

**1.3.[01.04.00] ИЛМҲОИ ФИЗИКА**  
**1.3.[01.04.00] ФИЗИЧЕСКИЕ НАУКИ**  
**1.3.[01.04.00] PHYSICAL SCIENCES**

1.3.8.[01.04.07] ФИЗИКАИ ҲОЛАТҲОИ КОНДЕНСӢ  
1.3.8.[01.04.07] ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ  
1.3.8.[01.04.07] CONDENSED MATTER PHYSICS

**УДК 530.1**

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛА  $Pr_3Sb_5O_{12}$**  *Каюмзода Абдумалик Каюм, к.физ.-матем. наук, доцент кафедры методики преподавания физики ГОУ «ХГУ им. акад. Б.Гафурова» (Таджикистан, Худжанд)*

**КОРКАРД ВА ТАҲҚИҚИ РЕЗОНАТОРИ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИ ДАР АСОСИ КРИСТАЛЛИ  $Pr_3Sb_5O_{12}$**  *Каюмзода Абдумалик Каюм, н.и.физ.-мат., дотсенти кафедраи методикаи таълими физикаи МДТ «ДДХ ба номи акад. Б.Гафуров» (Тоҷикистон, Хучанд)*

**DEVELOPMENT AND RESEARCH OF A PIEZOELECTRIC RESONATOR BASED ON A SINGLE CRYSTAL  $Pr_3Sb_5O_{12}$**  *Kayumzoda Abdumalik Kayum, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Physics Teaching Methodology, SEI «KhSU named after acad. B.Gafurov, (Khujand, Tajikistan) E-mail: abdumalik-kosta68@mail.ru*

**Ключевые слова:** пьезоэлектрический резонатор, добротность, резонанс, проводимость.

В данной работе разработан и исследован пьезоэлектрический резонатор на основе пьезоэлектрического кристалла антимонит празеодима ( $Pr_3Sb_5O_{12}$ ). На основе анализа частотных характеристик проводимости пьезоэлектрического резонатора установлено, что последовательный контур при подключении к нему источника переменного напряжения является полосно-пропускающим фильтром.

**Калидвожаҳо:** резонатори пьезоэлектри, паҳноӣ, резонанс, гузаронандагӣ.

Дар мақола коркард ва таҳқиқи резонатори пьезоэлектри дар асоси кристалли антимонит празеодим ( $Pr_3Sb_5O_{12}$ ) оварда шудааст. Дар асоси таҳлили басомади тавсифи гузаронандагии резонатори пьезоэлектри муқаррар карда шуд, ки контури пайдарпай ҳангоми пайваст намудани манбаи шиддати тағйирёбанда ба он, дар натиҷа вай ҷолоиши гузаронандагӣ мегардад.

**Keywords:** piezoelectric resonator, Q-factor, resonance, conductivity.

In this work, a piezoelectric resonator based on the piezoelectric crystal praseodymium antimonite ( $Pr_3Sb_5O_{12}$ ) has been developed and studied. Based on the analysis of the frequency characteristics of the conductivity of a piezoelectric resonator, is established that the serial circuit, when an alternating voltage source is connected to it, is a band-pass filter.

В настоящее время пьезоэлектрические резонаторы, фильтры, генераторы и датчики на объемных акустических волнах разрабатываются и изготавливаются на основе применения различных монокристаллов кварца ( $SiO_2$ ), танталата лития ( $LiTaO_3$ ), ниобата лития ( $LiNbO_3$ ) и т.п.

Принцип работы пьезоэлектрического резонатора полностью основан на пьезоэлектрическом эффекте. Для изготовления пьезоэлементов подходят только монокристаллы с пьезоэлектрическими свойствами. Именно такими свойствами обладает семейство антимонитов, в частности монокристалл  $Pr_3Sb_5O_{12}$ .

Одним из природных минералов, содержащих сурьму, является антимонит. Скальное, крупнейшее месторождение сурьмы содержит более 50% запасов сурьмы в СНГ, а содержание сурьмы в концентрате достигает 60%. По подтвержденным запасам сурьмы Республика Таджикистан, занимает первое место в СНГ и третье в Азии, после Китая и Таиланда [1, с.12-16]. За последние два года в сурьмяном проявлении "Ривути Боло" на территории Горной Матчи были установлены две рудосодержащие зоны. Протяженность площадей составила до 1,5 тыс.

