

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО  
ОБРАЗОВАНИЯ

**«БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
( Н И У « Б е л Г У » )**

ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК

КАФЕДРА ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА В УСЛОВИЯХ  
ВАКУУМА ПРИ РАЗЛИЧНОЙ СКОРОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ  
ТЕМПЕРАТУРЫ ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КРИСТАЛЛА**

Выпускная квалификационная работа  
обучающегося по направлению подготовки 03.03.02 Физика  
очной формы обучения группы 07001414  
Кленина Артемия Александровича

Научный руководитель:  
к.ф.-м.н., доцент  
Вохмянина К.А.

БЕЛГОРОД 2018

## Оглавление

Введение.....	3
Глава 1. Обзор литературы.....	5
1.1 Пироэлектрический эффект.....	5
1.2 Применение пироэлектрического кристалла в качестве источника рентгеновского излучения.....	6
Глава 2. Исследование пироэлектрического эффекта в условиях вакуума при различной скорости изменения температуры пироэлектрического кристалла. .....	14
2.1 Описание экспериментальной части.....	14
2.2 Результаты эксперимента.....	20
Заключение .....	35
Список используемой литературы .....	36

## **Введение**

Известно, что пьезоэлектрические материалы в условиях вакуума позволяют генерировать потенциал порядка 100 кВ при изменении температуры материала на величину порядка 10 градусов на 1 см<sup>2</sup>. Возникший таким образом потенциал может быть использован для ускорения заряженных частиц и генерации рентгеновского излучения. Данная идея может быть использована для создания малогабаритных, безопасных и интенсивных источников рентгеновского излучения. В настоящее время уже существует источник Amptek COOL-X, работа которого основана на применении пьезоэлектрических кристаллов. Однако последние результаты исследований пьезоэлектрического эффекта демонстрируют возможность создания портативного источника, характеристики которого будут превосходить Amptek Cool-X по интенсивности и максимальной энергии генерирующегося рентгеновского излучения.

Исследования, проводимые в данной работе, направлены на поиск оптимального температурного режима работы пьезоэлектрического кристалла с целью повышения интегральной интенсивности генерируемого рентгеновского излучения, что и обуславливает их актуальность.

Цель работы: исследование интенсивности и спектра РИ в условиях вакуума при различных скоростях изменения температуры пьезоэлектрического кристалла.

В работе приводятся результаты экспериментального исследования зависимости параметров рентгеновского излучения (РИ) от скорости изменения температуры монокристалла танталата лития в пьезоэлектрическом источнике рентгеновского излучения.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнение следующих задач:

- разработка и создание стенда для испытания пьезоэлектрических кристаллов;

- создание и отработка методики испытаний пьезоэлектрических кристаллов;
- проведение экспериментальных исследований.

## Глава 1. Обзор литературы

### 1.1 Пироэлектрический эффект

Первое упоминание о пироэлектрическом эффекте датируется 314 г. до н.э. в записях Теофрастуса. Он заметил, что нагретые кристаллы турмалина притягивают к себе соломинки и частички пепла. Пироэлектрические свойства турмалина позже были вновь открыты Иоганном Георгом Шмидтом в 1707 году.

Пироэлектрики – диэлектрические кристаллы, обладающие самопроизвольной (спонтанной) поляризацией в отсутствие внешних воздействий, в ходе изменения температуры в которых возникает пироэлектрический ток. Обычно спонтанная поляризация не заметна, так как электрическое поле, создаваемое ею, компенсируется полем свободных электрических зарядов, которые «натекают» на поверхность пироэлектрика из его объёма и из окружающего воздуха. При изменении температуры величина спонтанной поляризации изменяется, что вызывает появление электрического поля, которое можно наблюдать до его компенсации свободными зарядами.

Пироэлектричество – явление возникновения электрического поля в кристаллах под действием изменения температуры путём нагрева, охлаждения, трения и т.п.

Пирокоэффициент – отношение изменения поляризованности диэлектрика к вызвавшему это изменение интервалу температуры. Используя формулу (1) можно оценить величину тока, генерируемого при пироэлектрическом эффекте

$$i = \gamma A \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (1),$$

где  $\frac{\Delta T}{\Delta t}$  – скорость изменения температуры,  $\gamma$  – пирокоэффициент,  $A$  – площадь рабочей поверхности кристалла.

## 1.2 Применение пироэлектрического кристалла в качестве источника рентгеновского излучения

В 1992 году в журнале Nature была опубликована работа Дж Браунриджа [1], в которой впервые был представлен эксперимент по генерации рентгеновского излучения путем охлаждения и нагрева пироэлектрического кристалла ниобата цезия ( $\text{CsNO}_3$ ), в диапазоне 77- 300 К. Кристалл с нагревательным элементом размещался в вакуумной камере, давление остаточного газа в которой составляло порядка нескольких мторр. Одновременно с процессом изменения температуры кристалла регистрировался спектр рентгеновского излучения с помощью Si(Li) спектрометра. Максимальная энергия регистрируемого излучения достигала 20 кэВ, причем на спектре были четко идентифицированы  $L_\alpha$  и  $L_\beta$  характеристические линии золота, материала мишени, располагавшейся напротив пироэлектрического кристалла. Ниже, на рисунке 1, представлен спектр из [1].

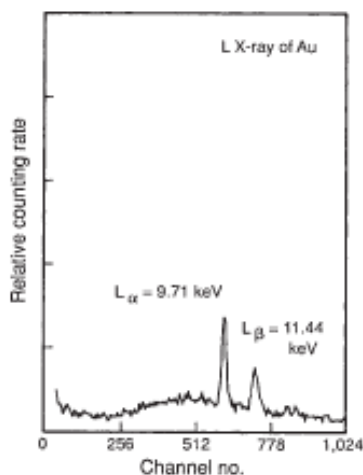


Рисунок 1. Спектр рентгеновского излучения, генерируемого в золотой мишени при изменении температуры пироэлектрического кристалла ниобата цезия ( $\text{CsNO}_3$ ) в диапазоне 77- 300 К [1]

Генерация рентгеновского излучения обосновывалась автором работы [1] возникновением сильного электрического поля, которое формируется из-за индукции электрического заряда на поверхность кристалла. В сильном

электрическом поле молекулы остаточного газа поляризуются и притягиваются к поверхности кристалла зарядом, противоположным заряду на поверхности. При соударении с поверхностью дипольная молекула распадается на положительный ион и электрон и, в зависимости от знака наведенного поверхностного заряда, на поверхности кристалла или от расположенной напротив мишени наблюдается генерация рентгеновского излучения от кристалла. Эта работа стала первой, посвященной эффекту генерации ионизирующего излучения при помощи пьезоэлектрического эффекта.

В [2-3] группа Дж. Браунриджа представила результаты экспериментов по генерации рентгеновского излучения при изменении температуры других пьезоэлектрических кристаллов: танталата и ниобата лития ( $\text{LiTaO}_3$  и  $\text{LiNbO}_3$ ). Использование этих кристаллов позволило получить спектры излучения более высокой энергии и интенсивности, чем для  $\text{CsNO}_3$ . Таким образом, представленные выше материалы стали основными материалами для генерации ионизирующих излучений в пьезоэлектрических источниках.

В своих работах Дж. Броунридж утверждал, что основной вклад в генерацию электронов и рентгеновского излучения вносит механизм поляризации молекул остаточного газа. Однако с помощью этого механизма было достаточно сложно объяснить факт, что при положительной полярности заряда на поверхности кристалла выход рентгеновского излучения в несколько больше, чем при отрицательной полярности заряда. На тот момент активно развивались исследования сегнетоэлектрической электронной эмиссии, эффекта эмиссии электронов при приложении высокого напряжения к электродам на поверхности сегнетоэлектриков. В [4] Ж. Розенман предположил, что при изменении температуры кристалла, когда на поверхности пьезоэлектрического кристалла индуцируется отрицательный заряд, также начинает работать механизм сегнетоэлектрической электронной эмиссии, который вносит свой дополнительный вклад в генерацию и ускорение электронов от поверхности кристалла. Проведенные измерения

тока сегнетоэлектрической электронной эмиссии показали, что его величина довольно мала, порядка  $10^{-9} - 10^{-10}$  А, при изменении температуры кристалла ниобата лития. Этот эффект был назван автором [4] слабой сегнетоэлектрической эмиссией (для сравнения сильная сегнетоэлектрическая эмиссия, проявляющаяся при приложении к пьезоэлектрику сильного электрического поля, способна обеспечивать ток  $10^2 - 10^3$  А). Тем не менее, вклад слабой сегнетоэлектрической эмиссии оказывается значительным для эффекта генерации рентгеновского излучения.

В ходе исследований эффекта сегнетоэлектрической электронной эмиссии при изменении температуры пьезоэлектрических кристаллов группа Дж. Броунриджа [5] открыла новый удивительный эффект. Визуальное наблюдение эмитирующих электронов с помощью флуоресцентного экрана показало, что электроны, эмитирующие с поверхности кристалла, фокусируются на некотором расстоянии от кристалла. Это расстояние зависит от геометрических размеров кристалла и давления окружающего газа. Ниже, на рисунке 2, представлены фотографии пятен, формируемых электронами при различных значениях давления остаточного газа (2 b,c,d) и установки с пьезоэлектрическим кристаллом и флуоресцентным экраном (2 a). Также, с помощью поверхностно-барьерного детектора измерялась интенсивность генерируемого электронного пучка в зависимости от расстояния между экраном и кристаллом. Полученные данные представлены на рисунке 3, из которого видно наличие четко выделенного максимума интенсивности, что и является свидетельством фокусировки эмитирующих электронов.



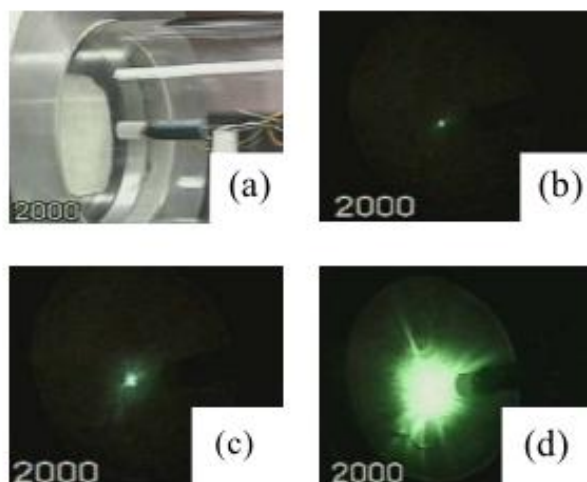


Рисунок 2. Фотография экспериментальной установки (а), фотографии следа пучка электронов при остаточном давлении в камере 0.5 мторр (b), 3 мторр (c), 8 мторр (d) соответственно [5]

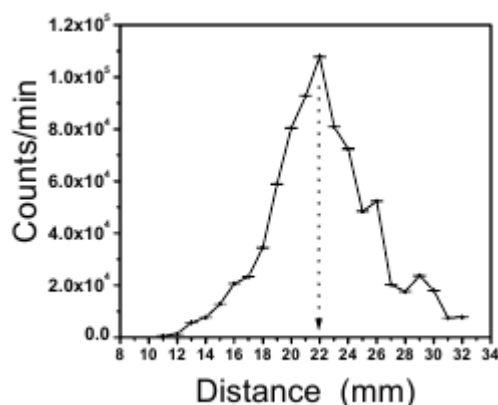


Рисунок 3. Зависимость интенсивности пучка электронов от расстояния между кристаллом и экраном [5]

Работа [5] стала первой работой, посвященной эффекту генерации сфокусированных электронных пучков при пьезоэлектрическом эффекте. Пьезоэлектрические кристаллы начали рассматривать не только как источники рентгеновского излучения, но и как источники уже готовых электронных пучков. В работе [6] Браунридж и др. представили другие замечательные результаты исследований генерации электронного пучка при изменении температуры пьезоэлектрического кристалла. Измерение спектра электронного пучка, ускоряемого от кристалла, показало, что значительная

часть электронов моноэнергетична (рисунок 4). Данное обстоятельство открыло перспективы для создания компактных пироэлектрических источников электронов с энергией порядка 100 кэВ.

