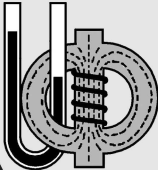


ISSN 2307-5457

*Primum  
inter pares*

Материалы XXX Всероссийской  
научно-практической конференции

„Учебный физический эксперимент:  
Актуальные проблемы. Современные  
решения“



НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ ОБРАЗОВАНИЯ

**УЧЕБНАЯ  
ФИЗИКА**

Октябрь - декабрь 2025 №4

Издается с января 1997 года  
Памяти В.В.Майера

## СОДЕРЖАНИЕ

### От редакции

О ПОСВЯЩЕНИИ ВЫПУСКОВ ЖУРНАЛА ПРОФЕССОРУ В. В. МАЙЕРУ .....3

### Основная школа

В. В. Майер НАТУРНАЯ ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ  
Е. И. Вараксина СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ  
А. В. Долженко ДЛЯ ФИЗИКО-БИОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЕКТА .....4

### Старшая школа

Е. А. Самойлов КОМПЛЕКС ФИЗИЧЕСКИХ ЗАДАЧ В СИСТЕМЕ ОБУЧЕНИЯ  
В.Ю. Самойлова СТУДЕНТОВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОМУ ВОСПИТАНИЮ  
ШКОЛЬНИКОВ С ПРИЗНАКАМИ ОДАРЕННОСТИ .....20

### Высшая школа

П. В. Казарин ЛЕКЦИОННАЯ ДЕМОНСТРАЦИЯ ПРИНЦИПА  
Н. Ф. Услугин ДИНАМИЧЕСКОГО ДЕМПФИРОВАНИЯ .....31  
Е. И. Анисимов

С. В. Панькова ИЗУЧЕНИЕ ПОПЕРЕЧНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ  
В. Г. Соловьёв КОЛЕБАНИЙ УПРУГОГО СТЕРЖНЯ  
И. И. Толбухина В УНИВЕРСИТЕТСКОМ ФИЗИЧЕСКОМ ПРАКТИКУМЕ .....39  
А. О. Юлина

### Компьютер в эксперименте

В. Б. Пикулев МЕТОД ИК-СПЕКТРОСКОПИИ В УЧЕБНОМ  
С. В. Логинова ФИЗИЧЕСКОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ .....50

### Исследования

О. А. Яворук ПУТЕШЕСТВИЯ ПО ЛАБИРИНТАМ ЗНАНИЙ:  
ОБОБЩЕННЫЕ ПЛАНЫ В ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ ....59

С. Г. Стоюхин СОЗДАНИЕ БИБЛИОТЕКИ АВТОРСКИХ ВИДЕОКЛИПОВ  
И. Ю. Голубева ЛЕКЦИОННЫХ ДЕМОНСТРАЦИЙ ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ  
С. М. Кокин МЕТОДИКИ ПРЕПОДАВАНИЯ КУРСА ФИЗИКИ .....68

АВТОРЫ ЖУРНАЛА .....74

СТАТЬИ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ В ЖУРНАЛЕ В 2025 ГОДУ .....75

---

---

*Этот и последующие выпуски журнала посвящаются д.п.н., профессору Майеру Валерию Вильгельмовичу (Глазов), основателю журнала, главному редактору (1997–2025 гг.) и автору прекрасных статей.*

**Редакция журнала:**

Е. И. Вараксина (главный редактор), Р. В. Акатов, Л. С. Кропачева, Р. В. Майер, Е. С. Мамаева

**Редакционный совет:**

|                  |                                          |
|------------------|------------------------------------------|
| С. В. Барышников | д.ф.-м.н., профессор, Благовещенск       |
| И. В. Гребенев   | д.п.н., профессор, Нижний Новгород       |
| М. Д. Даммер     | д.п.н., профессор, Челябинск             |
| П. В. Зуев       | д.п.н., профессор, Екатеринбург          |
| О. В. Лебедева   | д.п.н., доцент, Нижний Новгород          |
| Ю. А. Сауров     | д.п.н., профессор, член-корр. РАО, Киров |
| А. П. Усольцев   | д.п.н., профессор, Екатеринбург          |
| А. А. Шаповалов  | д.п.н., профессор, Барнаул               |

