим зависимость  $\ln(T)$  от  $d$  и аппроксимируем её уравнением  $y = ax$  в соответствии с теоретической формулой.

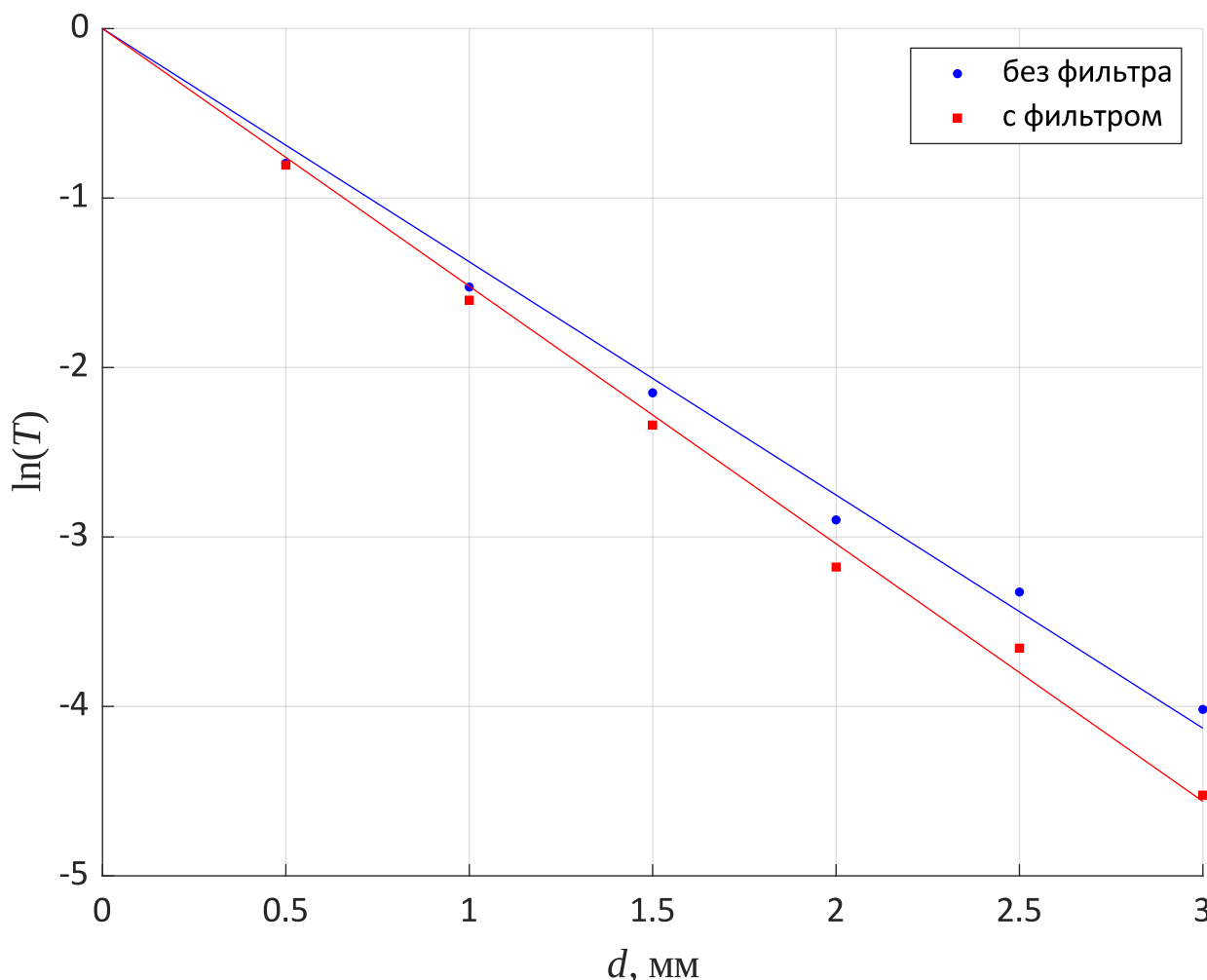


График 1. Зависимость логарифма коэффициента пропускания от толщины алюминия

Экспериментальная зависимость действительно похожа на линейную, однако точки заметно отклоняются от прямой, причём характер этих отклонений одинаков для случаев с фильтром и без фильтра. Скорее всего это связано с отклонением значений толщины поглотителей от указанных.

Из коэффициента аппроксимации находим линейный коэффициент ослабления алюминия ( $\mu = -a$ ), а по нему рассчитываем массовый коэффициент ослабления и массовый коэффициент истинного поглощения.