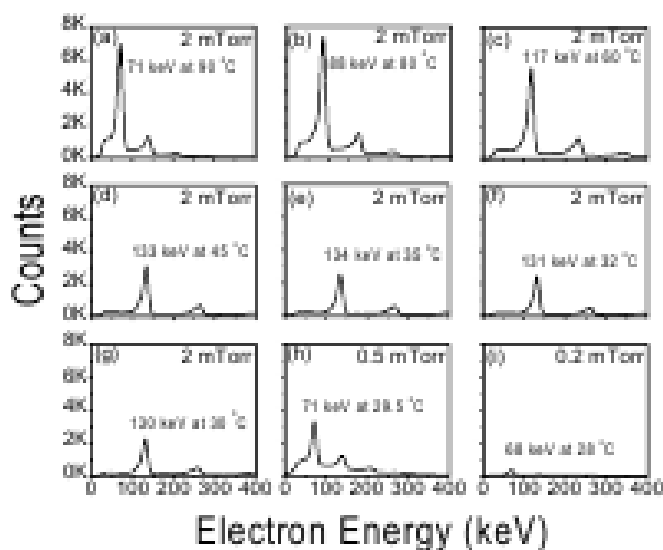


Рисунок 4. Спектры электронов, генерируемых при изменении температуры пироэлектрического кристалла [6]

Также авторы в работе [6] исследовали параметры генерируемого электронного пучка в зависимости от давления и сорта остаточного газа (рисунок 5). Из рисунка явно видно, что с увеличением давления энергия электронов увеличивается до некоторого максимального значения («эффект газового усиления»).

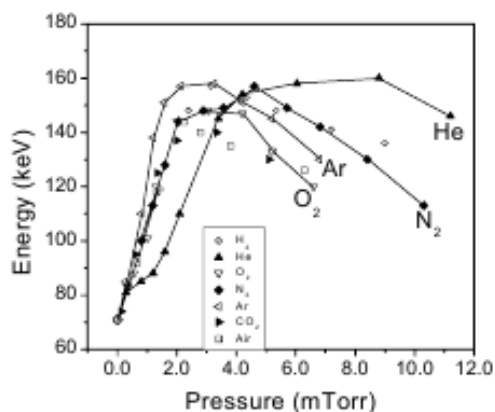


Рисунок 5. Зависимость энергии генерируемого электронного пучка в зависимости от давления и сорта остаточного газа

Дальнейшие исследования, представленные в работе [7], выявили интересный эффект возникновения кратных по энергии пиков электронов с энергией  $2E$ ,  $3E$ , вплоть до  $8E$  (Рис 6).

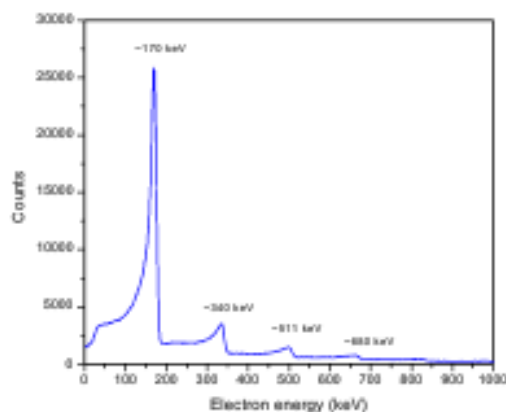


Рисунок 6. Спектр электронов с кратными пиками, генерируемый при изменении температуры пироэлектрического кристалла ниобата лития. [7]

Другой значительный результат, представленный в работе [7] – доказательство возможности генерации пучка положительных ионов при изменении температуры кристалла. Спектр ионов был зафиксирован, когда на поверхности кристалла индуцировался положительный заряд, что исключает возможность генерации электронов. Согласно утверждению авторов, были зарегистрированы ионы азота – основного компонента воздуха. Полученный спектр ионов представлен на рисунке 7.

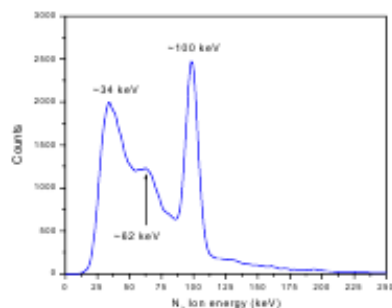


Рисунок 7. Спектр положительно заряженных ионов [7]

Таким образом, пироэлектрические кристаллы могут также служить источниками положительных ионов, электронов, рентгеновского излучения с

энергией порядка десятков килоэлектронвольт. Дж. Браунридж ввел понятие пироэлектрического ускорителя – устройства, основанного на пироэлектрическом эффекте в кристаллах и предназначенного для генерации ускоренных сфокусированных пучков положительных ионов и электронов, а также для последующей генерации рентгеновского излучения.

Усилия Дж. Браунриджа были также направлены на исследования особенностей генерации заряда на поверхности кристалла при различных вариантах заземления пироэлектрического кристалла [8], на поведение пироэлектрических кристаллов вблизи нижней точки Кюри с точки зрения генерации поляризационного заряда на поверхности кристалла [9].

Дальнейшее усовершенствование и исследование работы пироэлектрических ускорителей позволило наблюдать флуоресценцию характеристических линий тяжелых элементов, таких как висмут или свинец и увеличить спектр генерируемого рентгеновского излучения до 100 кэВ [10] (рисунок 8).

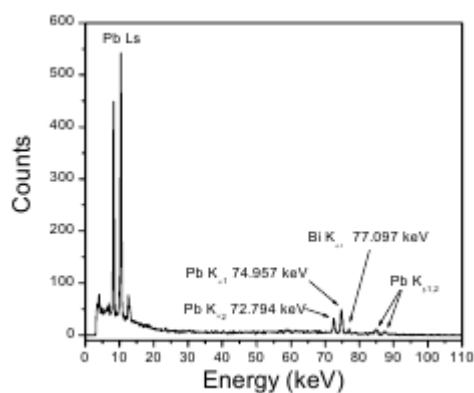


Рисунок 8. Спектр рентгеновского излучения, полученный с помощью пироэлектрического источника. [10]

Общий обзор всех исследований группы Дж. Браунриджа представлен в работе [11], которая была опубликована в 2005 году. В этой работе также был представлен новый интересный результат генерации самофокусирующегося электронного пучка в направлении к кристаллу. Данный факт был экспериментально доказан путем нанесения на сам кристалл

сцинтилляционного порошка и наблюдения сфокусированного пятна, когда поверхность кристалла была заряжена положительно (рисунок 9).

За период с 1992 по 2005 год, благодаря усилиям этой группы, был пройден путь от открытия весьма интересного и необычного пути генерации рентгеновского излучения, затем электронов и ионов, до разработки концепции устройства пирозлектрического ускорителя для прикладных приложений.

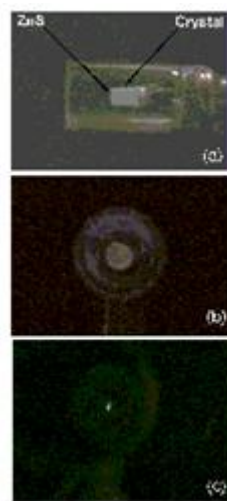


Рисунок 9. Фотография сфокусированного электронного пучка на поверхности кристалла, покрытой сцинтилляционным порошком

## Глава 2. Исследование пьезоэлектрического эффекта в условиях вакуума при различной скорости изменения температуры пьезоэлектрического кристалла.

### 2.1 Описание экспериментальной части

На базе международной научно-образовательной лаборатории радиационной физики был создан стенд для проведения исследования пьезоэлектрического эффекта в условиях вакуума (рисунок 10).



Рисунок 10. Общий вид экспериментальной установки для проведения испытания пьезоэлектрического материала в условиях вакуума

Для достижения поставленной цели необходимо контролировать скорость изменения температуры. Специально для поставленной задачи компанией ООО «Марафон» был разработан блок-контроллер температуры (представлен на рисунке 11).



Рисунок 11. Блок контроля скорости изменения температуры

Технически прибор позволяет изменять температуру с точностью до  $1^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ . В условиях поставленной задачи необходимо изменять температуру в промежутке от 4 до  $24^{\circ}\text{C}$  с шагом  $2^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ . При помощи управляющей программы можно фиксировать зависимость изменения температуры в соответствии с заданной скоростью от времени цикла нагрев-охлаждение. На рисунке 12 и 13 представлены скриншоты управляющей программы.

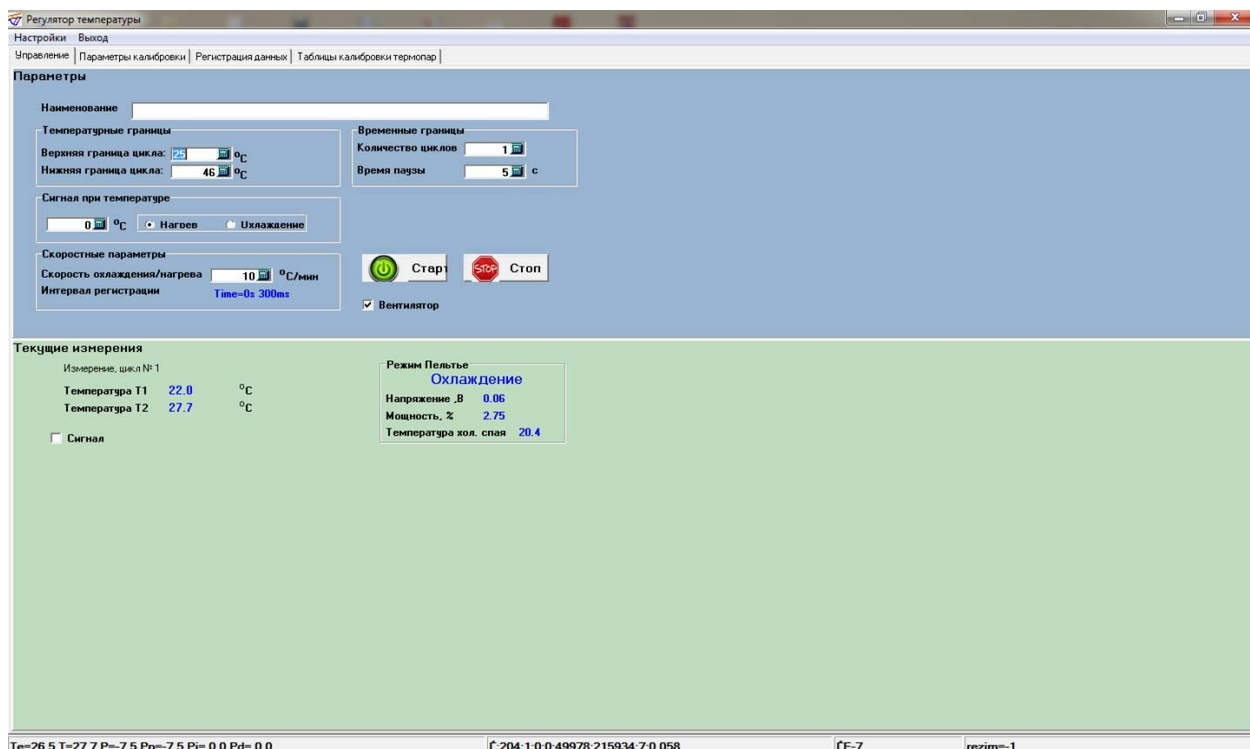


Рисунок 12. Заглавный интерфейс управляющей программы терморегулятора

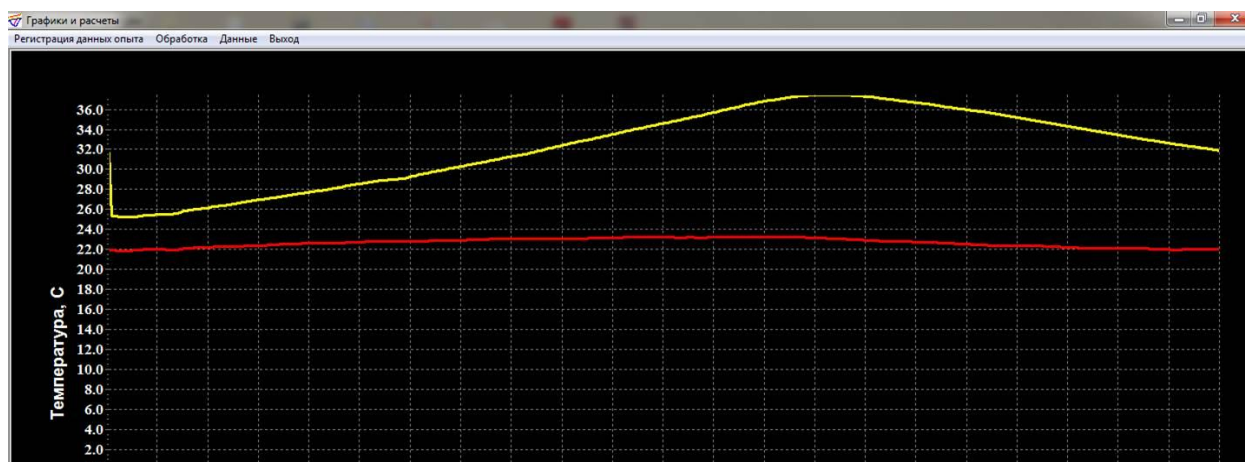


Рисунок 13. График зависимости скорости изменения температуры от времени (числа отсчётов)

Красная линия на рисунке 13 соответствует комнатной температуре, жёлтая линия – показания подключённой термопары К-типа.

