

Компьютерная модель петрографического микроскопа

В.А. Дебелов¹, А.Ю. Рубцова², С.З. Смирнов³

¹Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,

²Новосибирский Государственный Университет,

³Институт минералогии и петрографии СО РАН, Новосибирск, Россия

debelov@oapmg.ssc.ru, ranette@gorodok.net, ssmr@uiggm.nsc.ru

Аннотация

Данная работа посвящена построению физически корректной модели петрографического микроскопа и наблюдаемых с его помощью оптических явлений на тонких срезах кристаллов. Полученная модель позволяет в реальном времени визуализировать оптические явления, наблюдаемые в плоско поляризованном и сходящемся свете.

Ключевые слова: Физически корректная визуализация, кристалл, двойное лучепреломление, плоско поляризованный свет, сходящийся свет, шлиф, петрографический микроскоп.

1. ВВЕДЕНИЕ

Физически корректное моделирование свойств различных сред и веществ в последнее время привлекает большой интерес со стороны специалистов различных областей. В литературе рассматриваются различные подходы для построения данных моделей. Зачастую приводятся методы, которые позволяют получить реалистичное изображение для узкого класса объектов. Обычно расширение таких моделей или попытка их применения для более широкого множества объектов приводит к необходимости поиска нового подхода или серьезной модификации существующего.

В работе [1] было показано, что методы расчета изображений, применяемые для визуализации обычных сцен, совершенно не применимы для расчета сцен с кристаллами и моделирования их оптических свойств. Они не дают возможность смоделировать такие свойства, как двулучевое преломление, оптическая дисперсия, плеохроизм.

2. ПЕТРОГРАФИЧЕСКИЙ МИКРОСКОП

2.1 Метод изучения минералов

Петрографический микроскоп является одним из основных средств, позволяющих проводить анализ минералов и оптических свойств образцов (рис. 1). Он отличается от обычных микроскопов наличием приспособлений, необходимых для получения поляризованного параллельного и сходящегося света. Параллельные и сходящиеся пучки поляризованного света получают с помощью системы линз и поляризаторов.

Для изучения минералов используются тонкие срезы горных пород толщиной до 3мм, называемые *шлифами*. Обычно используют шлифы толщиной 10-50мкм.

Тщательное петрографическое изучение пород дает возможность определять их тип и делать выводы относительно условий их образования. На рис. 2–4 приведены примеры картин наблюдаемых в микроскопе тонких срезов горных пород и

отдельных минералов при различных конфигурациях оптической системы микроскопа.



Рис. 1. Петрографический микроскоп

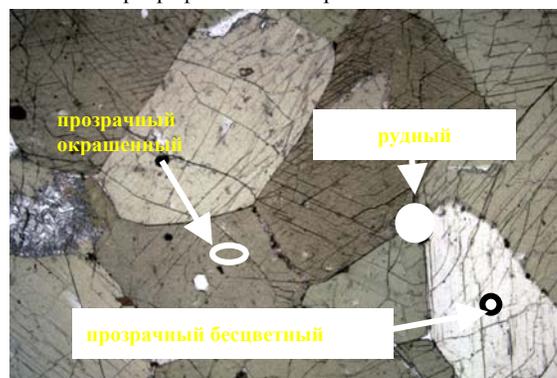


Рис. 2. Наблюдение тонкого среза породы в плоско поляризованном свете (с одним поляризатором)

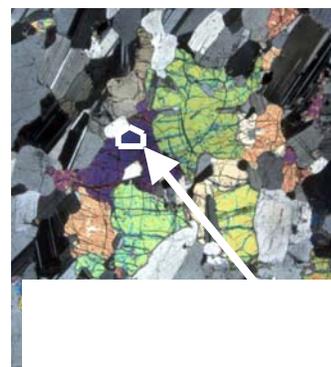


Рис. 3. Наблюдение тонкого среза горной породы в плоско поляризованном свете при скрещенных поляризаторах