**Таблица 2. Параметры алюминия**

| $Z$ | $\rho$ , г/см <sup>3</sup> | $M$ , г/моль |
|-----|----------------------------|--------------|
| 13  | 2.70                       | 26.98        |

**Таблица 3.**

*Коэффициенты ослабления, рассеяния и истинного поглощения алюминия*

|             | $\mu$ , см <sup>-1</sup> | $\mu_m$ , см <sup>2</sup> /г | $\sigma_m$ , см <sup>2</sup> /г | $\tau_m$ , см <sup>2</sup> /г |
|-------------|--------------------------|------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| без фильтра | $13.8 \pm 0.7$           | $5.1 \pm 0.3$                | 0.19                            | $4.9 \pm 0.3$                 |
| с фильтром  | $15.2 \pm 0.6$           | $5.6 \pm 0.2$                |                                 | $5.4 \pm 0.2$                 |

Коэффициент ослабления в случае с фильтром отличается от случая без фильтра. Дело в том, что излучение разных длин волн ослабляется веществами по-разному. В случае без фильтра на алюминий попадает полный спектр излучения рентгеновской трубки, а при прохождении через фильтр спектр сильно изменяется и при прохождении алюминия ослабляется сильнее.

## **2. Ослабление рентгеновских лучей в зависимости от вещества поглотителя**

Измерение интенсивности в прямом пучке, с С и Al проводилось при токе эмиссии 0.02 мА, а с Fe, Cu, Zr, Ag — при токе эмиссии 1.00 мА. Полагая, что интенсивность излучения трубки пропорциональна току эмиссии, все значения интенсивности были приведены к току эмиссии 1.00 мА, т. е. исходные значения интенсивности в случае прямого пучка, С и Al были увеличены в 50 раз.

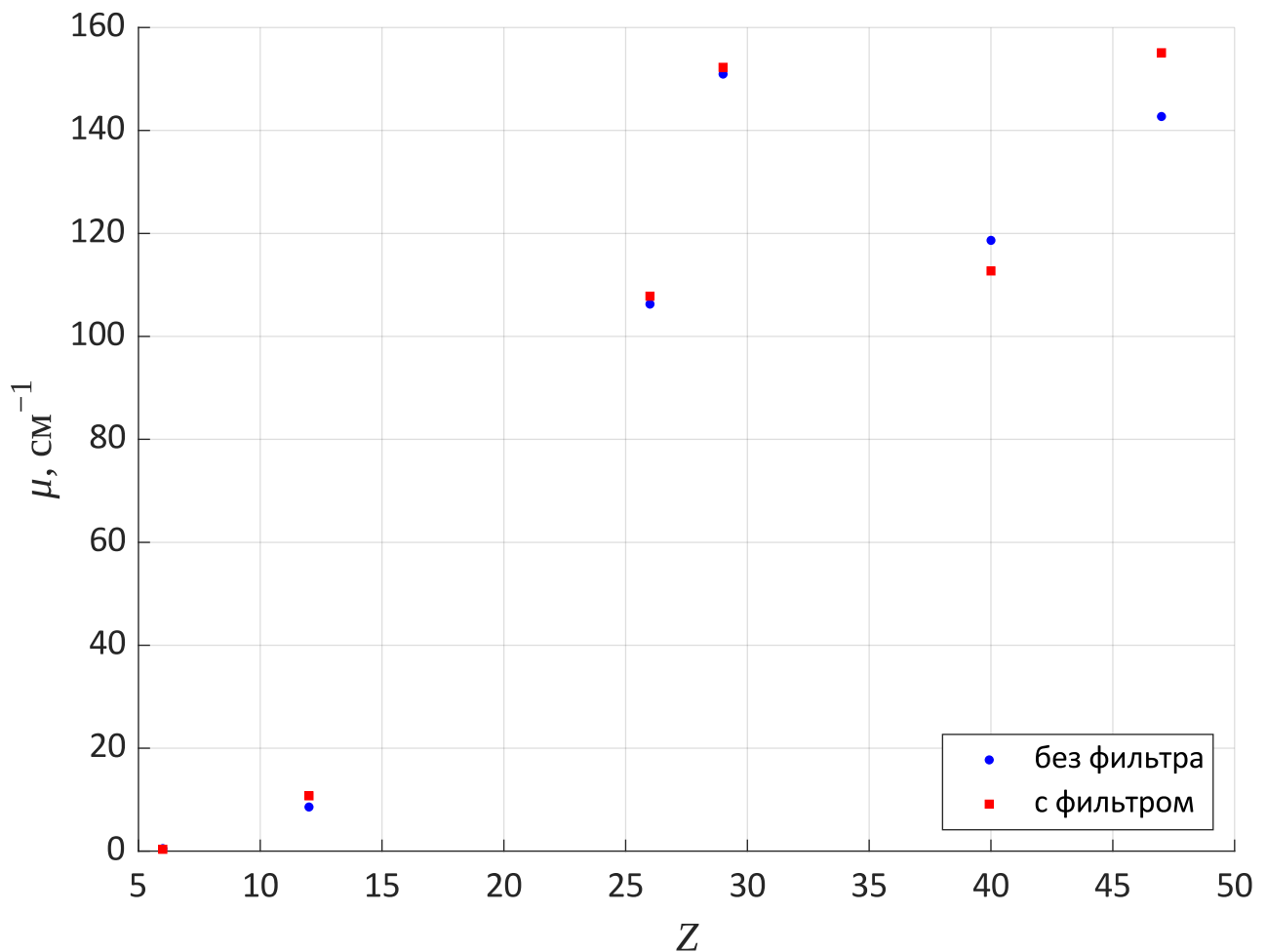
Толщина всех поглотителей:

$$d = 0.5 \text{ мм}$$

**Таблица 4.**

*Зависимость коэффициентов пропускания и ослабления от вещества*

| Вещество | Z  | Без фильтра |                       | С фильтром |                       |
|----------|----|-------------|-----------------------|------------|-----------------------|
|          |    | $T$         | $\mu, \text{см}^{-1}$ | $T$        | $\mu, \text{см}^{-1}$ |
| C        | 6  | 0.97556     | 0.4948                | 0.98171    | 0.3692                |
| Al       | 12 | 0.65109     | 8.5821                | 0.58437    | 10.744                |
| Fe       | 26 | 0.00492     | 106.27                | 0.00456    | 107.82                |
| Cu       | 29 | 0.00053     | 150.95                | 0.00049    | 152.27                |
| Zr       | 40 | 0.00265     | 118.66                | 0.00357    | 112.70                |
| Ag       | 47 | 0.00080     | 142.72                | 0.00043    | 155.10                |



**График 2.** Зависимость линейного коэффициента поглощения от атомного номера вещества

Форма зависимости схожа в случаях с фильтром и без фильтра, однако можно наблюдать, что в случаях одних веществ коэффициент ослабления выше с фильтром, а в случаях других веществ — без фильтра. Это связано с тем, что разные вещества поглощают одинаковые длины волн по-разному.

Наблюдаем, что полученная зависимость немонотонна. Из графика можно предположить, что К-скачок расположен между  $Z = 29$  и  $Z = 40$ . Длина волны линии  $K_{\alpha, 1}$  молибдена, из которого выполнен анод рентгеновской трубки:

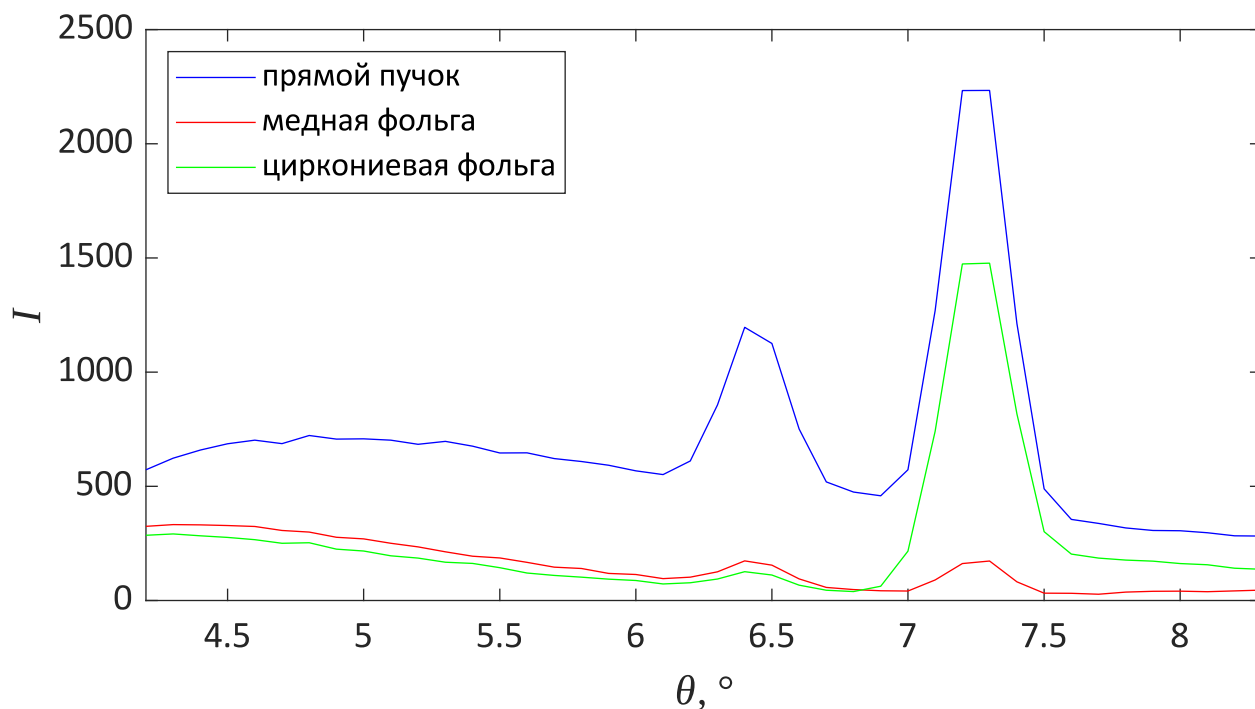
$$\lambda_K = 70.931715(41) \text{ пм}$$

Расчётное значение К-скачка:

$$Z_K = 35.8$$

Значение попадает в предсказанный диапазон.