Для осуществления цикла нагрев-охлаждение используется элемент Пельтье (рисунок 14). При помощи терморегулятора производится контроль



подаваемого напряжения на нагревательный элемент, что позволяет с заданной скоростью изменять температуру кристалла. При пропускании через элемент Пельтье электрического тока с одной стороны он будет нагреваться, а с противоположной – охлаждаться. Если изменить полярность подачи напряжения, то «горячая» и «холодная» сторона элемента поменяются местами.



Рисунок 14. Внешний вид полупроводникового нагревательного элемента  
Пельтье

Важной частью выполнения эксперимента является система позиционирования пироэлектрического кристалла внутри вакуумной камеры. Чертеж системы позиционирования кристалла представлен на рисунке 15.

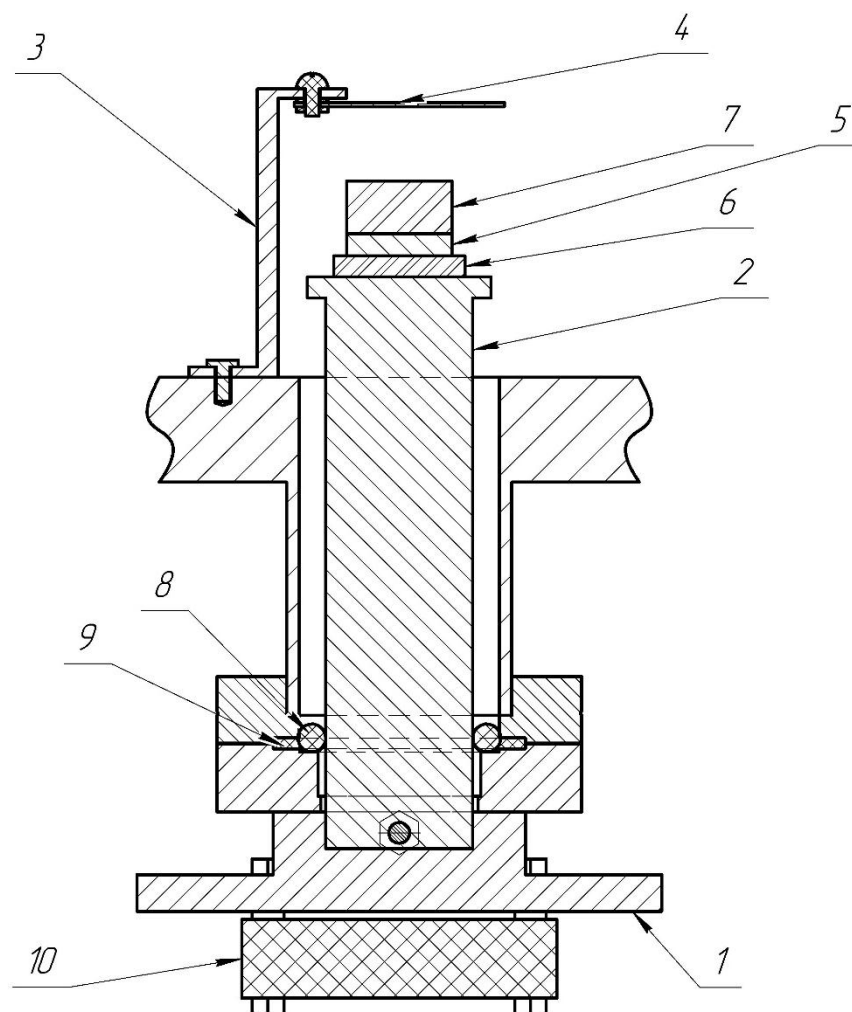


Рисунок 15. Система позиционирования пьезоэлектрического кристалла  
внутри вакуумной камеры

Кристалл танталата лития  $\text{LiTaO}_3$  (7) приклеивается к элементу Пельтье (6) при помощи серебряного токопроводящего клея (SPI Conductive Silver Paint). Между элементом Пельтье и танталатом лития располагается проводящая подложка в виде 50 микронной алюминиевой фольги (5). Вся эта конструкция при помощи того же клея крепится к теплопроводу из дюралюминия Д16Т (2). Теплопровод через фланец стандарта CF-40 на резиновом уплотнении (8, 9) выводится из камеры, где к нему болтами крепится дюралюминиевая шайба, выступающая в роли теплоотвода (1). К шайбе крепится дополнительный теплоотвод – стандартный вентилятор для ПК, работающий от источника питания 12 В (10).

На расстоянии 12 мм от кристалла размещается мишень из меди (4) на дюралюминиевом креплении (3). В крепежной конструкции просверлены отверстия таким образом, чтобы расстояние от мишени до кристалла можно было варьировать. В проводимом эксперименте расстояние 12 мм от кристалла до мишени оптимально и было определено ранее экспериментально [12].

На рисунке 16 представлена общая схема эксперимента

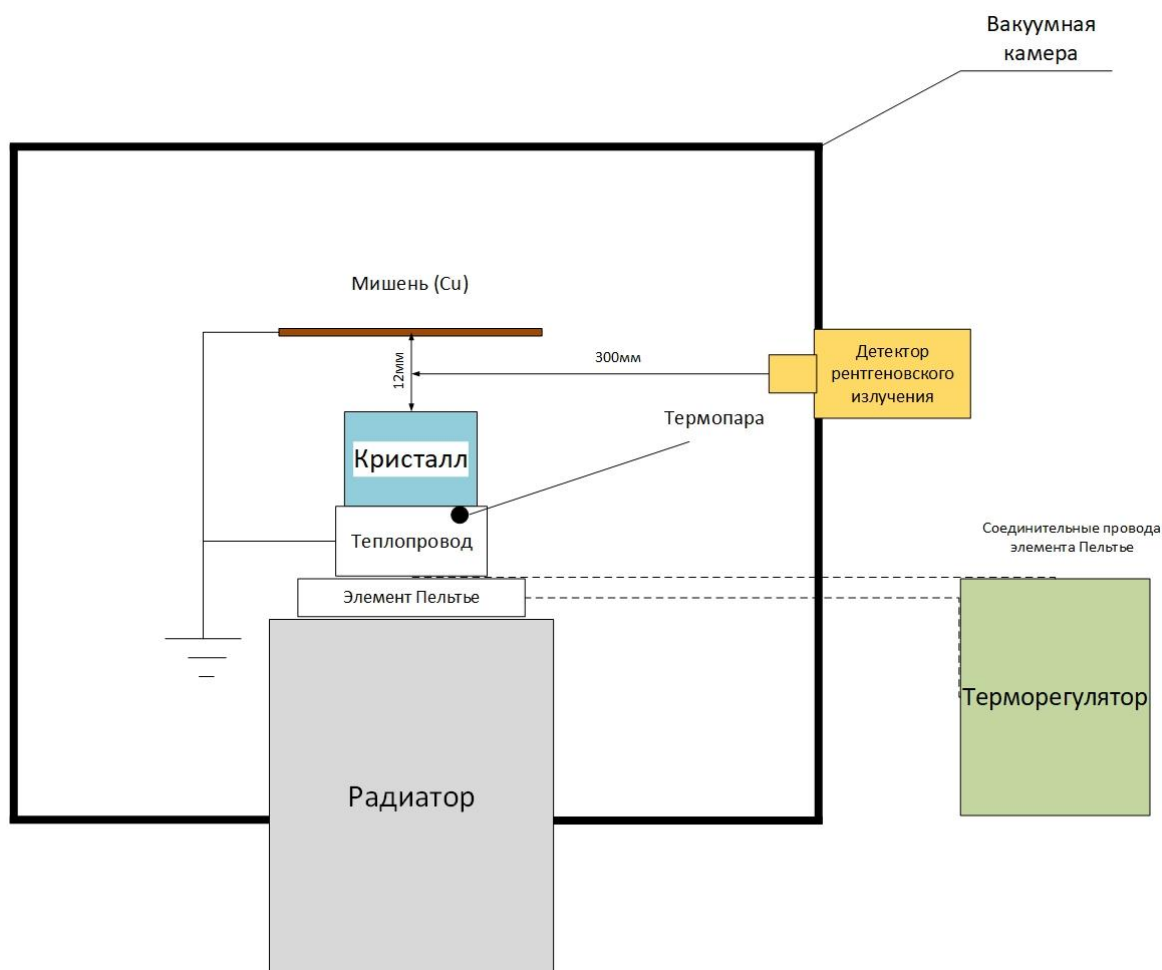


Рисунок 16. Общая схема эксперимента по исследованию пирозлектрического эффекта в условиях вакуума

При помощи терморегулятора задаётся скорость изменения температуры пирозлектрического кристалла, но так как любой прибор имеет погрешность, скорость изменения будет отлична от заданной. Также «рабочие» поверхности элемента Пельтье сделаны из керамики, поэтому они имеют собственный коэффициент теплопроводности и между кристаллом и

элементом Пельтье располагается теплопровод в виде фольги с ненулевым коэффициентом теплопроводности, поэтому мы будем регистрировать изменение температуры, отличающееся от заданной терморегулятором.

## 2.2 Результаты эксперимента

Был проведен ряд экспериментов, направленных на исследование пирозлектрического эффекта в условиях вакуума при различной скорости изменения температуры пирозлектрического кристалла. В нашем эксперименте использовался кристалл  $\text{LiTaO}_3$  при давлении остаточного газа внутри камеры порядка 1 мторр. Измерения производились с различными скоростями изменения температуры от 4 до  $24^\circ\text{C}/\text{мин}$  с шагом  $2^\circ\text{C}/\text{мин}$ . Ниже на рисунках 17 - 38 представлены спектры РИ кристалла танталата лития при различных скоростях изменения температуры с соответствующими графиками изменения температуры.

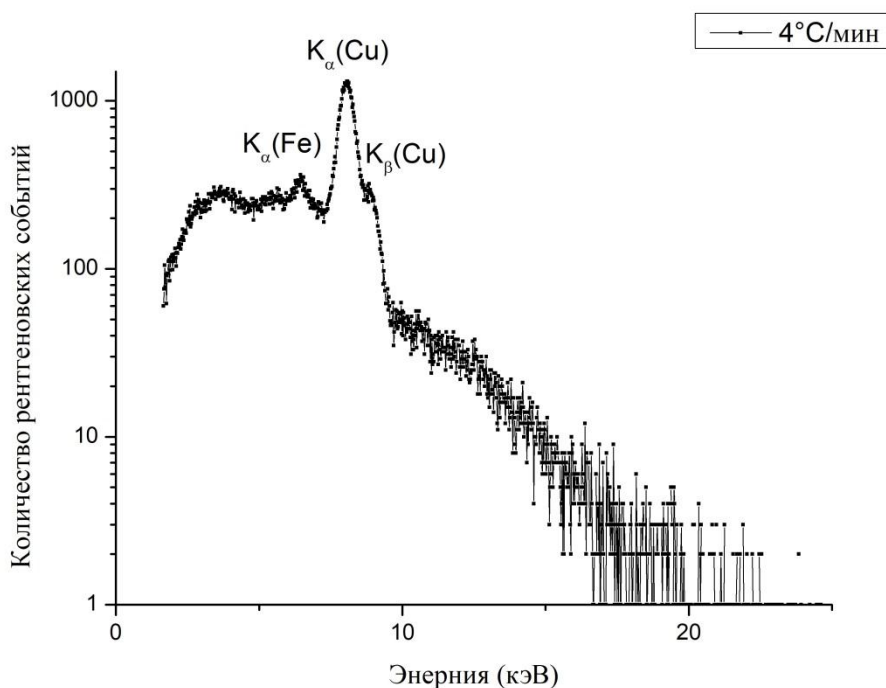


Рисунок 17. Спектр РИ танталата лития при скорости изменения температуры  $4^\circ\text{C}/\text{мин}$