метров, заявил на пресс-конференции начальник Главного управления геологии Таджикистана Илхом Оймухаммадзода (г. Душанбе, 30.01.2024). Оценивая результаты разведочных работ, он отметил, что таджикское месторождение сурьмы может стать одним из крупнейших мировых залежей.

Стоит отметить, что на данный момент Таджикистан является одним из крупнейших поставщиков сурьмы, запасы которой в стране достигают примерно несколько сот тысяч тонн. Ввиду этого изучение соединений семейства антимонитов помимо фундаментальных интересов, имеет прикладное значение и является актуальной.

### **Введение**

В последнее десятилетие на основе оксидов сурьмы, синтезированы новые соединения с лантаноидами [2, с.12-16; 4, с.916-918], в которых обнаружены сегнетоэлектрические и пьезоэлектрические свойства [5, с. 2218-2221; 7, с.86-90]. Одним из таких соединений является антимонит празеодима ( $\text{Pr}_3\text{Sb}_5\text{O}_{12}$ ) - родоначальник целого семейства полярных диэлектриков нового структурного типа  $\text{R}_3\text{Sb}_5\text{O}_{12}$  ( $\text{R} = \text{Gd}, \text{Pr}, \text{Nd}, \text{Er}$ ).

Важным свойством кристаллов, позволяющим определить возможность их практического применения в радио- и акустической электронике, являются их электромеханические параметры (упругие, пьезоэлектрические и диэлектрические), а также их зависимость от внешних факторов и качества кристалла. Требования к параметрам пьезокристаллов во многом зависят от конкретного практического применения. Это приводит к необходимости разработки методов оперативного выбора и контроля качества. 1. Одним из важнейших электромеханических параметров пьезокристаллов, определяющих их качество, является коэффициент акустической добротности. В связи с этим в данной статье рассматривается о возможности изготовления пьезорезонатора на основе монокристалла  $\text{Pr}_3\text{Sb}_5\text{O}_{12}$  и затем его исследования. Когда к таким кристаллам прикладывается напряжение, эти кристаллы деформируются сами по себе. Это было почти незаметно невооруженным глазом. Этот эффект называется пьезоэлектрическим эффектом, а вещество - пьезоэлектриком.

### **Материал и технология изготовления пьезорезонаторов.**

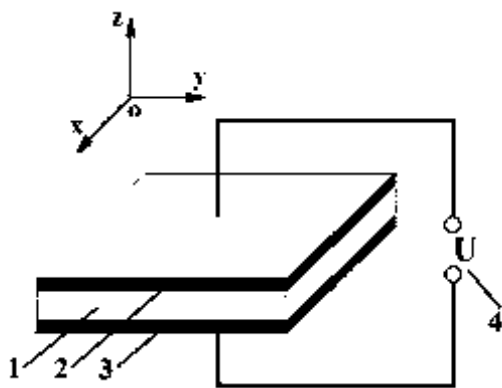
Нами были исследованы нового семейства пьезокристаллов антимонит празеодима  $\text{Pr}_3\text{Sb}_5\text{O}_{12}$ . Эти кристаллы были получены гидротермальным методом в лаборатории рентгеноструктурного анализа ФТИ им. С.У.Умарова АН Республики Таджикистан под руководством Курбанова Х.М. [2, с. 12-16; 4, с.916-918]. Исследуемый образец представлял собой параллелепипед размером  $3 \times 4 \times 6$  мм, прозрачный в видимой области спектра, насыщенный зеленым цветом. Образец не содержал никаких микроскопических дефектов или включений.

Пьезоэлектрический резонатор (ПР) был изготовлен в сотрудничестве с покойным Валерием Борисовичем Грузиненко, доктором технических наук, профессором, членом-корреспондентом Академии инженерных наук Российской Федерации в ОАО «Пьезо» (г. Москва) [8, с.167-168].

Основным элементом ПР является пьезоэлектрический элемент, для его изготовления берутся кристалл  $\text{Pr}_3\text{Sb}_5\text{O}_{12}$  и из него под определённым углом вырезаются пластинка. После резки пластину шлифуют до толщины 0,160 мм микропорошком М10. Затем проводится химическое травление и полировка пластины. Далее пластины маркируют относительно кристаллографического направления с помощью поляризационного микроскопа. После этого на обе стороны пластины наносят возбуждающий электрод диаметром 3,0 мм, ориентированный в кристаллографическом направлении, путем напыления металлизированного слоя серебра толщиной 0,2 мкм. Для подавления нежелательных внешних вибраций готовый ПР помещают в герметичный корпус.