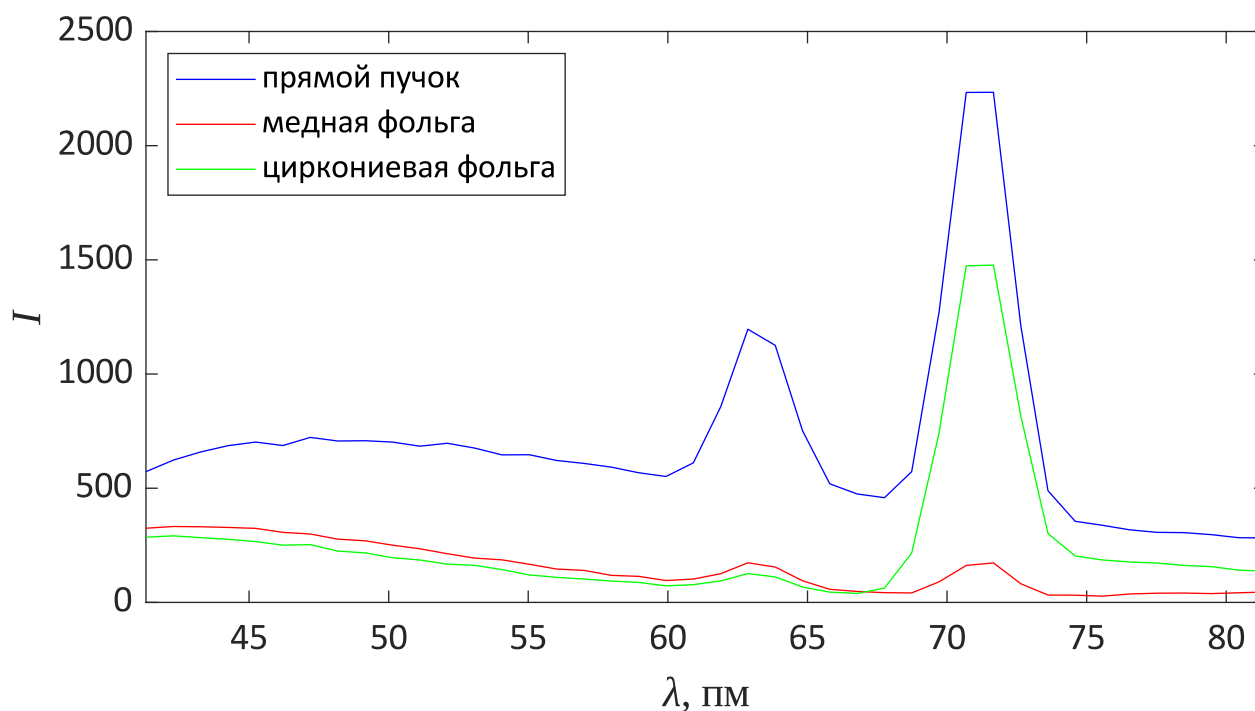
### 3. Зависимость коэффициента истинного поглощения рентгеновских лучей от длины волны излучения