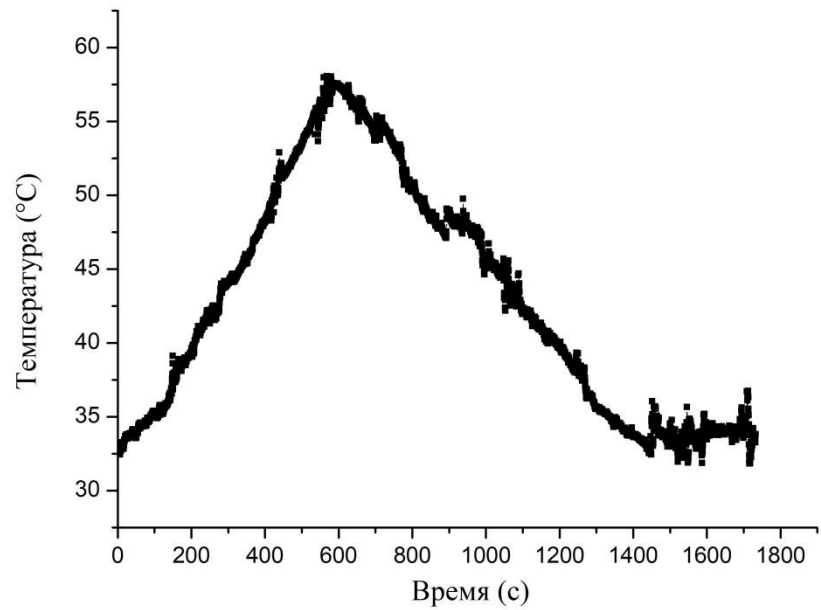


Рисунок 18. График изменения температуры соответствующий скорости  $4\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$

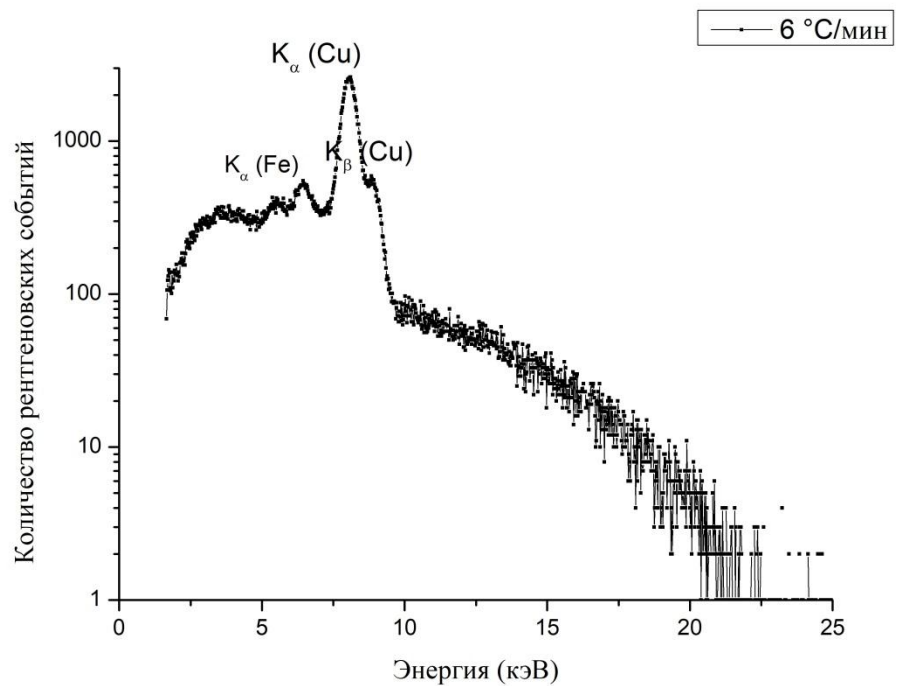


Рисунок 19. Спектр РИ танталата лития при скорости изменения температуры  $6\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$

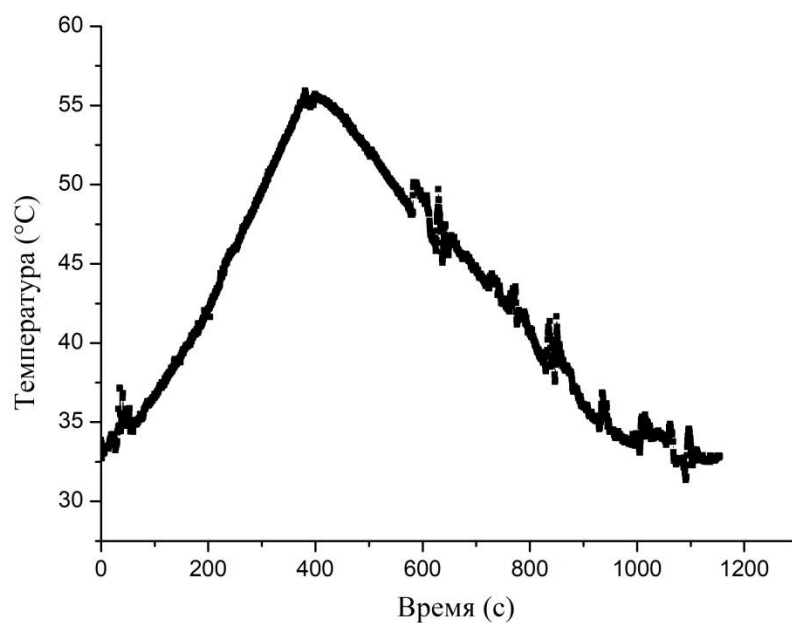


Рисунок 20. График изменения температуры соответствующий скорости  $6\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$

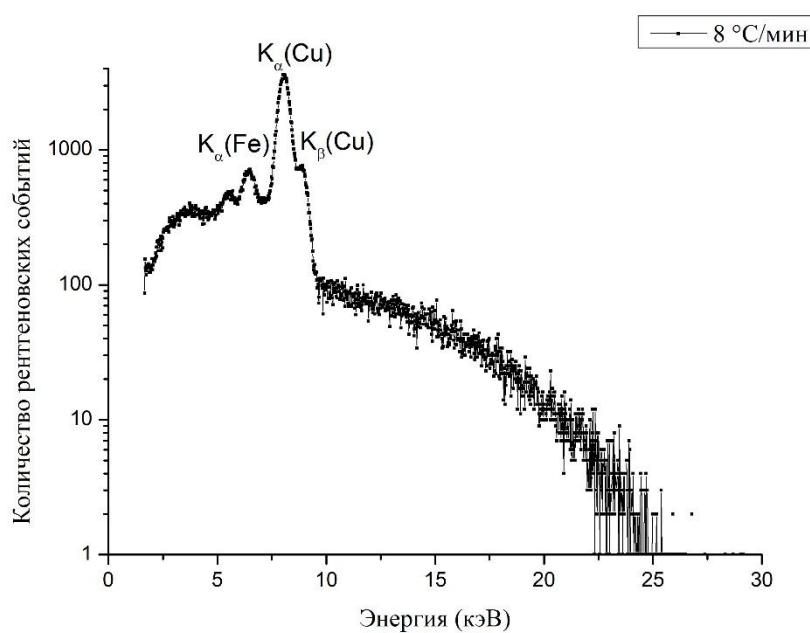


Рисунок 21. Спектр РИ танталата лития при скорости изменения температуры  $8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$

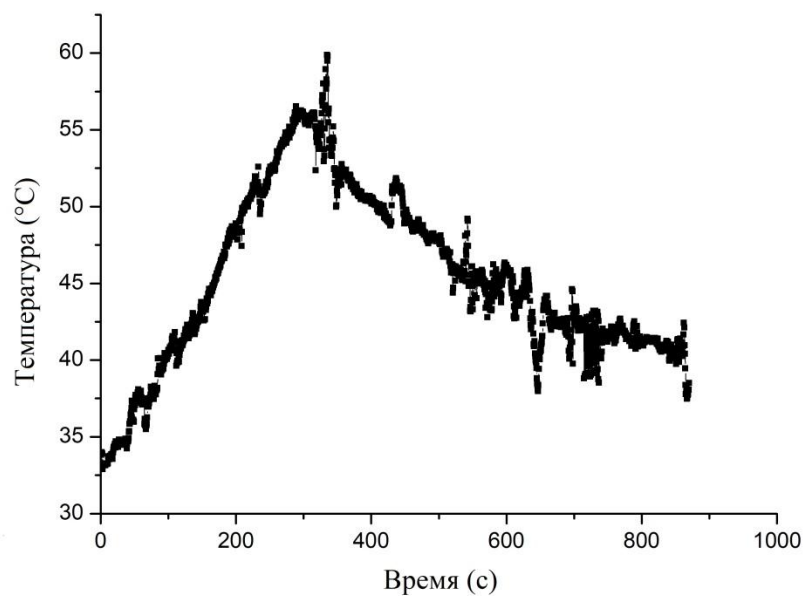


Рисунок 22. График изменения температуры соответствующий скорости  $8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$

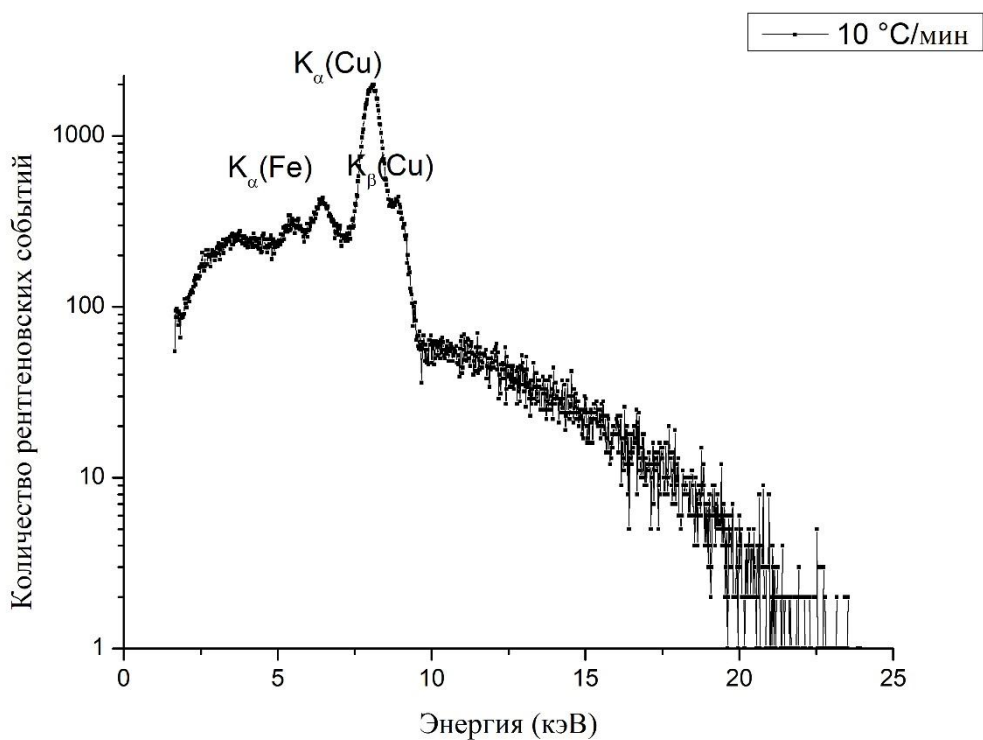


Рисунок 23. Спектр РИ танталата лития при скорости изменения температуры  $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$

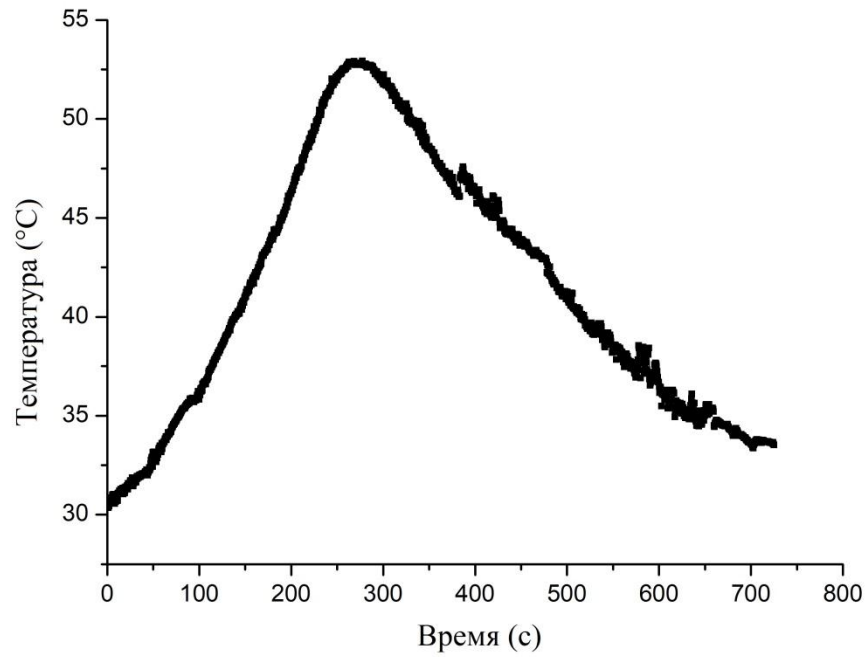


Рисунок 24. График изменения температуры соответствующий скорости  $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$