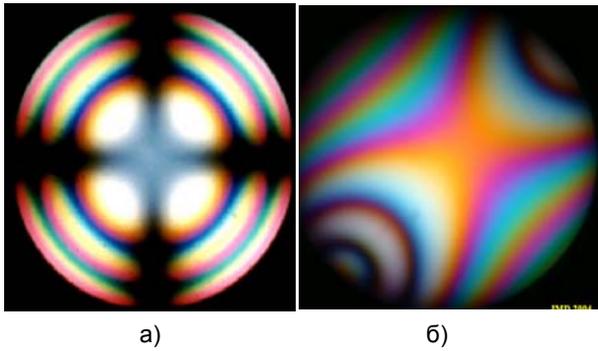


Рис. 4. Интерференционные картины анизотропных кристаллов, наблюдаемых в сходящемся свете: а) кальцит, б) топаз

На рис. 2 снимок горной породы, наблюдаемый в микроскоп при одном поляризаторе и освещении параллельным пучком света. На рис. 3 снимок сделан также при освещении параллельным пучком, но при введенных в оптическую систему поляризаторах, плоскости поляризации которых пересекаются под прямым углом. На рис. 4 приведены картины, наблюдаемые в микроскоп, когда в его оптическую систему, кроме поляризаторов, введена линза, обеспечивающая освещение сходящимся пучком света.

Методика изучения минералов включает ряд последовательных способов. На первой стадии изучают оптические свойства в параллельном свете при одном поляризаторе, а затем в скрещенных поляризаторах. На последнем этапе исследуют коноскопические фигуры минералов (рис. 4), определяют их оптические оси и оптический знак. Для этой цели применяют коноскопический метод, основанный на особенностях прохождения сходящегося света через кристалл [4].

Параллельный пучок света обеспечивается всеми стандартными конденсорами современных микроскопов. Если использован только один поляризатор, то изучают цвет минерала, форму и размер зерен (вкраплений кристаллов) и оптические свойства, обусловленные показателями преломления минералов в данном сечении. На данной стадии легко отличают прозрачные и непрозрачные (рудные) минералы. Прозрачные минералы выглядят бесцветными либо окрашенными (кварц, оливин), а рудные – черными (магнетит, ильменит). Бесцветные минералы полностью пропускают свет и при одном поляризаторе выглядят белыми. Некоторые минералы заметно поглощают свет разных участков спектра, в результате чего выглядят окрашенными. Некоторые минералы при вращении меняют окраску. Это связано с явлением плеохроизма, суть которого состоит в том, что минерал по-разному поглощает свет в зависимости длины волны, направления и поляризации [1, 2].

Данный метод на практике позволяет выделить зерна, которые более тщательно будут изучены на следующих стадиях.

Дальнейшее изучение свойств минералов производится в скрещенных поляризаторах. На данной стадии выявляются отличия изотропных и анизотропных минералов, фиксируется интерференционная окраска различных сечений, определяется сила двойного лучепреломления и многое другое [4].

Последней стадией в процессе изучения минерала является коноскопический метод, основанный на использовании сходящегося света. Для получения сходящегося пучка в осветительную систему конденсора помещают дополнительную линзу (линзу Лазо), фокусирующую свет на плоскость шлифа. В результате прохождения сходящегося поляризованного

света через кристалл и анализатор изучается интерференционная картина минерала (коноскопические фигуры (рис. 4)). Для удобства наблюдения коноскопической фигуры перед окуляром помещают сферическую линзу (линзу Бертрана). Данный способ предоставляет максимальное количество данных об оптических свойствах минерала.

2.2 Оптическая система микроскопа

В результате исследования существующих моделей нами было обнаружено, что задача моделирования оптической системы микроскопа может быть решена различными способами. Можно было использовать метод Монте-Карло и для любой поверхности рассчитывать взаимодействие лучей в соответствии с моделью, приведенной в работе [1]. Очевидно, что данный метод достаточно трудоемок с точки зрения количества вычислений, что совершенно неприемлемо для интерактивной системы как компьютерной модели петрографического микроскопа.