**График 3.** Дифракционный спектр излучения по углам падения

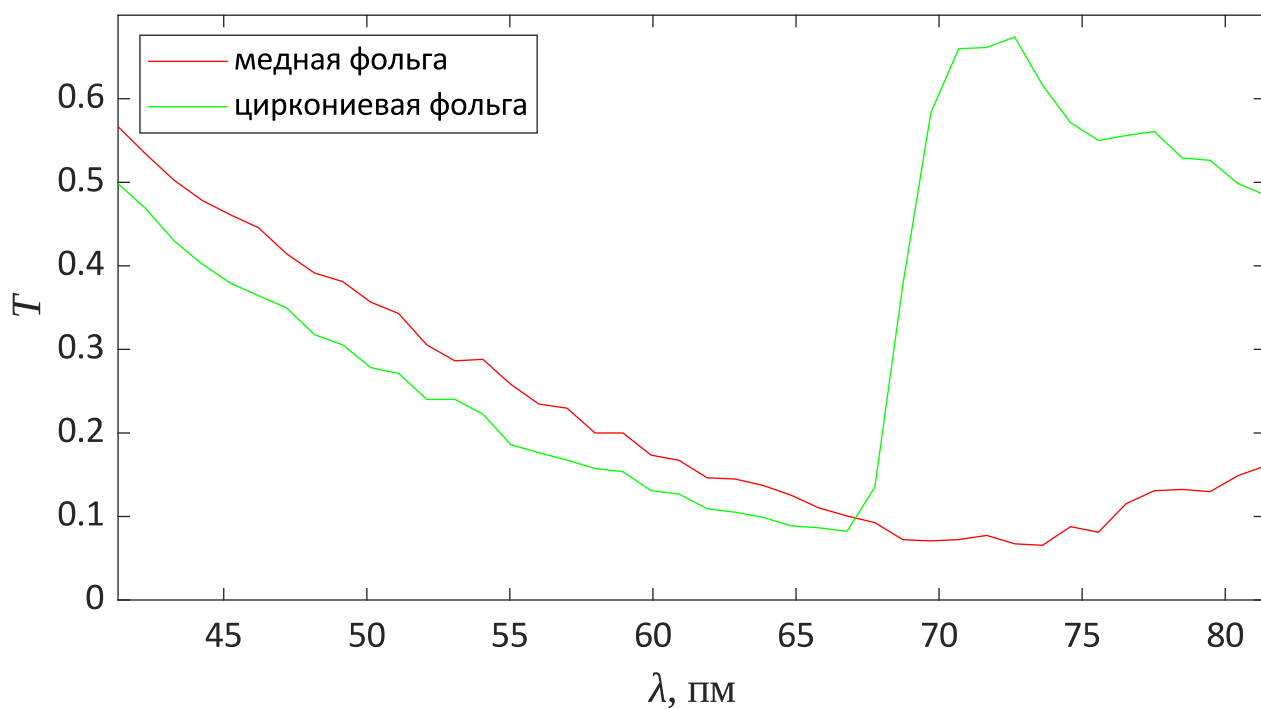
Переведём углы полученного спектра в длины волн, воспользовавшись условием Брэгга — Вульфа. Все углы лежат в 1-ом порядке дифракции, а параметр решётки использованного кристалла NaCl:

$$2D = 564.0 \text{ нм}$$



**График 4.** Спектр излучения по длинам волн





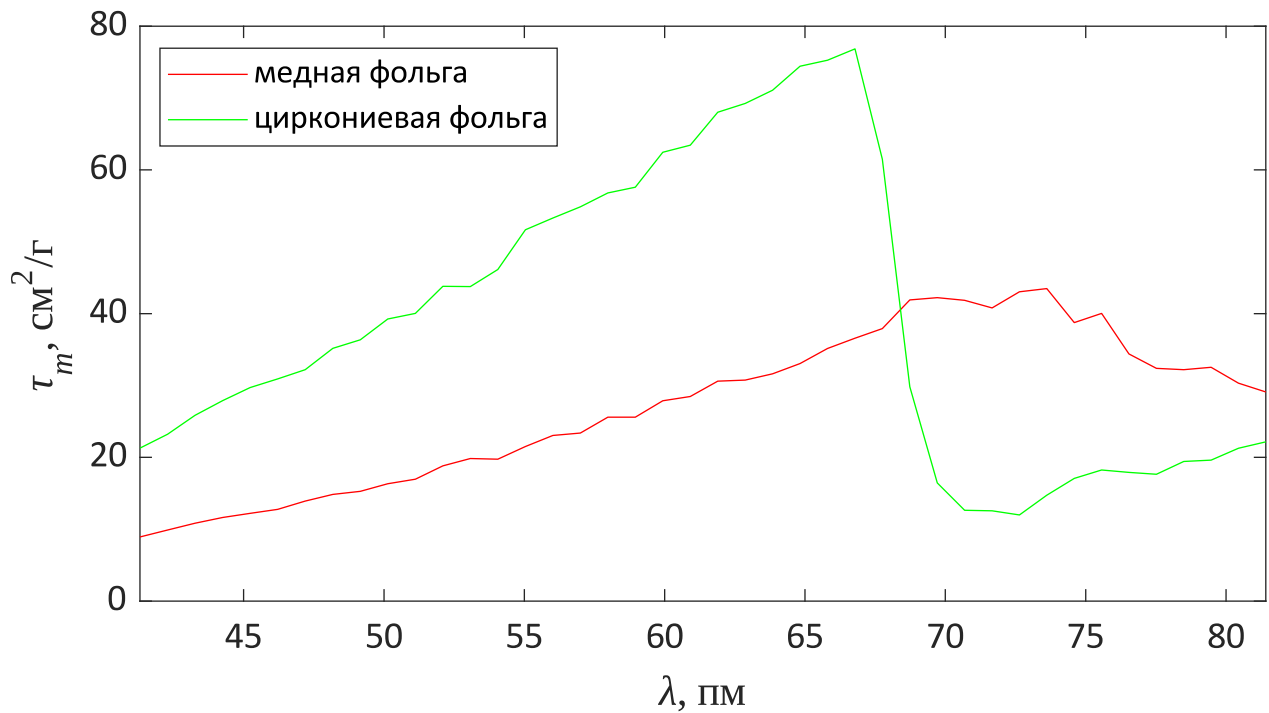
**График 5.**

*Зависимость коэффициента пропускания поглотителя от длины волны*

Далее по известным параметрам поглотителей рассчитываем массовые коэффициенты поглощения для измеренных точек.