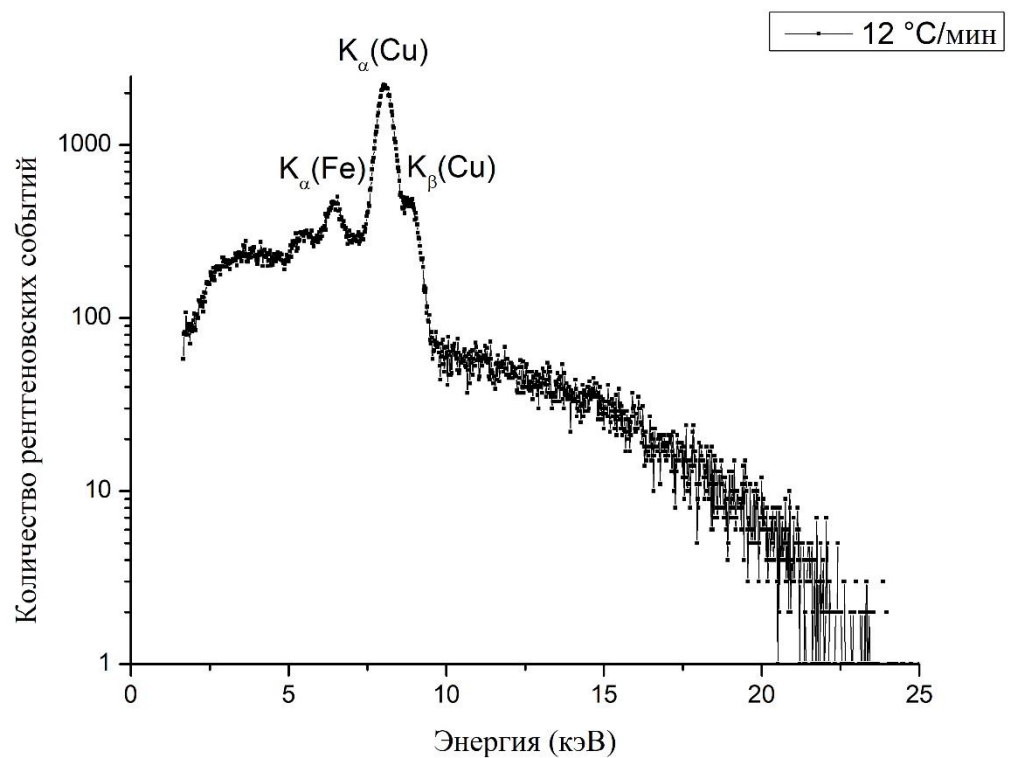


Рисунок 25. Спектр РИ танталата лития при скорости изменения температуры  $12\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$



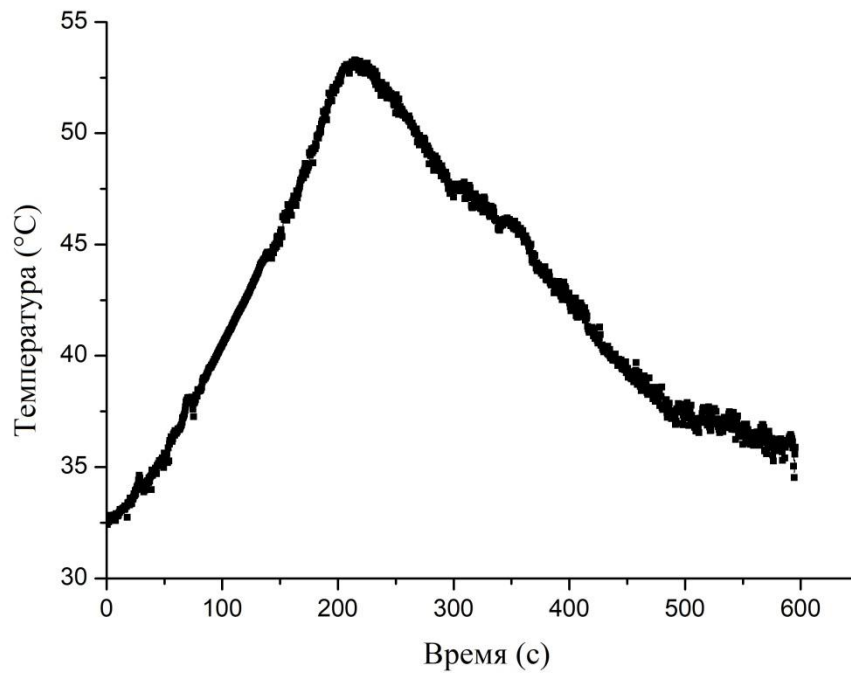


Рисунок 26. График изменения температуры соответствующий скорости  
12 °C/мин

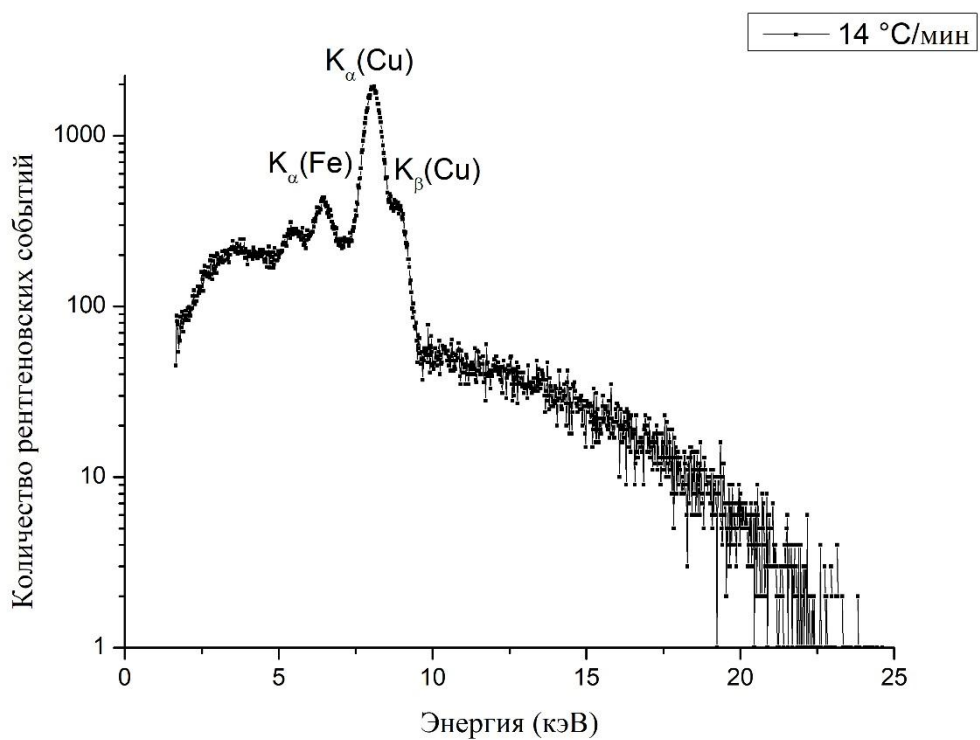


Рисунок 27. Спектр РИ танталата лития при скорости  
изменения температуры 14 °C/мин

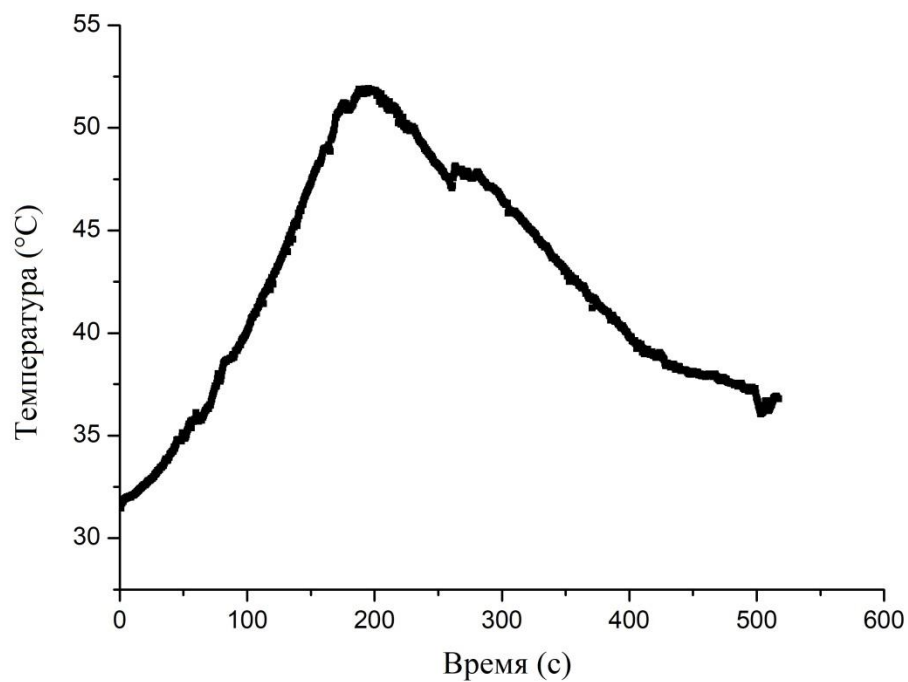


Рисунок 28. График изменения температуры соответствующий скорости  
14 °C/мин

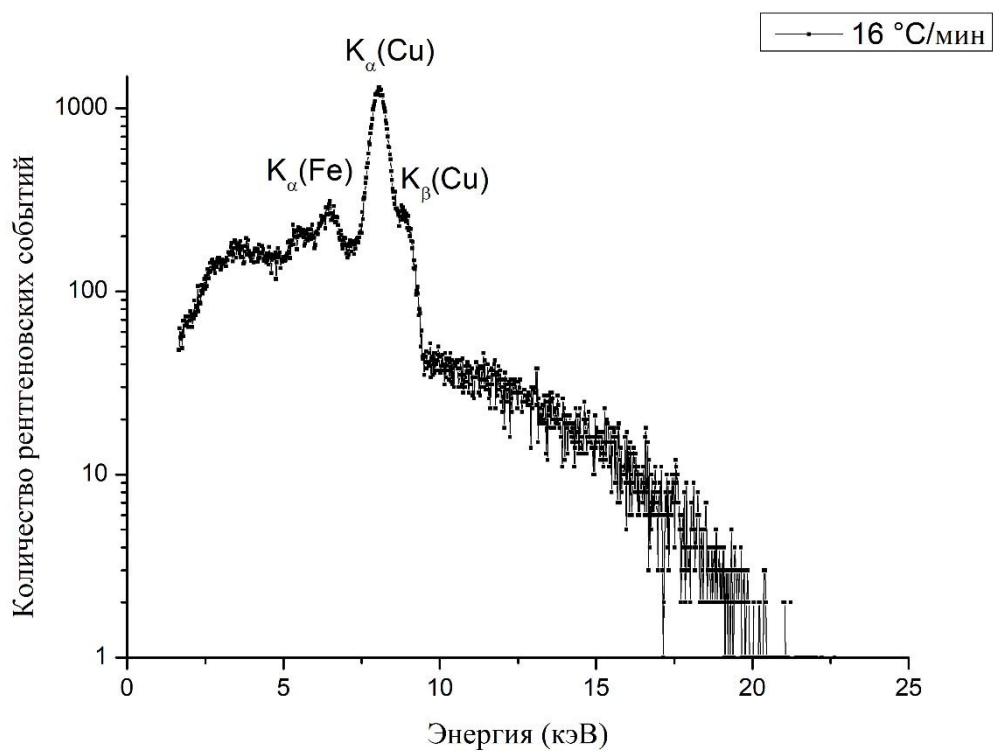


Рисунок 29. Спектр РИ танталата лития при скорости  
изменения температуры 16 °C/мин