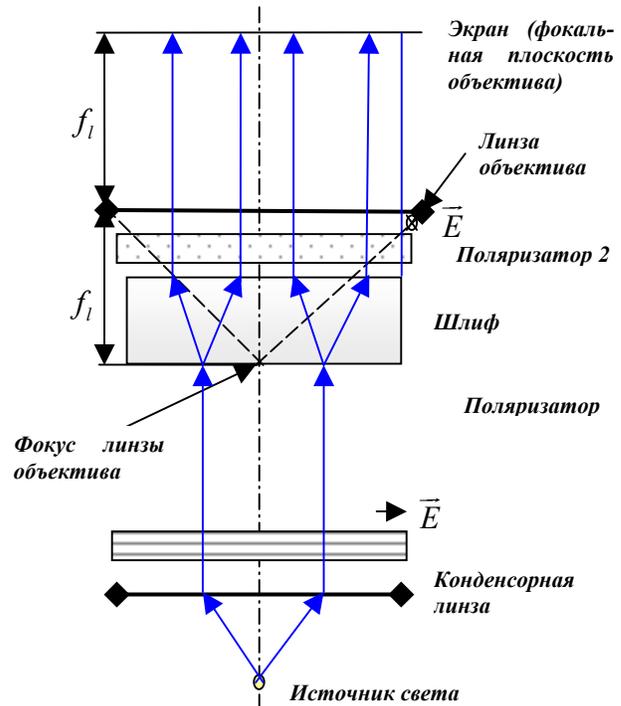


Рис. 5. Схема оптической системы петрографического микроскопа для изучения анизотропного минерала в параллельном свете

Исходя из конструкции оптической системы микроскопа (рис. 5, 6), мы предположили, что модель вычислений может быть значительно упрощена. Конструкция линзы объектива, линзы Лазо и конденсорной линзы таковы, что они предусматривают коррекцию хроматических и сферических аберраций, возникающих из-за оптической дисперсии стекла [3]. Следовательно, можно рассматривать только свойства минерала и его взаимодействие со светом в оптической системе, считая, что все элементы микроскопа идеальны и не вызывают искажений получаемого изображения. В результате основной задачей становится построение модели взаимодействия минерала со светом.

Оптические свойства минерала, как и любой другой среды, определяются его взаимодействием со светом, которое характеризуется тем, как он отражает, преломляет и поглощает свет. С помощью петрографического микроскопа изучают в

основном явления, связанные с преломлением света. Это основано на том, что в кристаллах многих минералов возникает явление, называемое *двойным лучепреломлением*. Суть его состоит в том, что падающий луч света разделяется на два луча, поляризованных во взаимно перпендикулярных плоскостях. Такие минералы являются анизотропными. Остальные минералы, в которых не возникает двойного лучепреломления, относятся к классу изотропных. Их изучение с помощью петрографического микроскопа не дает полезной информации, потому как ключевым является взаимодействие с поляризованным светом, а кристаллы изотропных минералов пропускают свет так же, как стекло, не изменяя его, и в скрещенных под прямым углом поляризаторах, которые включены в оптическую систему микроскопа, выглядят неокрашенными. В отличие от них анизотропные минералы дают некоторую картину, являющуюся результатом интерференции и зависящую того, какой свет падает на срез кристалла и от самого кристалла [2].