### **Результаты и их обсуждение.**

Схема ПР показана на рис.1, которая содержит пьезоэлемент 1 в виде прямоугольной пластины, вырезанной из антимонит празеодима  $\text{Pr}_3\text{Sb}_5\text{O}_{12}$  с размещенными на его больших гранях электродами 2 и 3 и снабжены источником переменного напряжения 4, выход которого подключен к электроду. Общая толщина слоев преобразователя (1-3) составляет около 1 микрона.



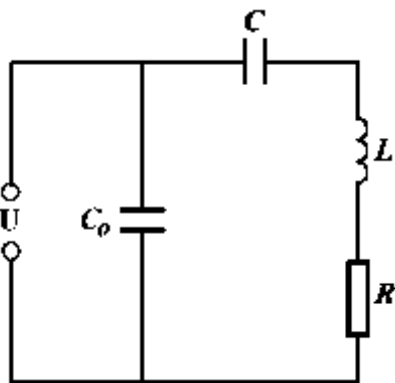
**Рис. 1.** Схема пьезорезонатора:  
1- пьезоэлемент, 2,3 – электроды, 4 – источник переменного напряжения

Для повышения точности воспроизведения регулировочных характеристик ПР, пластина была вырезана таким образом, чтобы нормали большой плоскости пластины были параллельны кристаллографической оси Z, а боковые стороны параллельны кристаллографическим осям X и Y (см. рис.1).

ПР - это электромеханическая колебательная система. Как известно, колебательные системы имеют свои собственные резонансные частоты. ПР изготовленный на основе  $\text{Pr}_3\text{Sb}_5\text{O}_{12}$  также имеет свою собственную номинальную резонансную частоту.

Когда к пластине  $\text{Pr}_3\text{Sb}_5\text{O}_{12}$  прикладывается переменное напряжение, соответствующее резонансной частоте самой пластины  $\text{Pr}_3\text{Sb}_5\text{O}_{12}$ , возникает частотный резонанс и амплитуда колебаний резко возрастает. Во время резонанса электрическое сопротивление резонатора уменьшается. В результате получается эквивалент последовательной колебательной системы. Поскольку потери энергии ПР очень малы, он фактически представляет собой электрический колебательный контур с очень большой добротностью. Определение добротности ПР связано с тем, что в области резонанса она заменяется эквивалентной электрической схемой, которая показана на рис. 2.

ПР в резонансной области описывается эквивалентной электрической схемой, показанной на рис. 2.



**Рис. 2.** Эквивалентная электрическая схема пьезорезонатора

Здесь  $C_0 = 100 \text{ нФ}$  - емкость между электродами пьезоэлемента. Последовательно соединённые индуктивность  $L = 10 \text{ мГн}$ , конденсатор  $C = 10 \text{ нФ}$  и активное сопротивление  $R = 20 \text{ Ом}$  отражают электромеханические свойства пластинки антимонит празеодима.

Рисунок 2 достоверно характеризует поведение ПР в наиболее типичных случаях, когда влиянием других резонансов, индуктивностью и сопротивлением потерям на входе, а также емкостью между электродом и корпусом пьезоэлемента вблизи рассматриваемого резонанса можно пренебречь.

Как видно из рис. 2, наблюдается два колебательные контура: последовательный RLC и параллельный  $RLCC_0$ . Это приводит к тому, что эта электрическая схема имеет 2 типа резонанса: механический резонанс  $f_p$  или  $\omega_p = 2\pi f_p$  (последовательный колебательный контур) и электромеханический (параллельный колебательный контур). Поскольку проводимость последовательного колебательного контура на частоте механического резонанса максимальна, проводимость параллельного колебательного контура на резонансной частоте минимальна, мы используем только последовательное соединение. Частота параллельного резонанса, при которой значение полной проводимости резонатора без потерь равно нулю, не используется

для расчета добротности пьезокристалла.