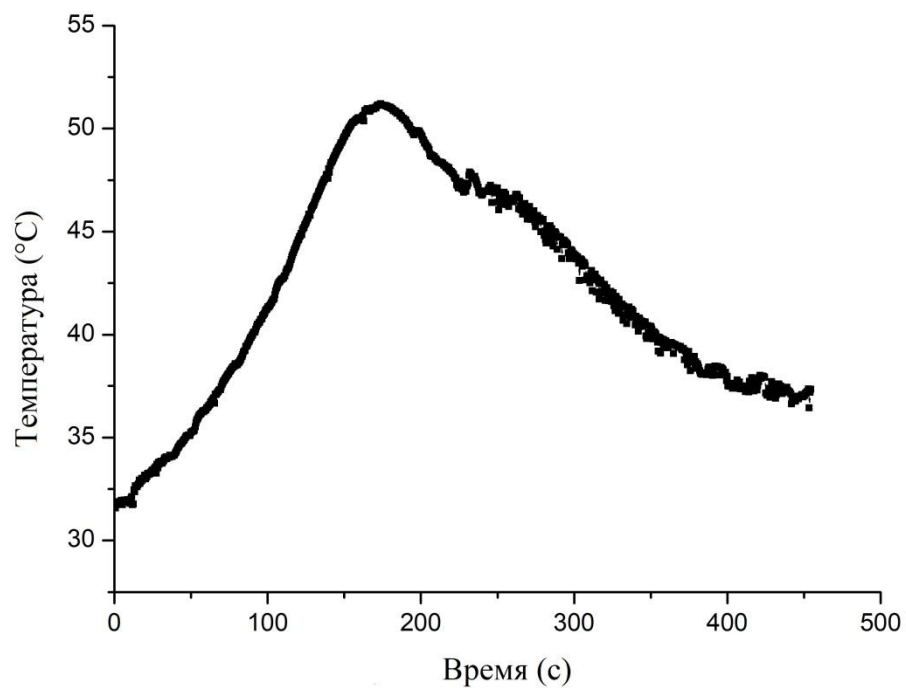


Рисунок 30. График изменения температуры соответствующий скорости  
16 °C/мин

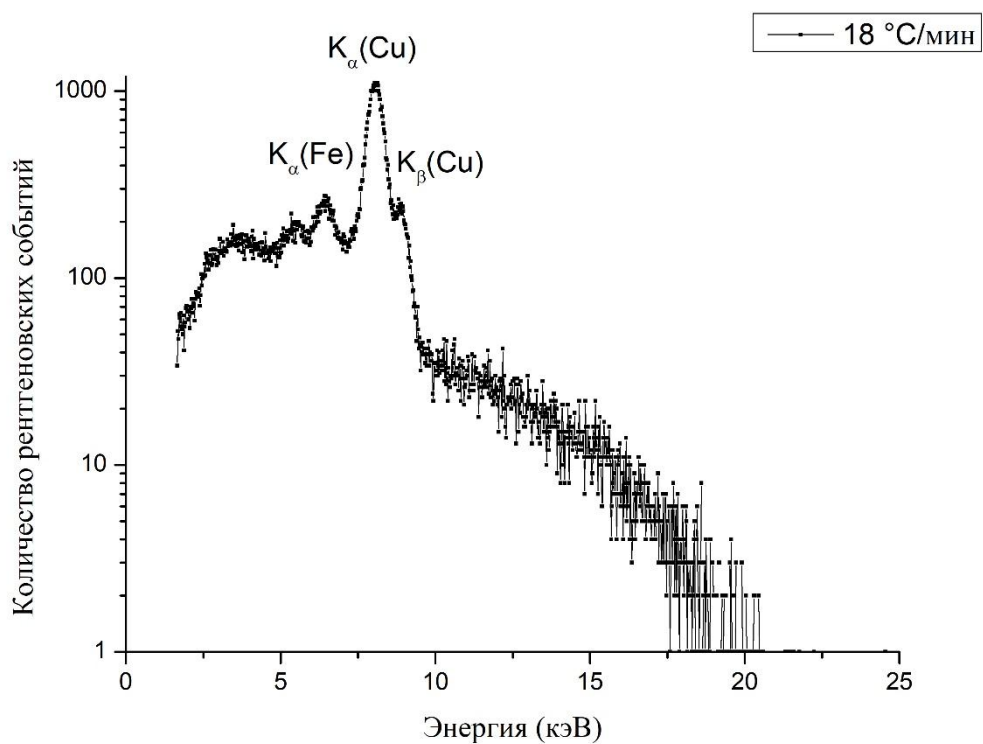


Рисунок 31. Спектр РИ танталата лития при скорости  
изменения температуры 18 °C/мин

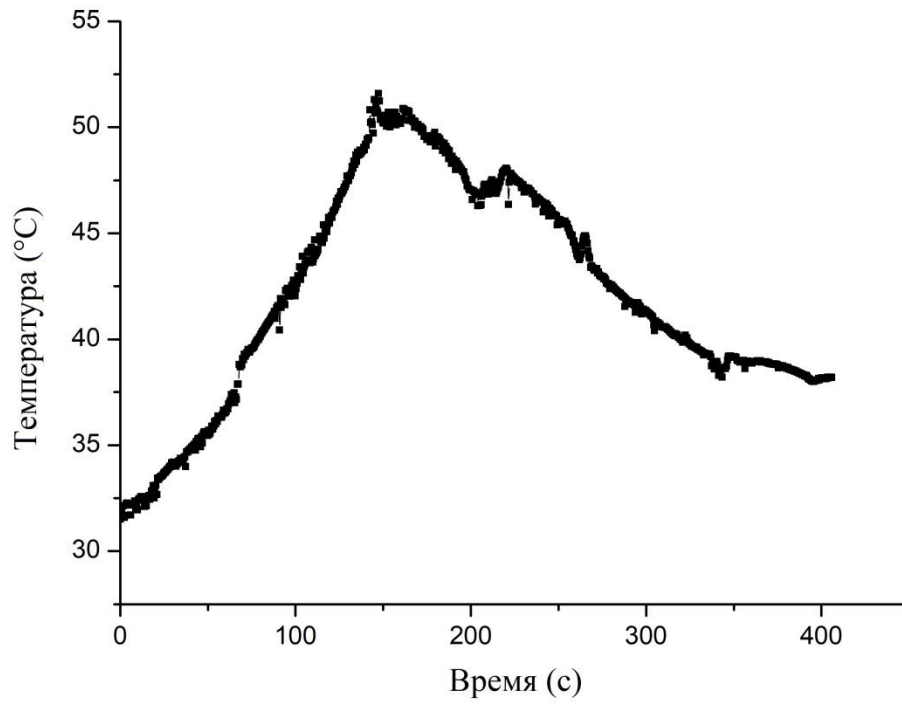


Рисунок 32. График изменения температуры соответствующий скорости  $18\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$

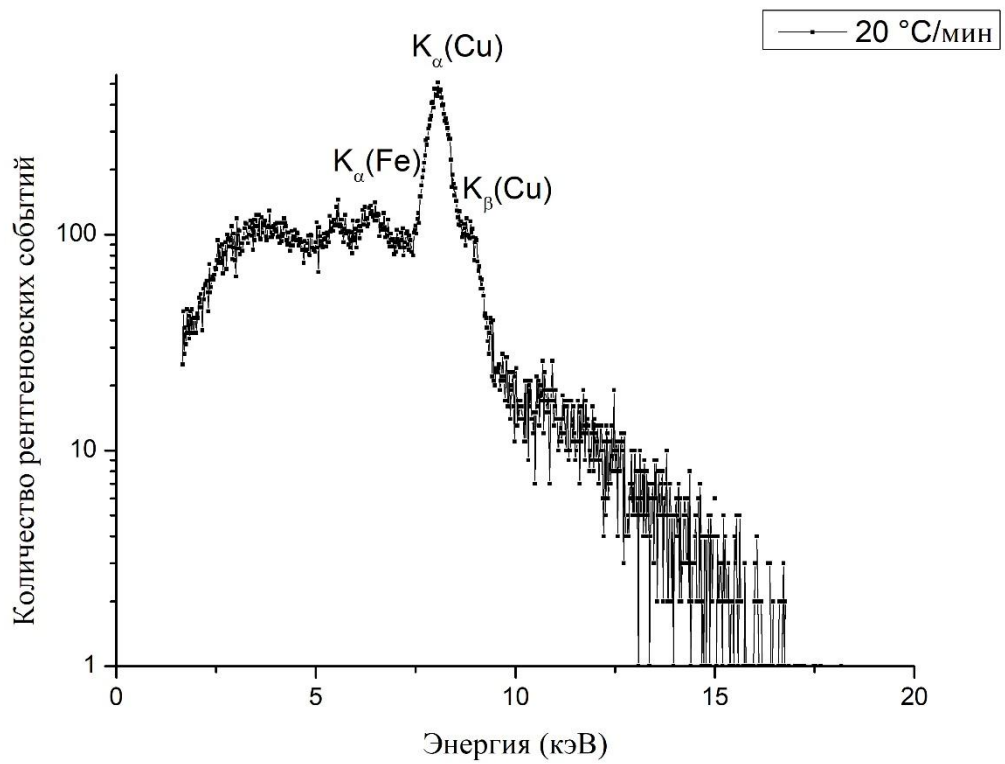


Рисунок 33. Спектр РИ танталата лития при скорости изменения температуры  $20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$

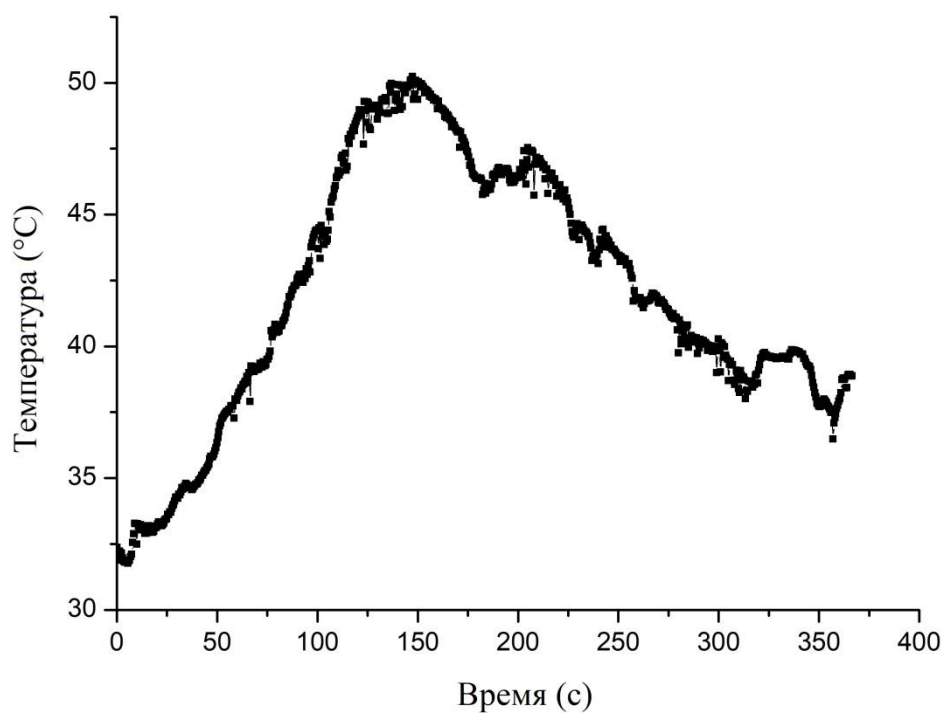


Рисунок 34. График изменения температуры соответствующий скорости 20 °С/мин

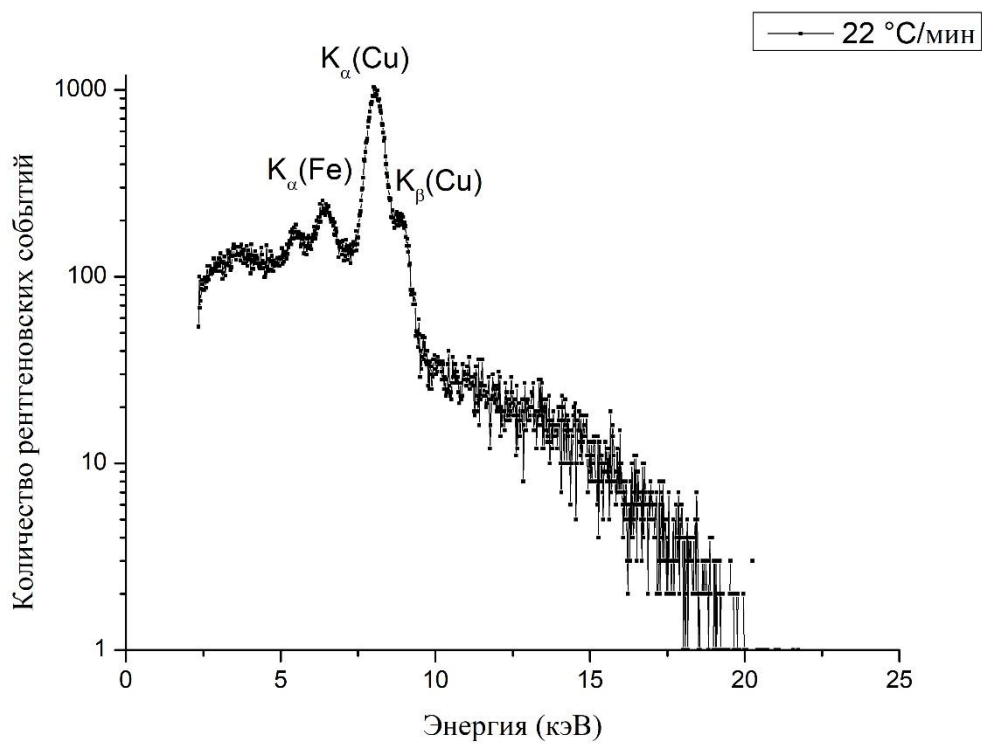


Рисунок 35. Спектр РИ танталата лития при скорости изменения температуры 22 °С/мин