**Оргкомитет конференции:**

|                          |                                         |
|--------------------------|-----------------------------------------|
| Н. Я. Молотков           | д.п.н., профессор, Тамбов               |
| Ф. А. Сидоренко          | д.ф.-м.н., профессор, Екатеринбург      |
| Я. А. Чиговская–Назарова | к.филол.н., доцент, ректор ГИПУ, Глазов |
| Т. Н. Шамало             | д.п.н., профессор, Екатеринбург         |

**Перечень ВАК:** Журнал «Учебная физика» включен Высшей аттестационной комиссией (ВАК) Минобрнауки России в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук».

**Адрес редакции, издателя и типографии:** 427621, Удмуртия, Глазов, Первомайская, 25, ФГБОУ ВО «ГИПУ», Телефон: (341 41) 5–32–29.

*E-mail: uch-fiz@mail.ru, kropach@bk.ru*

---

---

**Учредитель:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Глазовский государственный инженерно-педагогический университет имени В. Г. Короленко»

Журнал «Учебная физика» зарегистрирован Комитетом Российской Федерации по печати 4 февраля 1997 года, регистрационный № 015686; внесены изменения в запись о регистрации средства массовой информации Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) 2 мая 2017 года, ПИ № ФС77–69506.

**Подписной индекс:** 79876.

Использование и перепечатка материалов допускаются только по договоренности с редакцией журнала.

Сдано в набор 02.12.25. Подписано в печать 24.12.25.

Дата выхода в свет: 25.12.25.

Формат 60 × 90 1/16. Усл. печ. л. 4,75.

Заказ 172. Тираж 200 экз. Цена свободная.

**Первая страница обложки:** Современный вариант демонстрационного анализатора линейно поляризованного света (Майер В. В., Вараксина Е. И., Васильев И. А. Физические основы робототехники: совершенствование демонстрационного анализатора линейно поляризованного света // Учебная физика. — 2024. — № 4. — С. 31–50.)

*Научная статья*

ББК 74.262.23

УДК 372.853

В. Б. Пикулев, С. В. Логинова

## МЕТОД ИК–СПЕКТРОСКОПИИ В УЧЕБНОМ ФИЗИЧЕСКОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

Продemonстрирован опыт использования ИК фурье–спектрометра для постановки лабораторной работы по определению концентрации воды и водородсодержащих дефектов в образцах природного кварца. Показана возможность применения языка программирования Python для обучения разработке программ обработки результатов спектроскопического эксперимента и визуализации экспериментальных данных.

*Ключевые слова:* ИК–спектроскопия, дефекты структуры, кварц, лабораторный физический эксперимент, научная графика.

V. B. Pikulev, S. V. Loginova

## METHOD OF IR SPECTROSCOPY IN EDUCATIONAL PHYSICS EXPERIMENT

We have proposed the user experience an IR Fourier spectrometer for setting up a laboratory work that involves determining the concentration of water and hydrogen-containing defects in samples of natural quartz. The possibility of using the Python programming language for teaching software development for processing the results of a spectroscopic experiments and visualizing of experimental data is shown.

*Keywords:* IR spectroscopy, structural defects, quartz, physics experiment in the laboratory, scientific graphics.