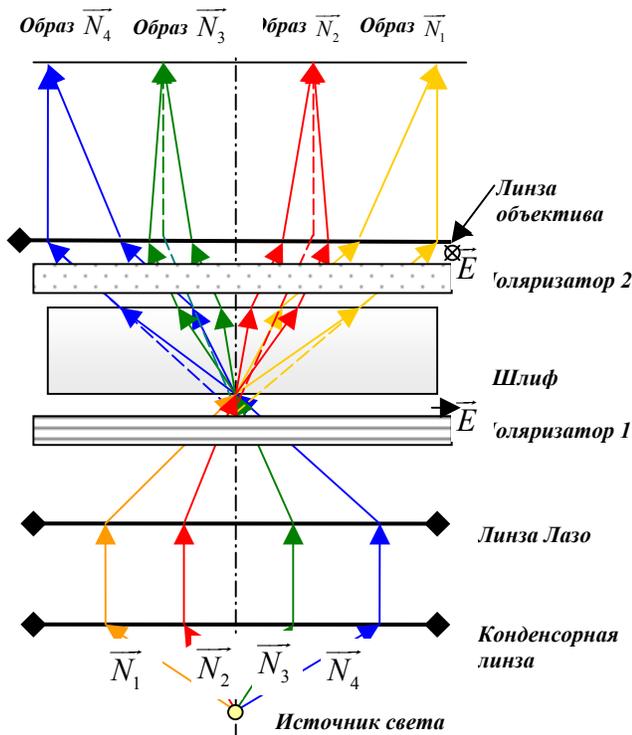


Рис. 6. Схема оптической системы петрографического микроскопа для наблюдения анизотропного минерала в сходящемся свете

В результате основной задачей становится определение влияния двойного лучепреломления на падающий свет и определение окраски в точке изображения.

2.3 Определение окраски минерала в шлифе, наблюдаемом в плоско поляризованном параллельном свете

Рассмотрим случай параллельного плоско поляризованного монохроматического пучка света, перпендикулярно падающего на кристалл (конфигурация оптической системы микроскопа, приведенная на рис. 5).

После прохождения через первый поляризатор на кристалл падает плоско поляризованная волна, разделяющаяся на два плоско поляризованных луча с перпендикулярными плоско-

стями поляризации. На выходе из кристалла один пучок обгонит другой на количество волн

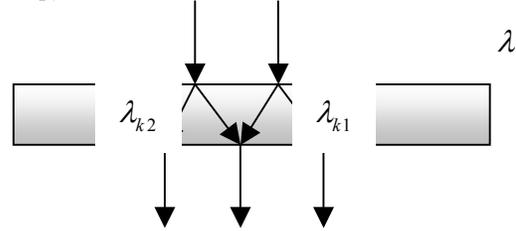


Рис. 7. Схема распространения монохроматического света в анизотропном кристалле

$$G = d \left(\frac{1}{\lambda_{k1}} - \frac{1}{\lambda_{k2}} \right), \quad (1)$$

где λ_{k1} и λ_{k2} – длины волн по нормали к направлению распространения фронта. Величину G называют величиной волновой разности хода. Если рассматривать величину разности хода, выраженную в единицах длины, то мы получаем значительную разность фаз для выходящих из кристалла пучков.

$$\Gamma = d \left(\frac{\lambda}{\lambda_{k1}} - \frac{\lambda}{\lambda_{k2}} \right). \quad (2)$$

Учитывая то, что по определению [6] коэффициент преломления $n = \frac{\lambda}{\lambda_k}$, получаем

$$\Gamma = d (n_1 - n_2). \quad (3)$$

Величину $(n_1 - n_2)$ называют *силой двупреломления* [2]. Ее можно определить с помощью индикатрисы кристалла, которая является поверхностью, образованной векторами, длины которых пропорциональны значениям коэффициентов преломления в данном направлении. В общем случае индикатриса является эллипсоидом общего вида. Следовательно, для определения силы двупреломления необходимо найти сечение индикатрисы плоскостью, по которой сделан срез, а затем для полученного эллипса определить длины его полуосей. Коэффициенты преломления для лучей, проходящих через срез, сделанный параллельно этой плоскости, будут связаны с полуосями эллипса следующим соотношением