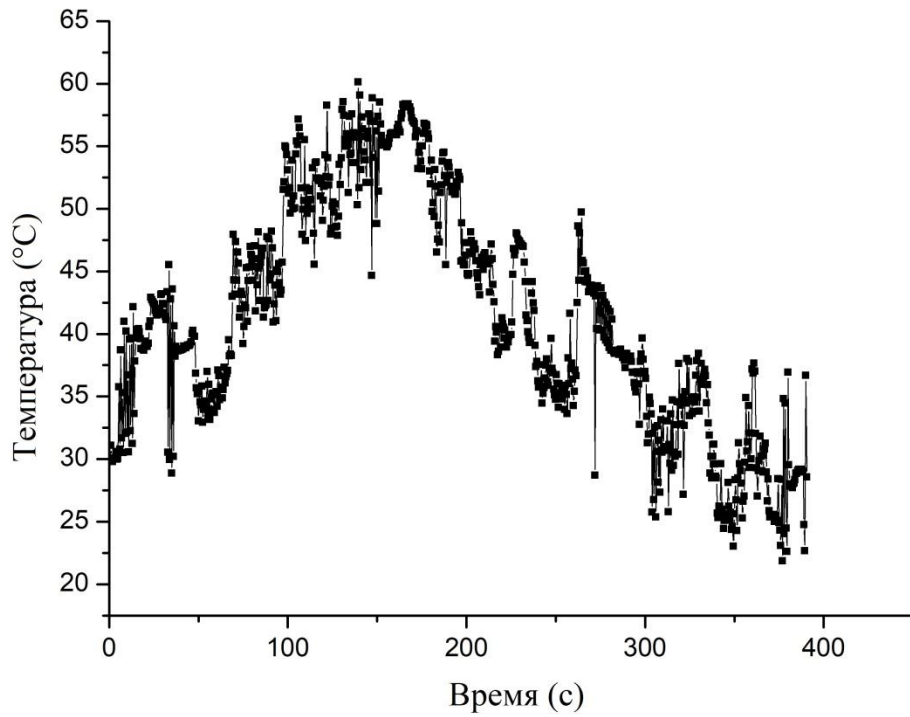


Рисунок 36. График изменения температуры соответствующий скорости  $22\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$

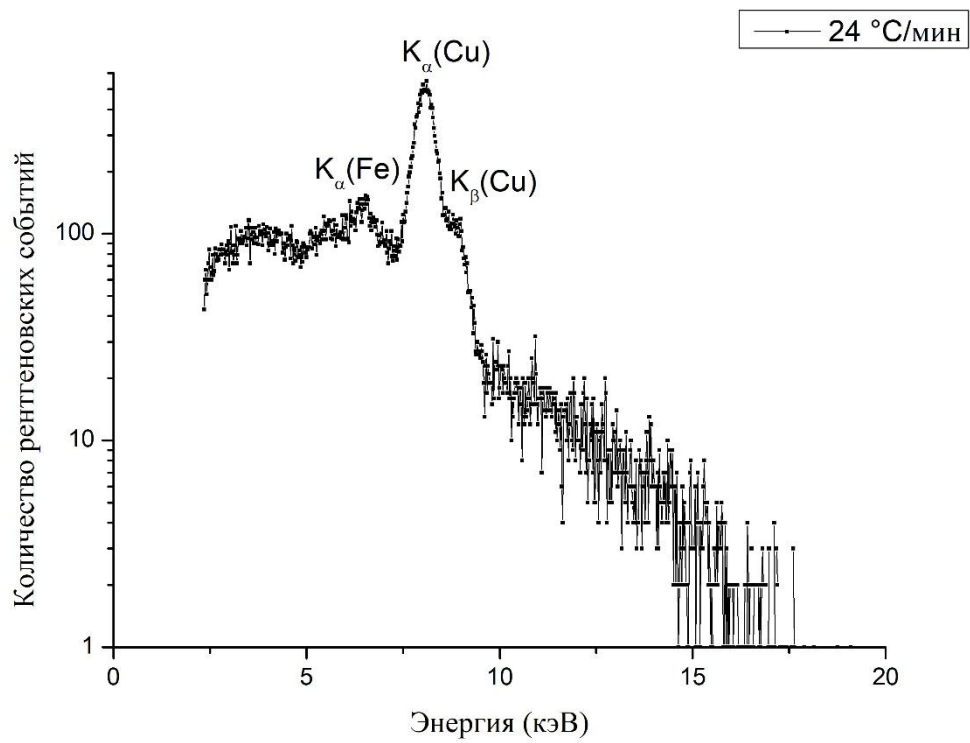


Рисунок 37. Спектр РИ танталата лития при скорости изменения температуры  $24\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$

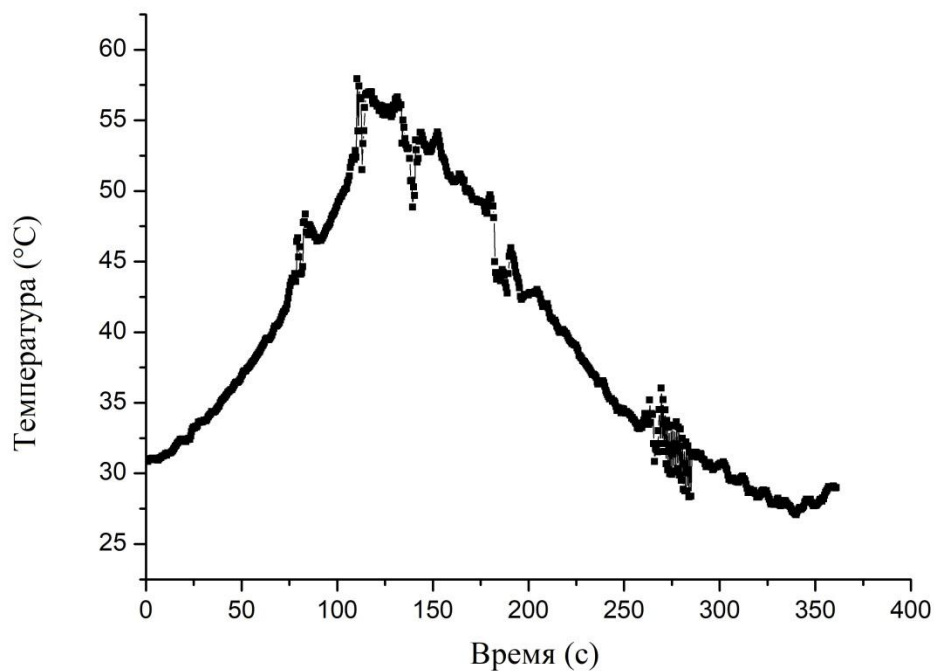


Рисунок 38. График изменения температуры соответствующий скорости  $24\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$

Из рисунков 19 и 21 видно, что при номинальной скорости изменения температуры,  $6$  и  $8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$  соответственно, наблюдается наиболее интенсивный выход РИ с максимальной энергией порядка  $30\text{ кэВ}$  за цикл.

На рисунке 39 представлено зависимость общего количества квантов рентгеновского излучения от скорости изменения температуры кристалла.

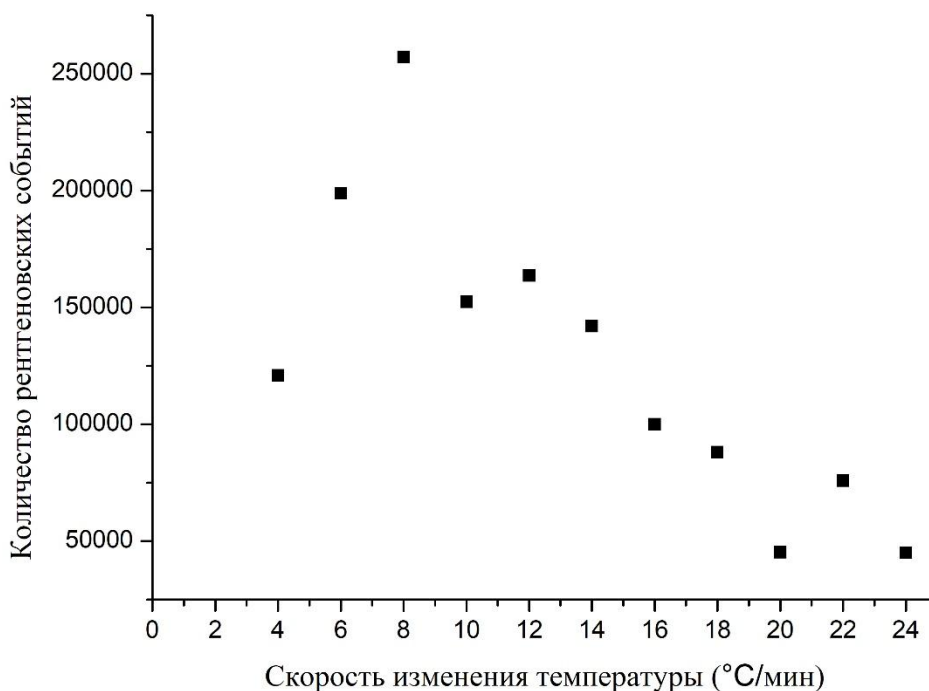


Рисунок 39. Зависимость общего количества квантов рентгеновского излучения от скорости изменения температуры кристалла

Как видно из рисунка 39 в области 6-8 °C/мин мы наблюдаем резкий максимум рентгеновских событий. Для точного определения нахождения максимума необходимо провести исследование в области изменения температуры 6, 7, 8 °C/мин. На рисунках 40 – 42 представлены спектры РИ кристалла танталата лития, полученных при скоростях изменения температуры 6, 7 и 8 °C/мин соответственно.