Частота последовательного резонанса ПР определяется следующим уравнением:

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 581400 \text{ Гц} \quad (1)$$

Добротность ПР является эквивалентной электрической схемой на рис. 2 и может быть выражена через эквивалентные электрические параметры:

$$Q = \frac{1}{2\pi f_p CR} = 1380 \quad (2)$$

Кроме того, измерение добротности чаще всего осуществляется по частотным характеристикам проводимости пьезорезонатора. В современных измерительных приборах, построенных с использованием цифровых технологий, эти характеристики определяются в дискретных точках.

Зависимость активной составляющей проводимости ПР от частоты  $G(f)$  описывается уравнением [9]:

$$G(f) = \frac{1}{\sqrt{R^2 + \left(2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC}\right)^2}} \quad (3)$$

График этой зависимости рассчитан в MathCADe в широком спектре частот от 0 до  $10^6$  Гц, включая резонансную частоту ( $f_p$ ) ПР, и показан на рис. 3. Параметры R, L и C, показанные на рисунке 2, были использованы для вычисления уравнения (1-3).

Во многих случаях проводимость ПР в цепи переменного тока плавно изменяется в широком диапазоне частот и линейно увеличивается с увеличением частоты, в зависимости от последней, то есть линейно зависимости от последнего, то есть емкостной.

Как показано на рисунке 3, обычная емкостная природа проводимости разрушается на некоторых частотах, и ее свойства меняются в момент резкого увеличения проводимости, за которым следует ее резкое падение, то есть максимальная проводимость – она становится активной.

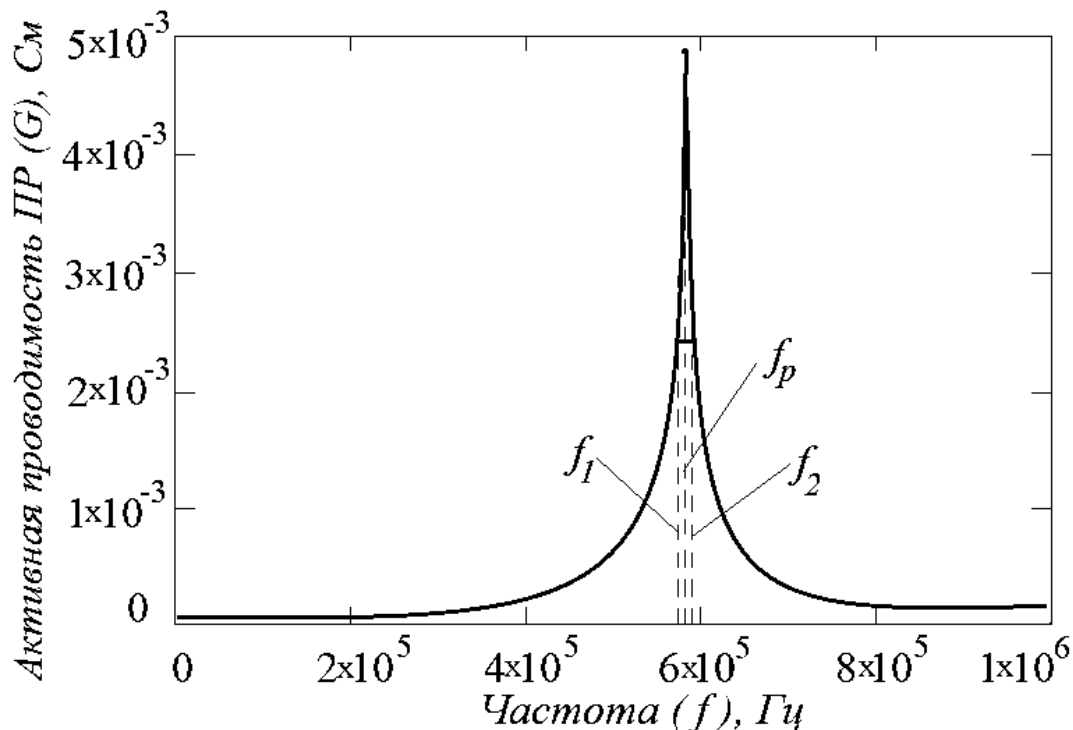


Рис. 3. Зависимость активной составляющей проводимости ПР ( $G$ ) от частоты ( $f$ )

Наиболее точным определением добротности на основе измеренной зависимости является определение ширины резонансной кривой на уровне 0,5 и вычисление добротности в соответствии с уравнением [9, с. 113-115]:

$$Q = \frac{f_p}{\Delta f} = 1410 \quad (4)$$

Здесь данные  $f_p$  и  $\Delta f = |f_1 - f_2|$  получены из рисунка 3.