**Таблица 5. Параметры использованных поглотителей**

| Элемент | $Z$ | $\rho$ , г/см <sup>3</sup> | $M$ , г/моль | $d$ , мм |
|---------|-----|----------------------------|--------------|----------|
| Cu      | 29  | 8.92                       | 63.55        | 0.07     |
| Zr      | 40  | 6.49                       | 91.22        | 0.05     |



**График 6.** Зависимость коэффициента поглощения от длины волны

Для обоих поглотителей наблюдается скачок коэффициента поглощения, причём для циркониевой фольги он получился резким, а для медной фольги более плавным.

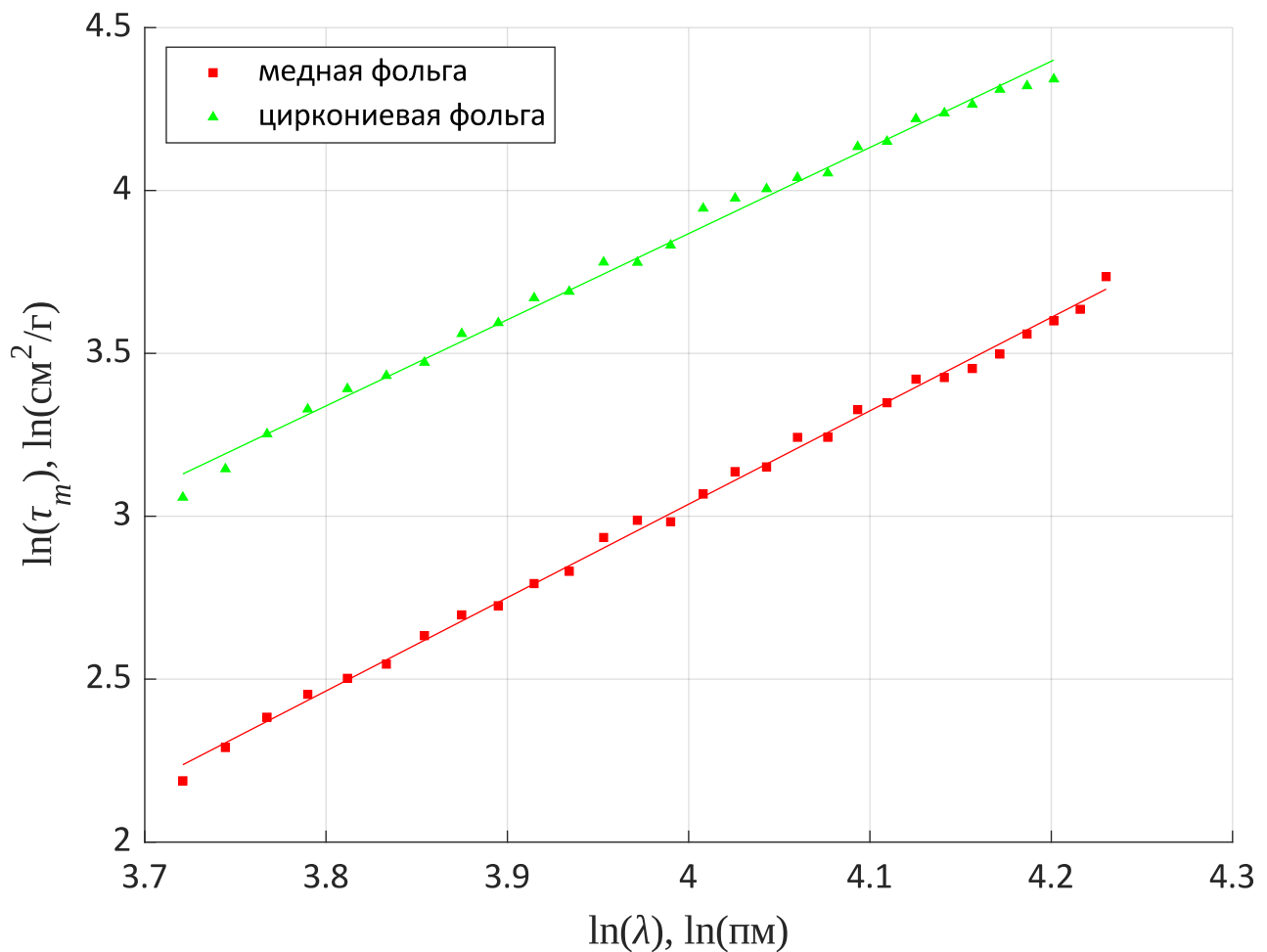
Определим параметры  $\alpha$  и  $k_1$  зависимости  $\tau_m(\lambda)$  на участке до скачка. Представим зависимость в линеаризованном виде и аппроксимируем её:

$$\ln(\tau_m) = \alpha \ln(\lambda) + \ln(k_1) \quad \Leftrightarrow \quad y = ax + b$$

$$y \equiv \ln(\tau_m), \quad x \equiv \ln(\lambda), \quad a \equiv \alpha, \quad b \equiv \ln(k_1)$$