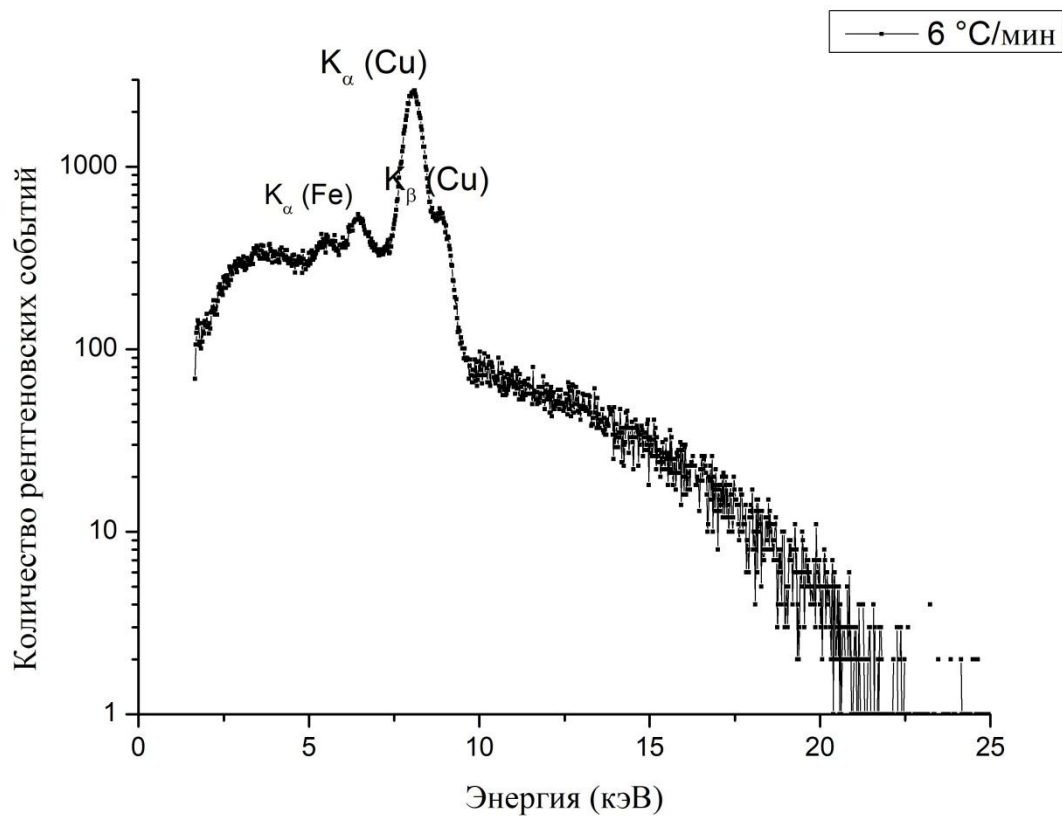


Рисунок 40. Спектр РИ танталата лития при скорости изменения температуры 6 °C/мин

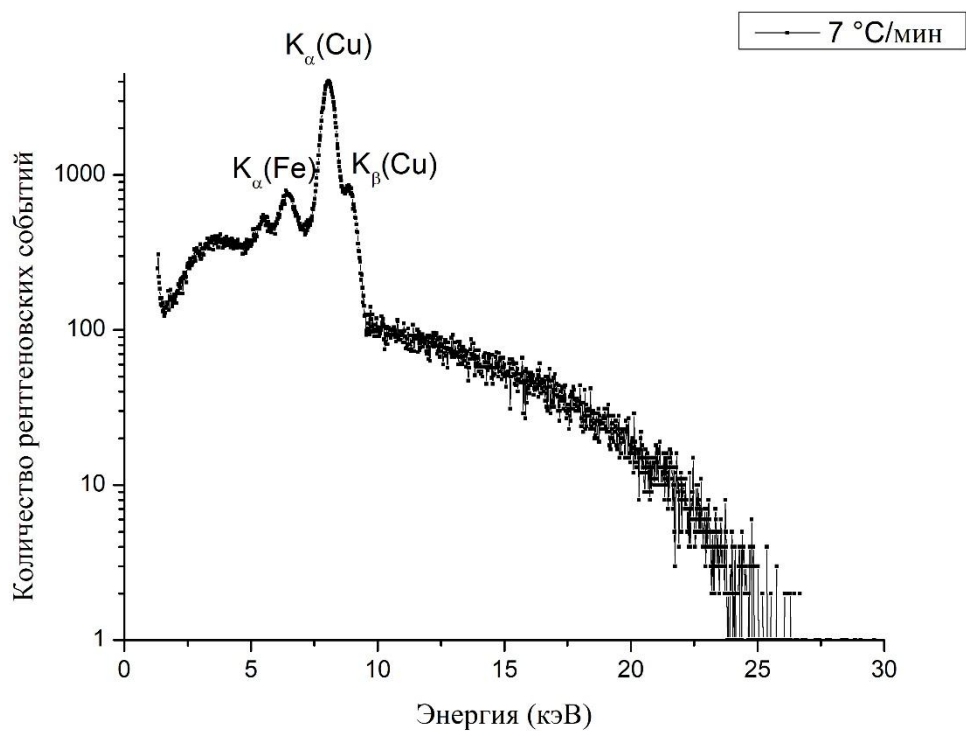


Рисунок 41. Спектр РИ танталата лития при скорости изменения температуры 7 °С/мин

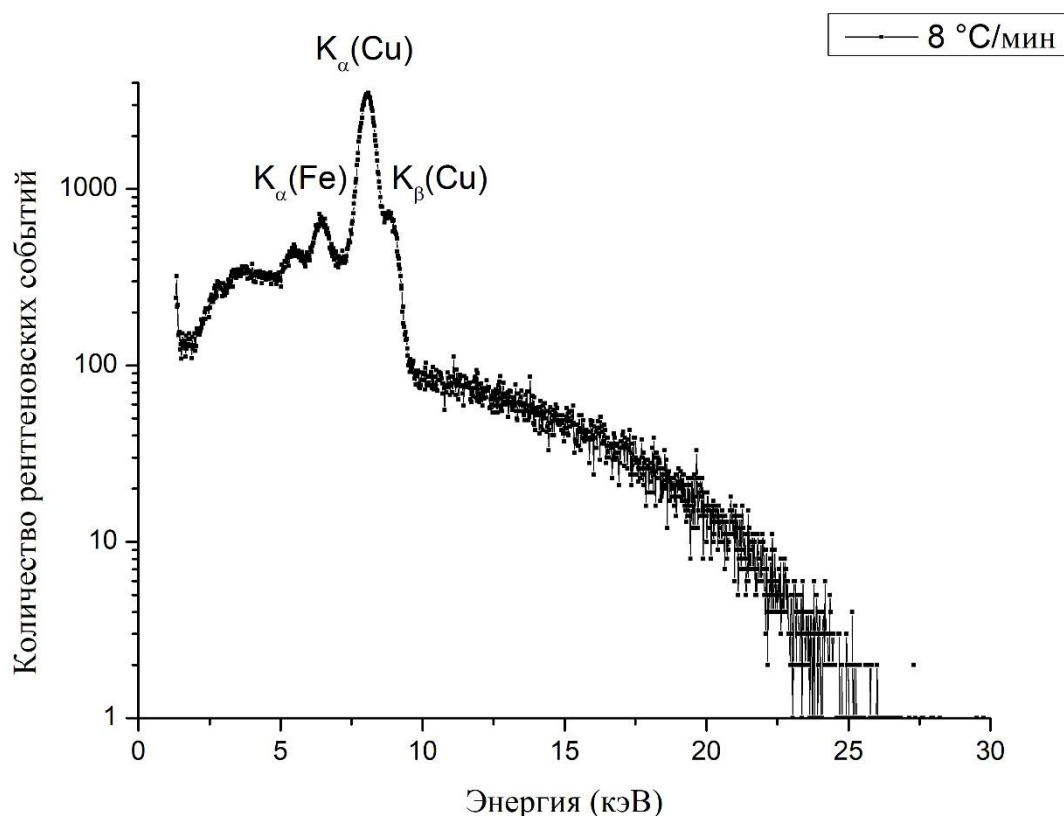


Рисунок 42. Спектр РИ танталата лития при скорости изменения температуры 8 °С/мин

При скорости изменения температуры 7 °С/мин было зарегистрировано  $1.6 \cdot 10^9$  фот/с рентгеновских событий в полный телесный угол против  $1.1 \cdot 10^9$  фот/с и  $1.4 \cdot 10^9$  фот/с при 6 и 8 °С/мин соответственно. Следовательно, оптимальной скоростью изменения температуры пироэлектрического кристалла является 7-8 °С/мин. Полученный автором ВКР результат был опубликован в статье «Optimal speed of temperature change of a crystal in a pyroelectric X-ray radiation source» [13].

## **Заключение**

В ходе выполнения ВКР была проделана следующая работа:

- разработан и собран стенд для испытания пьезоэлектрических кристаллов в условиях вакуума, включающий в себя откачную систему, вакуумную камеру, систему позиционирования пьезоэлектрических кристаллов, блок-контроллер изменения температуры, спектрометрическую систему;
- выполнено экспериментальное исследование интенсивности и спектра рентгеновского излучения, возникающего в следствие наличия пьезоэлектрического эффекта. Данное излучение генерируется в кристалле или мишени в зависимости от направления изменения температуры в пьезоэлектрике: нагрев или охлаждение;

По результатам экспериментальных исследований была определена оптимальная скорость изменения температуры пьезоэлектрического кристалла танталата лития в цикле нагрев-охлаждение равная 7-8 °С/мин, при которой наблюдалась максимальная интенсивность РИ  $1.4 - 1.6 \cdot 10^9$  фот/с с энергией фотонов до 25 кэВ. Данный результат был опубликован в статье «Optimal speed of temperature change of a crystal in a pyroelectric X-ray radiation source».

## Список используемой литературы

- [1]. **Brownridge J. D., Pyroelectric x-ray generator.** / J. D. Brownridge, Nature. – 1992. – № 358. - С. 277-278.
- [2]. **Brownridge J. D., Investigations of pyroelectric generation of X-rays.** / J.D. Brownridge, S. Raboy, J. Appl. Phys. – 1999. – № 86. – С. 640
- [3]. **Brownridge J. D., Observation of multiple nearly monoenergetic electron production by heated pyroelectric crystals in ambient gas.** / J. D. Brownridge, S. M. Shafroth, D. Trott, B. Stoner, W. Hooke, Appl. Phys. Lett. – 2001. - № 78. – С. 1158
- [4]. **Rosenman G., Electron emission from ferroelectrics.** / G Rosenman, D. Shur, Ya. E. Krasik, A. Dunaevsky, J. Appl. Phys. – 2000. - № 88. – С. 6109
- [5]. **Brownridge J. D., Self-Focused Electron Beams Produced by Pyroelectric Crystals on Heating or Cooling in Dilute Gases.** / J.D. Brownridge, S. M. Shafroth. – 1999. <https://arxiv.org/ftp/physics/papers/0107/0107019.pdf>
- [6]. **Brownridge J. D., Pressure Dependence of Energetic ( $\leq 160$  keV) Focused Electron Beams Arising from Heated or Cooled ( $\text{LiNbO}_3$ ) Pyroelectric Crystals.** / J.D. Brownridge, S.M. Shafroth. – 2001. <https://arxiv.org/ftp/physics/papers/0303/0303040.pdf>
- [7]. **Brownridge J. D., Electron Beam Production by Pyroelectric Crystals.** // J.D. Brownridge, S.M. Shafroth. – 2000. <https://arxiv.org/ftp/physics/papers/0209/0209079.pdf>
- [8]. **Brownridge J. D., Pyroelectric Response in  $\text{LiNbO}_3$  and  $\text{LiTaO}_3$  to temperature changes** / J.D. Brownridge, S. Raboy. – 2000. <https://arxiv.org/ftp/physics/papers/0107/0107046.pdf>
- [9]. **Brownridge J. D., Saturation of Spontaneous Polarization Charge in Pyroelectric Crystals of  $\text{LiNbO}_3$ ,  $\text{LiTaO}_3$  and  $\text{CsNO}_3$  at Low Temperature above 4.2 K** / J.D. Brownridge, S. Raboy. – 2001. <https://arxiv.org/ftp/cond-mat/papers/0205/0205189.pdf>

[10]. **Brownridge J. D., X-ray fluoresced high-Z (up to  $Z = 82$ ) K-x-rays produced by  $\text{LiNbO}_3$  and  $\text{LiTaO}_3$  pyroelectric crystal electron accelerators. / J.D. Brownridge, S.M. Shafroth. – 2001.**

<https://arxiv.org/ftp/physics/papers/0311/0311090.pdf>

[11]. **Brownridge J. D., Electron and Positive Ion Beams and X-Rays produced by heated and cooled Pyroelectric Crystals such  $\text{LiNbO}_3$  and  $\text{LiTaO}_3$  in dilute Gases: Phenomenology and Applications / J.D. Brownridge, S.M. Shafroth. – 2005. - Trends in Electro-Optics Research. - Nova Science Publishers, Inc. – C. 57.**

[12]. **Ivashchuk O.O., Investigation of the Yield of X-Ray Radiation from Pyroelectric Sources with Cone-Shaped Targets / O.O. Ivashchuk, A.S. Kubankin, A.N. Oleinik, A.V. Shchagin. – 2016. - Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. - № 8. - C.70.**

[13]. **Kubankin A.S., Optimal speed of temperature change of a crystal in a pyroelectric X-ray radiation source / A. S. Kubankin, A. S. Chepurnov, O. O. Ivashchuk, V. Yu. Ionidi, I. A. Kishin, A. A. Klenin, A. N. Oleinik, and A. V. Shchagin. – AIP ADVANCES 8, 035207 (2018).**