DOI: 10.62957/2307-5457-2025-4-50-58

### 1. Введение

Инфракрасная (ИК) фурье–спектроскопия является современным методом научных исследований, удобным для постановки учебных демонстрационных экспериментов. Это связано, в первую очередь, с быстротой и удобством измерений, поскольку в течение нескольких секунд можно получить спектр ИК–поглощения исследуемого вещества, которое может находиться в любом агрегатном

состоянии. Измерения могут проводиться на воздухе, что упрощает смену образцов. Высокая чувствительность метода позволяет исследовать достаточно сложные по химическому составу вещества. Полученные спектры легко интерпретировать, что помогает студентам быстро освоить связь между структурой и свойствами материалов, позволяет проанализировать виды химических связей и функциональные группы в исследуемом веществе. Однако ИК-спектроскопия является не только инструментом химиков, она может, в частности, эффективно использоваться в материаловедении, в геологии [1] или на стыке нескольких научных дисциплин.

Рассмотрим в качестве примера лабораторную работу, цель которой заключается в определении методом ИК-спектроскопии количества дефектов в образцах природного кварца [2]. Охватываемый ею теоретический материал находится на стыке физики, химии и геологии. Варианты представления этого учебного эксперимента позволяют студентам углубить знания о реальной структуре материалов, знакомят с методом ИК-спектроскопии, устройством ИК фурье-спектрометра, возможностями метода для проведения количественных измерений, а также показывают перспективы применения языка программирования *Python* к решению физических задач.

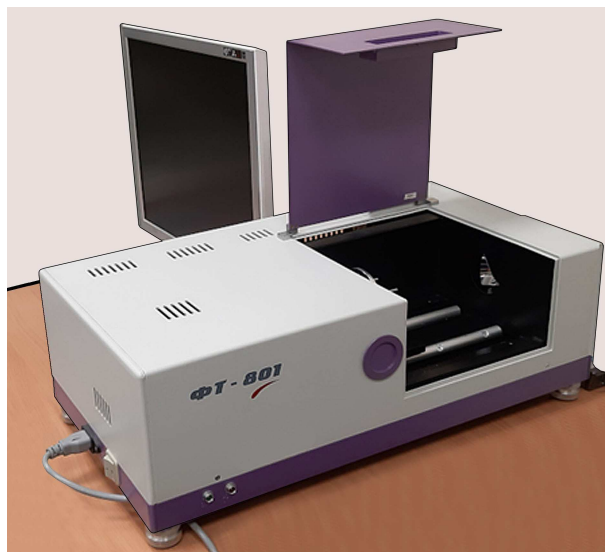


Рис. 1. ИК фурье-спектрометр ФТ-801

Для проведения демонстрационных экспериментов и лабораторных работ нами был использован ИК фурье-спектрометр ФТ-801 производства НПФ «Симекс», г.Новосибирск, Россия (рис. 1). В

комплекте с экспериментальной установкой поставляется специализированное программное обеспечение *ZaIR*, позволяющее провести первичную обработку спектров [3]. Результаты сохраняются в общепринятом формате *idx*, для работы с которым студенты используют язык *Python* с библиотекой *Jcamp*.

Методика количественных измерений не случайно отрабатывается на образцах природного кварца. Во-первых, чистый кварц (с содержанием  $\text{SiO}_2$  более 99%) является важным сырьем для различных высокотехнологичных отраслей промышленности: его используют в полупроводниковой индустрии (тигли, кварцевые резонаторы, фильтры, сырье для поликремния и др.), оптической промышленности (световоды, линзы, призмы, оптические элементы лазеров), химической промышленности (кварцевая посуда, инструменты). Поэтому знания о структуре этого материала и о наличии дефектов и примесей в нем являются весьма ценными. Во-вторых, кварц является материалом с простым химическим составом, поэтому для него удобно демонстрировать проявление на ИК-спектрах различных видов структурных и примесных дефектов и их количества.