$$k = \frac{1}{\sqrt{l}}, \quad (4)$$

где l – длина полуоси. Зная величину Γ можно определить разность фаз, с которой лучи выходят из кристалла [2] – это

$$\delta = \frac{2\pi\Gamma}{\lambda}. \quad (5)$$

Данная разность фаз совпадает с разностью фаз лучей, выходящих из одной точки кристалла (рис. 8). На основании полученной разности фаз мы можем определить функцию пропускания первоначальной интенсивности для лучей с заданной длиной волны [2] после прохождения пучка через второй поляризатор.

$$J = \frac{I}{I_0} = \sin^2 2\alpha \sin^2 \frac{\delta}{2} = \sin^2 2\alpha \sin^2 \frac{\pi d (n' - n'')}{\lambda}, \quad (6)$$

где угол α – угол между направлением, выделяемым вторым поляризатором и одной из полуосей эллипса, находящегося в соответствующем сечении индикатрисы. На основании полученной формулы можно определить для каждой длины волны

в спектре источника функцию пропускания ее первоначальной интенсивности. Зная изменение спектра, мы можем определить окраску минерала в параллельном плоско поляризованном свете.

Заметим, что в некоторых минералах коэффициенты преломления в одном направлении для различных длин волн могут различаться, то есть могут иметь различия оптические индикатрисы для разных длин волн. Данное явление называется *оптической дисперсией*. Но как показал многолетний опыт минералогии, это различие при наблюдении тонких срезов не дает значительных расхождений в силе двупреломления для различных длин волн, поэтому данную величину для фиксированного сечения и различных длин волн можно считать постоянной. На основании данного утверждения минералоги используют наблюдаемую в шлифе окраску для определения силы двупреломления, а затем на ее основании и самого минерала. Данное определение происходит либо с помощью эталонного образца, либо с помощью таблицы Мишеля-Леви, которая является справочной информацией и найти ее можно, например, на сайте [3].

2.4 Определение интерференционной картины минерала, наблюдаемого в сходящемся свете

Для случая сходящегося плоско поляризованного света, проходящего через срез кристалла, мы имеем более сложную картину. Если в случае параллельного света у нас было только одно направление, то в случае сходящегося света мы имеем множество направлений в пределах некоторой апертуры. Однако каждое направление с помощью линзы фокусируется в некоторую точку на экране, причем одна точка не может быть проекцией нескольких направлений (рис. 6). Таким образом, для определения окраски в точке необходимо и достаточно определить функцию пропускания, аналогичную формуле (6).

Прежде чем определить функцию пропускания, аналогично с параллельным светом рассмотрим распространение света, падающего под некоторым углом φ на кристалл (рис. 8).

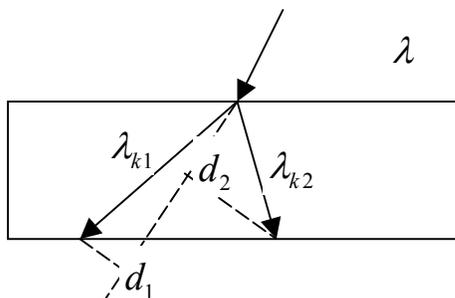


Рис. 8. Распространение света в анизотропном кристалле при падении под некоторым углом

Причем сила двулучевого преломления в данном случае будет равна
$$\Gamma = d_1 \frac{\lambda}{\lambda_{k1}} - d_2 \frac{\lambda}{\lambda_{k2}} = d_1 n_1 - d_2 n_2.$$

В соответствии с этим получается, что пропускание первоначальной интенсивности равно

$$J = \frac{I}{I_0} = \sin^2 2\alpha \sin^2 \frac{\pi(d_1 n_1 - d_2 n_2)}{\lambda},$$

где угол α имеет тот же смысл, что и в формуле (6). Таким образом, зная изменение падающего спектра, остается только определить положение образа заданного направления на изо-

бражении. Это можно сделать аналогично тому, как показано на рис. 9.