Следует отметить, что оптическим методом [10] была измерена добротность этого образца, соответствующая  $Q=1,45 \cdot 10^3$ . Если сравнить эти 3 значения добротности, то можно увидеть, что они отличаются не более чем на 5%.

#### **Заклучение.**

Таким образом, значения добротности, найденные двумя независимыми методами, отличаются на 5% и практически совпадают.

Следует отметить, что анализ частотных характеристик проводимости пьезоэлектрического резонатора показывает, что последовательная схема, к нему подключен источник переменного напряжения, представляет собой полосно-пропускающий фильтр. В частности, входная проводимость последовательной цепи на резонансной частоте максимальна, и в то же время схема имеет чисто активную характеристику сопротивления. Разработанные и протестированные нами пьезоэлектрические резонаторы будут использоваться в будущем в качестве небольших беспроводных электронных устройств на объемных акустических волнах, использующих пьезоэлектрический кристалл  $\text{Pr}_3\text{Sb}_5\text{O}_{12}$  в качестве пьезоэлемента.

#### **ЛИТЕРАТУРА:**

1. Бахтдавлатов, Р.Д. Полезные ископаемые Таджикистана/ Р.Д. Бахтдавлатов // Горный журнал. 2012. № 2.- С 12-16.
2. Курбанов, Х.М. Гидротермальный синтез и физико-химические свойства монокристаллов  $\text{R}_3\text{Sb}_5\text{O}_{12}$  (R – La, Pr, Tb, Yb) со структурой типа  $\text{R}_3\text{Sb}_5\text{O}_{12}$  / Х.М. Курбанов, М.Н. Цейтлин, Р.Ч. Бигурин и др. // Доклады АН РТ. – 1981. – Т. 24, № 8. – С. 494–498.
3. Курбанов, Х.М. Кристаллическая структура антимонита празеодима  $\text{Pr}_3\text{Sb}_5\text{O}_{12}$  / Х.М. Курбанов, Н.Б. Бутикова, А.Г. Гукалова, В.Т. Глякин // Доклады АН СССР. – 1985. – Т.281, №5. – С.1119-1121.
4. Гукалова, А.Г. Структурные исследования антимонитов празеодима и индия / А.Г. Гукалова, В.Т. Глякин, М.Н. Цейтлин // Координационная химия. – 1987. – Т. 13, № 7. – С. 918-921.
5. Орешонков, А.С. Изучение поведения мягкой моды при структурном фазовом переходе в кристалле  $\text{Pr}_3\text{Sb}_5\text{O}_{12}$  методом спектроскопии комбинационного рассеяния света / А.С. Орешонков, А.К. Ходжибаев, А.С. Крылов, М.Ф. Умаров, А.Н. Втюрин // Физика твердого тела. – 2015. – № 11. – С. 2218-2221.
6. Oreshonkov, A.S., Krylov A.S., Vtyurin A.N., Khodzhibaev A.K., Umarov M.F. Raman spectroscopy study of the behavior of the soft mode in a structural phase transition in the  $\text{Pr}_3\text{Sb}_5\text{O}_{12}$  crystal / A.S. Oreshonkov, A.S. Krylov, A.N. Vtyurin, A.K. Khodzhibaev, M.F. Umarov // Physics of the Solid State. 2016. V. 58. № 4. P. 857-860.
7. Hojiboev, A., Raman spectra and structural phase transition in  $\text{Pr}_3\text{Sb}_5\text{O}_{12}$  crystal / A.K. Hojiboev, A.S. Oreshonkov, A.N. Vtyurin, M.F. Umarov // Ferroelectrics. 2015. V. 486. № 1. P. 86-90.
8. Смагин, А.Г. Пьезоэлектричество кварца и кварцевые резонаторы / А.Г. Смагин, М.И. Ярославский // – М., Энергия. – 1970 – 183 с.
9. Пьезоэлектрические резонаторы: Справочник / В.Г. Андросова, Е.Г. Бронникова, А.М. Васильев и др.; Под ред. П.Е. Кандыбы и П.Г. Позднякова. – М.: Радио и связь, 1992. – 392 с.: ил.
10. Рахматова, З.М. Колебательные спектры пьезоэлектрика антимонита празеодима  $\text{Pr}_3\text{Sb}_5\text{O}_{12}$  / З.М. Рахматова, М.Ф. Умаров, А.К. Ходжибаев // Вестн. Таджикского техн. ун-та им. акад. М.С. Осими. 2013. Т. 22. № 2. С. 4-9.