## 2. Описание методики ИК-спектроскопии

В основе метода ИК-спектроскопии лежит явление поглощения электромагнитного излучения с длинами волн от 0,5 до 1000 мкм (волновое число  $20000\text{--}10\text{ см}^{-1}$ ) в различных материалах и средах. Физика явления обусловлена возбуждением под действием электромагнитного излучения различных видов колебаний атомов, связанных в кристаллической решетке или в молекулах исследуемого вещества. Периодические движения атомов в структуре материала квантованы и характеризуются определенными собственными частотами, поэтому для спектра поглощения характерен набор узких пиков (характеристических полос). Важно, чтобы в исследуемых веществах молекулы или атомные структуры обладали электрическим дипольным моментом — только тогда возможно их взаимодействие с возбуждающим электромагнитным излучением. Валентные колебания связаны с изменением длины химической связи, деформационные — с изменением угла между связями. ИК-спектр имеет уникальный вид для конкретного состава материала, что позволяет с помощью данного метода проводить идентификацию веществ.

Базовым принципом работы ИК фурье-спектрометра является получение интерферограммы сигнала, прошедшего через образец, с помощью двухлучевого интерферометра с подвижным зеркалом. К полученной интерферограмме применяется быстрое преобразование Фурье, в результате чего восстанавливается вид спектра поглощения. Поскольку такой тип спектрометров не имеет входной щели,

широкая входная апертура делает данный прибор высокочувствительным, а время измерения фактически определяется перемещением подвижного зеркала между своими крайними положениями.

В нашем случае диапазон измерений ИК-спектров составлял  $550\text{--}5000\text{ см}^{-1}$ , точность —  $2\text{ см}^{-1}$ , при измерениях использовалось автоматическое усреднение по 50 спектрам. Измерения проводились на воздухе. Исследуемые образцы кварца из различных месторождений были подготовлены в виде плоских полированных пластинок толщиной от 0,3 до 4 мм. Наличие различных по толщине образцов позволит проанализировать, как ИК-спектр меняется с изменением толщины образцов, а также узнать, влияет ли толщина образца на количество дефектов в кварце. Это позволяет расширить число индивидуальных заданий к лабораторной работе.

В зависимости от количества примесей кварц может быть практически полностью прозрачным (горный хрусталь) или непрозрачным мутным (разновидности жильного кварца). Для проведения эксперимента удобно выбрать образцы кварца белого цвета, окраска которых обусловлена в основном газовой-жидкими включениями [4], а также для сравнения использовать прозрачные образцы горного хрусталя. Такое сравнение позволит обучающемуся получить представление о количестве дефектов в различных видах кварца. Неоднородность образцов жильного кварца, которую можно увидеть невооруженным глазом, позволяет провести анализ разных участков образца и выявить особенности распределения дефектов в объеме материала.

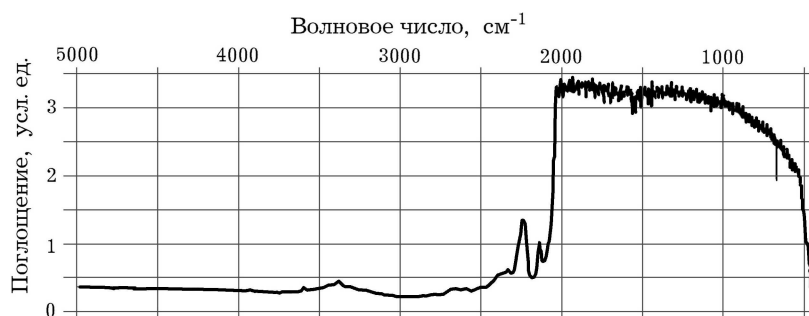


Рис. 2. Экспериментальный ИК-спектр образца розово-дымчатого кварца

В ходе выполнения работы студенту предлагается изучить устройство Фурье-спектрометра ФТ-801 и получить ИК-спектры исследуемых образцов кварца. Первичная обработка ИК-спектров кварца проводится с использованием программы *ZalR*. Параметры измерения выбираются так, чтобы в области колебаний Si-O-связей ( $< 2000\text{ см}^{-1}$ ) интенсивность сильных линий поглощения

выходила за пределы чувствительности спектрометра (рис. 2) — это позволит повысить разрешающую способность в нужной нам области колебаний ОН-связей ( $3000\text{--}3800\text{ см}^{-1}$ ). На рис. 2 представлен исходный экспериментальный спектр, усредненный по 50 кривым. Студенту предлагается рассмотреть исходный спектр, выбрать область, которую в дальнейшем планируется использовать в работе. Анализ спектра и выбор «водной» области осуществляется с использованием программы *ZalR*.