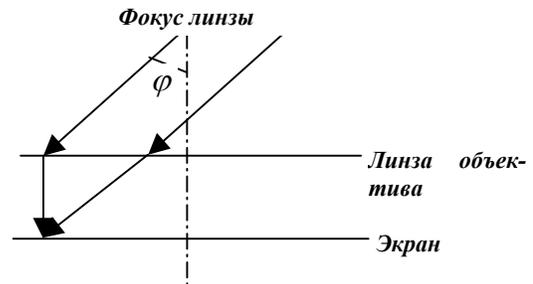


Рис. 9. Определение положения проекции направления на изображении

3. МОДЕЛЬ МИКРОСКОПА

Приведенные формулы свидетельствуют о том, что мы можем построить точное аналитическое представление оптической системы микроскопа для наблюдения минерала в параллельном и сходящемся свете. В результате мы получаем, что нам необходимы следующие параметры:

- Характер падающего на шлиф света.
Модель падающего на кристалл света определяются его спектральными характеристиками и моделью взаимодействия с кристаллом, которая различна для параллельного и сходящегося плоско поляризованного света.
- Свойства наблюдаемого минерала.
Модель кристалла задается геометрией кристалла. Кристаллу может быть придана любая форма, однако типичные кристаллы – это полиэдры, поэтому мы ограничимся граничным заданием кристалла в виде набора полигонов.
Модель оптической индикатрисы кристалла определяется параметрами соответствующего эллипсоида: направлениями полуосей эллипсоида и значениями коэффициентов преломления в соответствующих направлениях.
- Плоскость, по которой выполнен срез кристалла.

Как было описано ранее, для исследования в петрографическом микроскопе, используются тонкие срезы кристаллов отдельных минералов толщиной порядка 10-50мкм. В соответствии с правилом Лодочникова [4] мы считаем, что секущая плоскость проходит через центр кристалла и, соответственно, индикатрисы, и ее параллельный перенос не дает изменения наблюдаемой картины, за исключением формы сечения. Таким образом, основной характеристикой среза становится вектор нормали $\vec{n} = (n_x, n_y, n_z)$ плоскости, по которой он выполнен.

Задача расчета изображений сводится к следующим подзадачам:

- Для параллельного света: нахождение формы сечения для заданной секущей плоскости; вычисление разности коэффициентов преломления; вычисление изменения спектра по заданной выборке; вычисление окраски по полученному спектру.
- Для сходящегося света: определение окраски минерала, наблюдаемой в параллельном свете для множества направлений в рамках некоторого конуса.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная компьютерная модель петрографического микроскопа реализована в виде отдельного модуля в рамках web-справочника Кристалл [5], который применяется в учебном процессе на Геолого-геофизическом факультете НГУ.

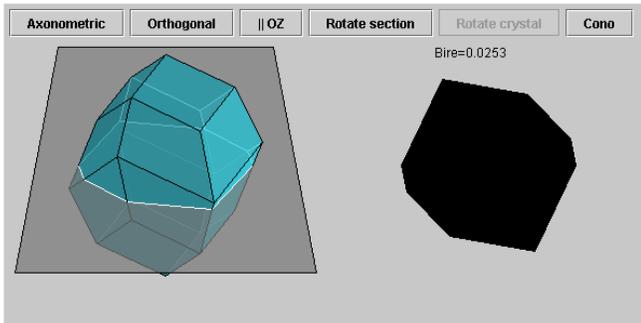


Рис. 10. Моделирование среза кристалла кальцита, наблюдаемого в параллельном свете

