

К ВОПРОСУ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ МЕТОДА СРАВНИТЕЛЬНОЙ ДИСПЕРСИИ ДВУПРЕЛОМЛЕНИЯ

В течение ряда последних лет в СССР проводятся работы по разработке и применению нового метода микроскопических исследований — метода сравнительной дисперсии двупреломления (нового метода анализа химического состава кристаллических веществ). Этот метод, основанный на применении силы двупреломления анизотропных веществ, разработан Е. А. Кузнецовым и открывает новый этап в практике минералогических исследований. До недавнего времени, несмотря на полученные экспериментальным путем данные, метод Е. А. Кузнецова не имел своей теоретической основы. Однако в последних работах Е. А. Кузнецова и Е. В. Бурикова [1, 2] рассматриваются теоретические вопросы, которые в более дополненном нами виде приводятся ниже.

В основе всех явлений, связанных с дисперсией двупреломления минералов, лежит известный по молекулярной оптике механизм воздействия света на вещество. Рассмотрение некоторых теоретических положений молекулярной оптики позволяет ближе подойти к сущности метода и тех явлений с которыми мы сталкиваемся во время исследования дисперсии двупреломления.

Понятие дисперсия света включает в себя совокупность явлений, обусловленных зависимостью коэффициента преломления вещества от длины световой волны. На границе двух сред свет разных длин волн преломляется различно. При принятии показателя преломления одной среды равной единице (в пустоте), для каждого вещества коэффициент преломления будет определенной функцией от длины волны $n = f(\lambda) = \varphi(\omega)$, где λ — длина волны и ω — циклическая частота световой волны.

Взаимодействие света с атомами вещества ведет к изменению скорости света, чем и обусловлено значение коэффициента преломления $n = \frac{v}{c}$, где v — скорость света в веществе, а c — скорость света в пустоте.

Заряженные частицы в атомах удерживаются в своих положениях равновесия квазиупругими силами. Под влиянием световой волны, обладающей определенным электрическим полем, в атомах среды индуцируются диполи, совершающие колебания. Благодаря этому около них

возникают вторичные волны, амплитуда и фаза которых определяются амплитудой и фазой вынужденных колебаний частиц.

Периодическая вынуждающая сила с частотой ω вызывает вынужденное колебание с амплитудой

$$A = \frac{h}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2\omega^2}} \quad (1)$$

и фазой α , определяемой равенством:

$$\operatorname{tg} \alpha = -\frac{2\beta\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}, \quad (1a)$$

где h — константа, β — коэффициент, характеризующий затухание колебаний системы, ω — частота падающей волны, ω_0 — частота собственных колебаний.

Роль затухания колебаний при небольшом значении величины β заметна лишь для ω , близких к ω_0 . Естественно, амплитуда и фаза вынужденных колебаний зависит от соотношения частот ω и ω_0 . Вблизи резонанса амплитуда A велика. При $\omega \ll \omega_0$ амплитуда A значительно меньше и с уменьшением ω стремится к постоянному пределу, не равному нулю. В этом случае свет проходит через вещество со скоростью, практически не зависящей от частоты, но отличной от скорости света в пустоте.

В результате сложения вторичных волн с первичной, образуется результирующая волна с амплитудой и фазой, отличной от амплитуды и фазы первичных волн.

Различие фазовых скоростей будет тем больше, чем сильнее вынужденные колебания частиц. Если $\omega \gg \omega_0$, то амплитуда A вынужденных колебаний стремится к нулю. В этом случае свет проходит через вещество со скоростью, близкой к скорости света в пустоте.

В обоих приведенных случаях поглощение света незначительное и коэффициент преломления близок к единице.

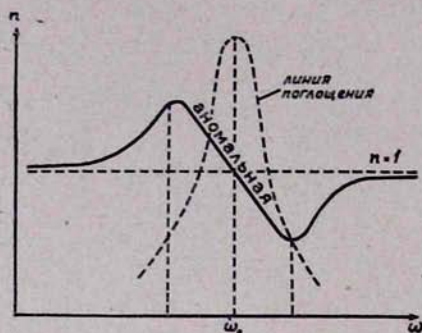
В тех случаях, когда частоты ω и ω_0 близки, различие в скорости распространения света в веществе и в пустоте становится сильно заметным благодаря чему коэффициент преломления сильно отличается при этих частотах от единицы. Так, при $\omega < \omega_0$ коэффициент преломления оказывается „аномально“ большим, а при $\omega > \omega_0$ — „аномально“ малым. К этому надо добавить, что при значениях ω близких к ω_0 , вследствие больших амплитуд вынужденных колебаний велико и поглощение.

Вещество, состоящее из атомов с определенным набором частот собственных колебаний ω_{0i} , дает в спектре прошедшего через него света узкие области («линии») поглощения*. Обычно поглощение носит селек-

* Поглощением света называется уменьшение энергии или интенсивности световой волны при ее распространении в веществе вследствие перехода энергии электромагнитного поля волны в другие формы. Поглощение света становится особенно сильным при приближении его частоты к частотам собственных колебаний электронов в атомах вещества или атомов в молекулах вещества (резонансное поглощение).