Далее для получения количественных результатов необходимо осуществить нормировку спектра на толщину образца [5]. Нормированная оптическая плотность  $D$  ( $\text{см}^{-1}$ ) рассчитывается по формуле:

$$D = \frac{1}{d} A, \quad (1)$$

где  $A$  — значение коэффициента поглощения  $\left(A = \lg \frac{100}{T}\right)$ ,  $T$  — коэффициент пропускания в %,  $d$  — толщина образца в сантиметрах. Толщины исследуемых образцов можно считать известными, либо предложить обучающимся определить их самостоятельно. В нашем случае для этих целей можно использовать микроскоп МИКМЕД-6, цена деления шкалы механизма точной фокусировки которого составляет  $0,002\text{ мм}$ . Результат нормировки спектра представлен на рис. 3.

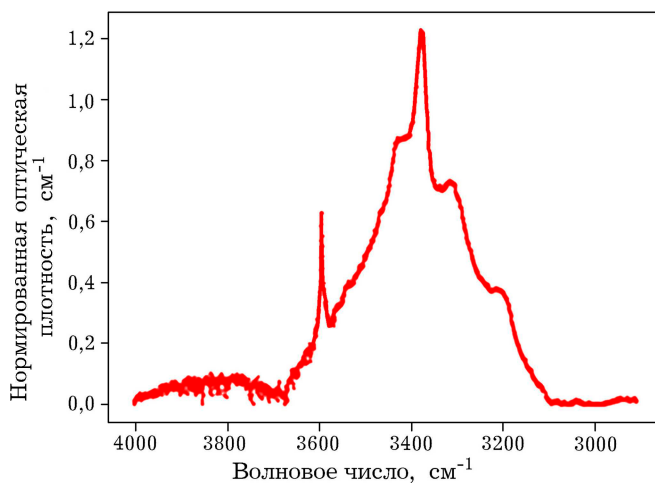


Рис. 3. «Водная» область спектра образца кварца после нормировки на толщину образца

Дальнейшую обработку результатов физического эксперимента студенты проводят самостоятельно, используя шаблон кода на языке *Python*, представленный преподавателем. Обучающимся предлагается на основе данного шаблона написать расчетную программу с использованием библиотек *Icamp* (загрузка файла экспериментальных данных), *SciPy* (аппроксимация кривой) и *matplotlib* (вывод графиков на экран в виде, подобном рис. 3 и рис. 4 данной статьи). Метод *curve\_fit* библиотеки *SciPy*, как показано авторами в [6], удобен для аппроксимации экспериментального спектра необходимым количеством линий гауссовой формы:

$$I = A \cdot \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{x - x_0}{\omega} \right)^2 \right], \quad (2)$$

где  $A$  — амплитуда пика;  $x_0$  — положение пика;  $\omega$  — параметр полуширины пика.

Количество линий, их приблизительное положение и начальные значения амплитуды и параметров полуширины пиков определяются в программе *ZalR*. Результатом применения данного метода является набор рассчитанных значений трех вышеуказанных параметров для каждого из гауссовых пиков. Используя полученный список значений, студентам не представляет сложности изобразить отдельно каждый из гауссовых пиков и их суммарную кривую (зеленая кривая на рис. 4). Расчет  $R$ -фактора и среднеквадратичной ошибки может быть выполнен методом *std* библиотеки *numpy*.