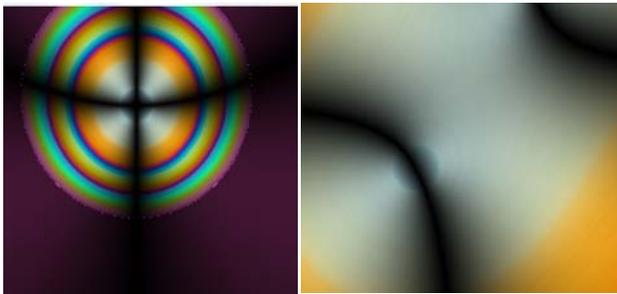


Рис. 11. Моделирование срезов кристаллов кальцита и альбита, наблюдаемых в сходящемся свете

Интерес к разработке физически корректной модели петрографического микроскопа возник у авторов в процессе расширения web-справочника Кристалл [5]. В результате анализа существующих систем (напр., [7]) было обнаружено, что доступные в Интернет системы не предоставляют возможности визуализации оптических свойств.

Отметим также, что разработанный виртуальный микроскоп предоставляет больше возможностей, чем реальный, например, оперативный выбор плоскости шлифа.

Благодарности

В заключение, хотим выразить особую благодарность Василию Сухорукову – ассистенту кафедры минералогии и петрографии НГУ – за постоянный интерес к разрабатываемой системе, а так же Дмитрию Козлову, чей модуль CIE был использован для расчета окраски по спектру [8].

Данная работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ, грант № 06-07-89216а.

5. БИБЛИОГРАФИЯ

[1] Дебелов В.А., Саттаров М.А., Модели и алгоритмы для фотореалистической визуализации сцен с кристаллами // Труды 15-ой международной конференции по компьютерной графике и ее приложениям Графикон-2005, Новосибирск, 20-24 июня 2005. – Новосибирск, 2005 – С. 348-354.

[2] Шубников А.В. Оптическая кристаллография. Изд-во АН СССР, Москва 1950.

[3] <http://www.zeiss.com/4125681F004CA025/Contents-Frame/EFDC22E75BFD306A85256B500073D099>

[4] Сазонов А.М. Лабораторный практикум по петрографическим методам исследования // Изд-во Красноярского университета. Красноярск – 1990.

[5] Интерактивная Система Обучения "Кристалл" // <http://www.ggd.nsu.ru/Crystal/>

[6] Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц, Электродинамика сплошных сред // М.: Наука–1982.

[7] Webmineral // <http://webmineral.com>

[8] Козлов Д. С. Разработка библиотеки для выполнения цветового преобразования CIE // Матер. XLIV Международной Научной Студенческой Конференции "Студент и научно-технический прогресс". Новосибирск, 2006, с.148–149.

Об авторах

Дебелов Виктор Алексеевич – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории численного анализа и машинной графики Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН.

E-mail: debelov@oapmg.sgcc.ru.

Рубцова Анна Юрьевна – студентка пятого курса факультета информационных технологий Новосибирского Государственного Университета.

E-mail: ranette@gorodok.net.

Смирнов Сергей Захарович – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института геологии и минералогии СО РАН.

E-mail: ssmr@uiggm.nsc.ru.

Computer Model of Petrographic Microscope

Abstract

The given paper is devoted to the development of a physically based model of a petrographic microscope. This virtual device enables the observation of optical phenomena in the selected sections of crystals. The model allows real-time rendering of optical features of crystals, which are visible in converging plane polarized light.

Keywords: *physically based rendering, petrographic microscope, crystal, bi-refringence, plane polarized light, convergent light, orthoscopy, conoscopy, petrographic thin section.*

About the authors

Victor A. Debelov holds position of leading researcher at Computer Graphics Lab. of the Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS. His contact email is

debelov@oapmg.sgcc.ru.

Anna Yu. Rubtsova is a graduate student of the Novosibirsk State University. Her contact email is ranette@gorodok.net

Sergey Z. Smirnov holds position of senior researcher at the Institute of Geology and Mineralogy SB RAS. His contact email is ssmr@uiggm.nsc.ru.