После этого найдём параметры из коэффициентов аппроксимации:

$$\alpha = a, \quad k_1 = e^b$$



**График 7.** Зависимость логарифма коэффициента поглощения от логарифма длины волны

Полученная зависимость действительно похожа на линейную.

**Таблица 6.** Аппроксимация зависимости коэффициента поглощения от длины волны до скачка

|    | $y(x)$                         | $\tau_m(\lambda)$                                       |
|----|--------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Cu | $y = 2.87(6) \cdot x - 8.4(2)$ | $\tau_m = 2.2(5) \cdot 10^{-4} \cdot \lambda^{2.87(6)}$ |
| Zr | $y = 2.64(8) \cdot x - 6.7(3)$ | $\tau_m = 12(4) \cdot 10^{-4} \cdot \lambda^{2.64(8)}$  |

Полученные значения коэффициентов подходят только при размерностях:

$$[\tau_m] = \text{см}^2/\text{г}, [\lambda] = \text{нм}$$

#### 4. Зависимость коэффициента истинного поглощения рентгеновских лучей от атомного номера поглотителя

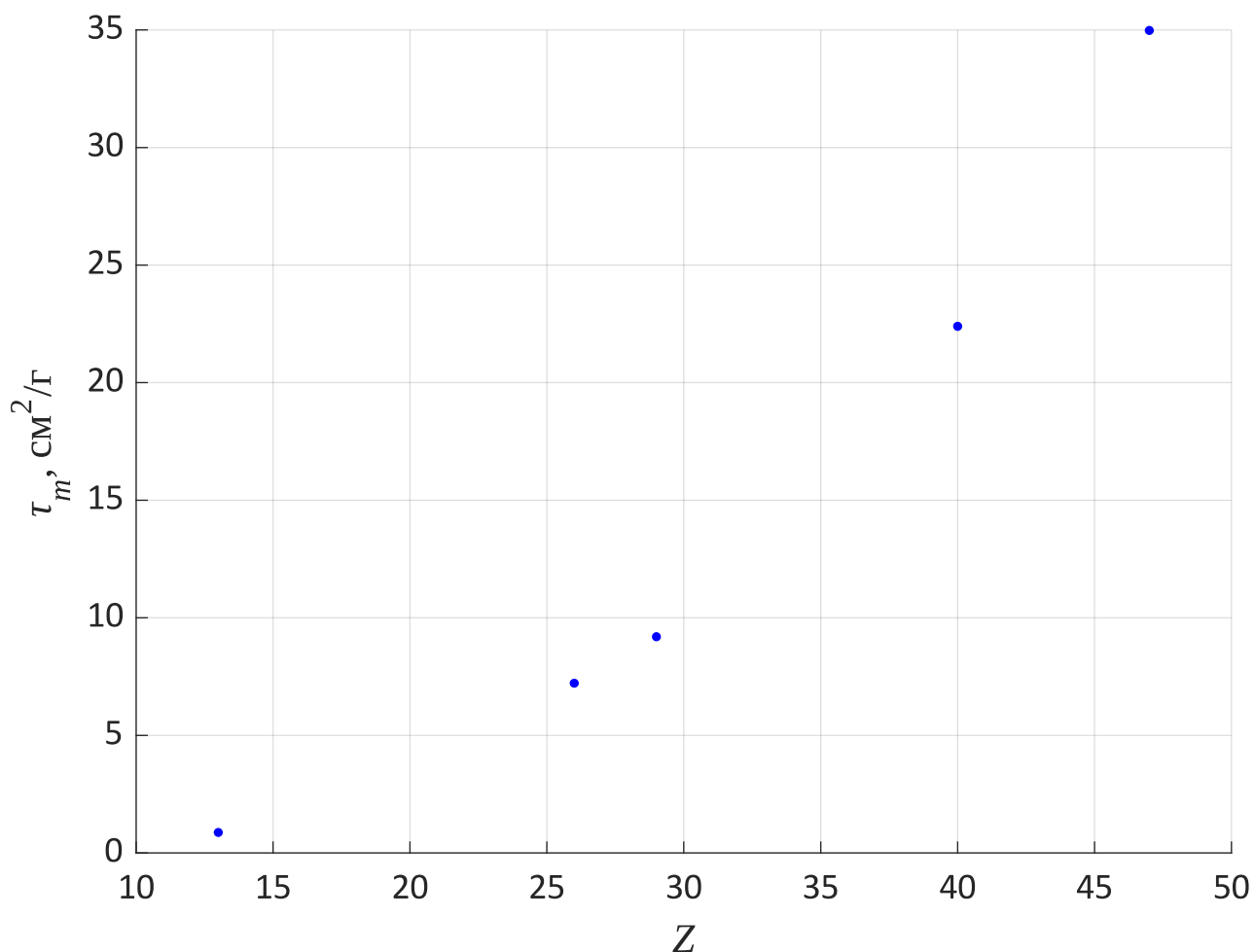
Угол падения и соответствующая длина волны излучения, при которых проводились измерения:

$$\theta = 4.1^\circ$$

$$\lambda = 40 \text{ пм}$$

**Таблица 7.** Параметры и коэффициенты поглощения поглотителей

| Элемент | $Z$ | $\rho$ , г/см <sup>3</sup> | $M$ , г/моль | $d$ , мм | $T$     | $\tau_m$ , см <sup>2</sup> /Г |
|---------|-----|----------------------------|--------------|----------|---------|-------------------------------|
| Al      | 13  | 2.70                       | 26.98        | 0.5      | 0.86575 | 0.875                         |
| Fe      | 26  | 7.86                       | 55.85        | 0.5      | 0.05443 | 7.22                          |
| Cu      | 29  | 8.92                       | 63.55        | 0.07     | 0.55678 | 9.20                          |
| Zr      | 40  | 6.49                       | 91.22        | 0.05     | 0.48069 | 22.4                          |
| Ag      | 47  | 10.50                      | 107.87       | 0.05     | 0.15795 | 35.0                          |



**График 8.** Зависимость коэффициента поглощения от атомного номера

Все экспериментальные точки расположены до скачка. Определим параметры  $\beta$  и  $k_2$  зависимости  $\tau_m(Z)$  на участке до скачка. Представим зависимость в линеаризованном виде и аппроксимируем её:

$$\ln(\tau_m) = \beta \ln(Z) + \ln(k_2) \Leftrightarrow y = ax + b$$

$$y \equiv \ln(\tau_m), \quad x \equiv \ln(Z), \quad a \equiv \beta, \quad b \equiv \ln(k_2)$$

После этого найдём параметры из коэффициентов аппроксимации:

$$\beta = a, \quad k_2 = e^b$$

Полученная зависимость действительно похожа на линейную.

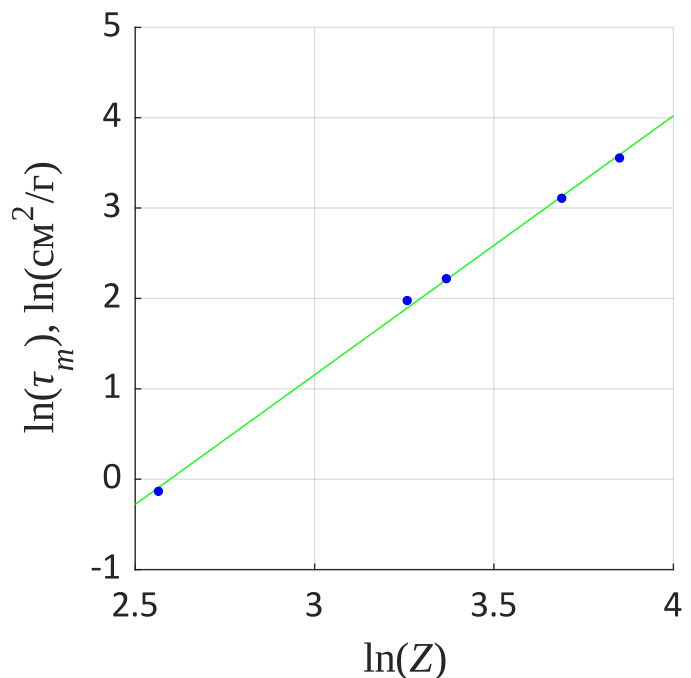
Получаем аппроксимирующее уравнение:

$$y = 2.9(2) \cdot x - 7.4(6)$$

$$\tau_m = 6(4) \cdot 10^{-4} \cdot Z^{2.9(2)}$$

Полученные значения коэффициентов подходят только при размерности:

$$[\tau_m] = \text{см}^2/\text{г}$$



**График 9.** Зависимость логарифма коэффициента поглощения от логарифма атомного номера

## Выводы

Рентгеновское излучение ослабляется при прохождении через вещества. Ослабление состоит из рассеяния, которое не зависит от длины волны и толщины поглотителя, и поглощения, зависимость которого от толщины поглотителя описывается экспоненциальным законом. В работе показано, что зависимость коэффициента истинного поглощения от длины волны и атомного номера вещества поглотителя представляется в виде экспоненциальных участков и связывающих их скачков.