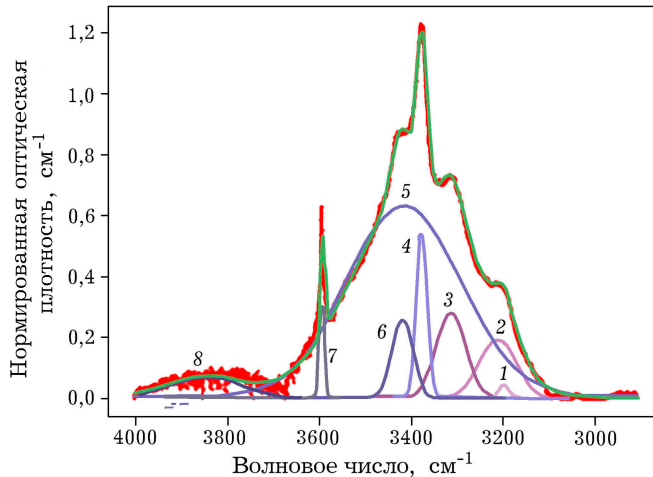


Рис. 4. Результат аппроксимации экспериментального ИК-спектра розово-дымчатого кварца восемью линиями (кривые 1–8) гауссовой формы

Наглядность представления экспериментальных результатов в виде правильно выбранного и корректно оформленного графического представления неоспорима [6, 7]. Пример сравнения экспериментального и модельного ИК-спектров представлен на рис. 4.

Результат аппроксимации считается достоверным, если значение среднеквадратичной ошибки менее 0,001, а  $R$ -фактора — порядка 0,99.

Таким образом, изначально проблема аппроксимации «водной» области спектра имеет чисто математическое решение, реализуемое на языке *Python*. Вопрос о соотношении полос спектра соответствующим видам дефектов является следующей задачей, речь о которой пойдет ниже.

### 3. Определение количественных характеристик дефектности структуры кварца

Методика определения концентрации дефектов в кварце хорошо апробирована [5, 8]. В ее основе лежит анализ «водной» области спектра кварца. Это область гидроксильных групп, в которой можно выделить до 10 полос поглощения, в зависимости от числа типов дефектов в кварце.

Чаше всего «водная» область ИК-спектра кварца (рис. 4) состоит из семи полос поглощения [5]. В этой области можно выделить линии 1 и 3 (в области 3200 и 3300  $\text{см}^{-1}$ ), связанные с обертонами и составными частотами колебаний связи кремний-кислород [5]. Полосу 3220  $\text{см}^{-1}$  (линию 2) относят к симметричным валентным колебаниям связи О–Н в молекулах воды, которые находятся в упорядоченной тетраэдрической координации, взаимодействуя с кристаллической решеткой кварца. Этот дефект называют «кристаллоподобной» водой. Полосы 3378  $\text{см}^{-1}$  (линия 4) и 3435  $\text{см}^{-1}$  (линия 6) связывают с колебаниями Al–ОН. Наиболее часто примесными атомами замещения в структуре  $\text{SiO}_2$  являются атомы алюминия [4]. Примесные атомы замещают часть позиций кремния, то есть размещаются в центрах тетраэдров  $\text{SiO}_4$ . Полоса 3410  $\text{см}^{-1}$  (линия 5) относится к антисимметричным колебаниям молекул воды. Это так называемая «жидкоподобная» вода [5], которая в виде флюидных включений размещается в объеме материала. Полосы с максимумами в области 3600–3800  $\text{см}^{-1}$  связаны с симметричными и антисимметричными колебаниями ОН-групп в силанольных группировках, в изолированных молекулах воды, в составе минеральных включений (линия 8). Седьмая полоса (линия 7, 3595  $\text{см}^{-1}$ ), наблюдаемая на рис. 4, проявляется в тех образцах кварца, в которых присутствует бор. В некоторых разновидностях кварца возможно присутствие лития (линия 3480  $\text{см}^{-1}$ ).

Долю воды в образце кварца можно оценить следующим образом:

$$C_{\text{H}_2\text{O}} = K \cdot S \cdot \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{M_{\text{SiO}_2}}, \quad (3)$$

где  $K$  — калибровочный множитель, равный 1,05 для  $\text{H}_2\text{O}$  [5];  $S$  — площадь соответствующей линии ( $\text{см}^{-2}$ );  $M_{\text{H}_2\text{O}}$  и  $M_{\text{SiO}_2}$  — молекулярная масса воды и кварца (г/моль).