#### **REFERENCES:**

1. Bakhtdavlatov, R.D. Mineral resources of Tajikistan / R.D. Bakhtdavlatov // Mining Journal. 2012. No. 2.- P. 12-16.
2. Kurbanov, Kh.M. Hydrothermal synthesis and physicochemical properties of  $\text{R}_3\text{Sb}_5\text{O}_{12}$  (R – La, Pr, Tb, Yb) single crystals with a structure of the  $\text{R}_3\text{Sb}_5\text{O}_{12}$  type / Kh.M. Kurbanov, M.N. Tseitlin, R.Ch. Bigurin et al. // Reports of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan. – 1981. – Т. 24, No. 8. – P. 494–498.
3. Kurbanov, Kh.M. Crystal structure of praseodymium stibnite  $\text{Pr}_3\text{Sb}_5\text{O}_{12}$  / Kh.M. Kurbanov, N.B.

- Butikova, A.G. Gukalova, V.T. Glyakin // Reports of the USSR Academy of Sciences. – 1985. – Т.281, No. 5. – P.1119-1121.
3. Kurbanov, Kh.M. Crystal structure of praseodymium stibnite  $\text{Pr}_3\text{Sb}_5\text{O}_{12}$  / Kh.M. Kurbanov, N.B. Butikova, A.G. Gukalova, V.T. Glyakin // Reports of the USSR Academy of Sciences. – 1985. – Т.281, No. 5. – P.1119-1121.
  4. Gukalova, A.G. Structural studies of praseodymium and indium stibnites / A.G. Gukalova, V.T. Glyakin, M.N. Tseitlin // Coordination chemistry. – 1987. – Т. 13, No. 7. – P. 918-921.
  5. Oreshonkov, A.S. Studying the behavior of the soft mode during a structural phase transition in the  $\text{Pr}_3\text{Sb}_5\text{O}_{12}$  crystal using Raman spectroscopy / A.S. Oreshonkov, A.K. Khodzhibaev, A.S. Krylov, M.F. Umarov, A.N. Vtyurin // Solid State Physics. – 2015. – No. 11. – P. 2218-2221.
  6. Oreshonkov, A.S., Krylov A.S., Vtyurin A.N., Khodzhibaev A.K., Umarov M.F. Raman spectroscopy study of the behavior of the soft mode in a structural phase transition in the  $\text{Pr}_3\text{Sb}_5\text{O}_{12}$  crystal / A.S. Oreshonkov, A.S. Krylov, A.N. Vtyurin, A.K. Khodzhibaev, M.F. Umarov // Physics of the Solid State. 2016. V. 58. № 4. P. 857-860.
  7. Hojiboev, A., Raman spectra and structural phase transition in  $\text{Pr}_3\text{Sb}_5\text{O}_{12}$  crystal / A.K. Hojibaev, A.S. Oreshonkov, A.N. Vtyurin, M.F. Umarov // [Ferroelectrics](#). 2015. V. 486. № 1. P. 86-90.
  8. Smagin, A.G. Piezoelectricity of quartz and quartz resonators / A.G. Smagin, M.I. Yaroslavsky // – M., Energy. – 1970 – 183 p.
  9. Piezoelectric resonators: Handbook / V.G. Androsova, E.G. Bronnikova, A.M. Vasiliev et al.; Ed. P.E. Kandyba and P.G. Pozdnyakova. – M.: Radio and Communications, 1992. – 392 p.: ill.
  10. Rakhmatova, Z.M. Vibrational spectra of the piezoelectric stibnite praseodymium  $\text{Pr}_3\text{Sb}_5\text{O}_{12}$  / Z.M. Rakhmatova, M.F. Umarov, A.K. Khodzhibaev // Vestn. Tajik Tech. University named after acad. M.S. Oshimi. 2013. T. 22. No. 2. P. 4-9.