Для оценки содержания примесных атомов алюминия проводят расчет концентрации  $\text{OH}$ -групп [5]:

$$C_{\text{OH}} = K \cdot S \cdot \frac{M_{\text{OH}}}{M_{\text{SiO}_2}} \cdot t, \quad (4)$$

где  $M_{\text{OH}}$  — молекулярная масса  $\text{OH}$ ;  $t$  — поправочный коэффициент, равный 2,7;  $K = 1,87$  для  $\text{OH}$ -групп [5].

Таким образом, концентрации «жидкоподобной» и «кристаллоподобной» воды и  $\text{OH}$ -дефектов в исследуемых образцах рассчитываются по формулам (3)–(4), результаты расчетов заносятся в таблицу.

Используя приведенный выше подход, студенту предлагается провести качественный анализ спектров и выполнить отнесение наблюдаемых полос поглощения. Как было показано выше, обучающимся может быть предложено несколько вариантов индивидуальных заданий.

1. Провести анализ образцов кварца различных месторождений.
2. Провести анализ разных участков образца, имеющих различную прозрачность.
3. Проанализировать зависимость концентрации дефектов от толщины образцов.

По результатам работы студентам предлагается сделать выводы о природе и количестве дефектов в исследованных образцах кварца и оформить отчет.

На выполнение предложенной лабораторной работы требуется два академических часа, в течение которых преподаватель демонстрирует работу ИК фурье-спектрометра на различных образцах, интерпретирует полученные спектры и дает возможность студентам самостоятельно провести измерения на образцах кварца. Остальную часть работы студенты выполняют самостоятельно. Экспериментальная составляющая знакомит студентов с устройством ИК фурье-спектрометра, принципами расшифровки ИК-спектров, основами идентификации веществ методами ИК-спектроскопии, возможностями качественного и количественного анализа по данным ИК-спектроскопии.

Выполнение подобных лабораторных работ, имеющих междисциплинарный характер, в курсах, читаемых будущим специалистам

в области физики, материаловедения, геологии, углубляет и расширяет представления обучающихся о физико-химических методах исследования вещества и показывает важность использования численных методов анализа и *IT*-технологий при проведении физического эксперимента.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Плюснина И.И. Инфракрасные спектры минералов. — М.: Издательство Московского университета, 1976. — 175 с.
2. Логинова С.В., Пикулев В.Б. Лабораторный практикум по оптической микроскопии и ИК-спектроскопии: учебно-методическое электронное пособие. — Петрозаводск: Издательство ПетрГУ, 2020. — 41 с.
3. Фурье-спектрометр ФТ-801: руководство по эксплуатации. — Новосибирск, 2010. — 26 с.
4. Пущаровский Д.Ю. Структура и свойства кристаллов. — М.: ГЕОС, 2022. — 260 с.
5. Штенберг М.В. Вода и водородсодержащие группировки в жильном кварце уральских месторождений кварцевого сырья // Литосфера. — 2014. — № 3. — С. 102–111.
6. Пикулев В.Б., Логинова С.В. Язык Python в приложении к экспериментальным исследованиям: учебное электронное пособие. — Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2019. — 55 с.
7. Логинова С.В., Пикулев В.Б. Использование языка Python для графического представления результатов эксперимента // Проблемы учебного физического эксперимента: Сборник научных трудов. Выпуск 42. — М.: ИСПО РАО, 2025. — С. 99–101.
8. Светова Е.Н. Изучение содержания воды и водородсодержащих дефектов в промышленных типах кварца Карелии (Россия) методом ИК-спектроскопии // Журнал прикладной спектроскопии. — 2022. — Т. 89. — № 5. — С. 638–645.

Петрозаводский государственный  
университет

Поступила в редакцию 05.06.25.