тивный характер и поэтому коэффициент преломления оказывается постоянным в областях, далеких от линий поглощения, и быстро меняется с частотой и сильно отличается от единицы вблизи каждой линии поглощения, где взаимодействие света с веществом велико.

Различают нормальную и аномальную дисперсию света. Дисперсия света называется нормальной в случае, если показатель преломления монотонно убывает с увеличением длины волны; в противном случае имеем дело с аномальной дисперсией света. Нормальная дисперсия света наблюдается вдали от полос или линий поглощения света веществом, аномальная — в пределах полос или линий поглощения (фиг. 1).



Фиг. 1.

Все вышеуказанное относится к общей теории дисперсии света, но в приложении к кристаллическим веществам, а именно эту цель преследуем мы, необходимо разграничить влияние вынуждающих сил на вещество. Ведь световая волна вызывает колебание как электронов, так и ядер атомов. Благодаря значительно большей разнице между массами ядер и электронов, частоты их колебаний падают в различные области спектра. Для ядер это соот-

ветствует инфракрасной области, а для электронов — видимой и ультрафиолетовой.

Сила взаимодействия электронов с внешним электромагнитным полем определяется степенью удаленности электронов от ядер, т. е. зависит от сил взаимодействия между ними.

Под действием внешнего электромагнитного поля электроны в кристаллах минералов, представляющих собою диэлектрики, немного смещаются или изменяют свою ориентировку. Эта способность электронов называется поляризуемостью атомов. Эти сдвиги выражаются формулами (1) и (1а).

Между поляризуемостью и показателем преломления существует связь, которая выражается через формулу Лоренц-Лоренца

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \frac{4\pi}{3} \cdot N \cdot a, \quad (2)$$

где N — число атомов в единице объема, а a — поляризуемость.

Поляризуемость зависит от частоты действующего поля по дисперсионному закону

$$a = \frac{e^2}{m} \cdot \frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2}, \quad (3)$$

где m — масса электрона, e — величина заряда.

Отсюда вышеприведенная формула (2) примет вид

$$\frac{n^2-1}{n^2+2} = N \cdot \frac{4\pi e^2}{3m(\omega_0^2 - \omega^2)}. \quad (4)$$

Формула (3) при $\omega = \omega_0$ теряет смысл, т. к. значение $a \rightarrow \infty$ парадоксально, что обусловлено пренебрежением затухания. При учете этого обстоятельства, формула (3) примет вид

$$a = \frac{e^2}{m} \cdot \frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2 + i\omega\beta}, \quad (5)$$

где β — постоянная затухания колебаний.

При значениях $\omega_0 \neq \omega$ величиной β можно пренебречь и тогда выражение (5) преобразуется в формулу (3).

Однако в атоме, молекуле мы сталкиваемся с целым рядом собственных частот колебаний — $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_i$, в связи с чем формула (3) приобретает следующий вид:

$$a = \sum_i \frac{e_i^2}{m_i} \cdot \frac{1}{\omega_i^2 - \omega^2},$$

или, если примем $\frac{e_i^2}{m_i} = f_i \cdot \frac{e^2}{m}$,

$$a = \frac{e^2}{m} \cdot \sum_i \frac{f_i}{\omega_i^2 - \omega^2}, \quad (6)$$

где сумма всех f_i равна числу осцилляторов электронов в системе.

Подставив выражение поляризуемости (6) в формулу (2), получим формулу дисперсии света в ее общем виде

$$\frac{n^2-1}{n^2+2} = \frac{4\pi e^2}{3m} \cdot N \cdot \sum \frac{f_i}{\omega_i^2 - \omega^2}. \quad (7)$$

Все вышеприведенное относится к классической теории дисперсии света. Однако в анизотропной среде мы сталкиваемся с более сложными соотношениями, зачастую не поддающимися полному учету. В анизотропной среде число атомов в единице объема непостоянно и зависит от направления в кристалле. С другой стороны, в зависимости от направления меняется и поляризуемость, вследствие чего получаются различные значения f_i и ω_i . Таким образом, показатели преломления являются сложными функциями значений N и a , имеющих различное значение в определенных направлениях в кристалле, и поэтому справедливо, что $n_1 = f(N_1, a_1)$ и $n_2 = f(N_2, a_2)$.

Атомы, ионы или молекулы, составляющие кристаллы, являются анизотропными вибраторами. Анизотропный вибратор вместо одной собственной частоты колебаний имеет в трех вполне определенных взаимно перпендикулярных направлениях три отличные друг от друга собственные частоты ω_1, ω_2 и ω_3 . В случае одноосных кристаллов имеем две частоты, т. к. две из трех собственных частот совпадают.

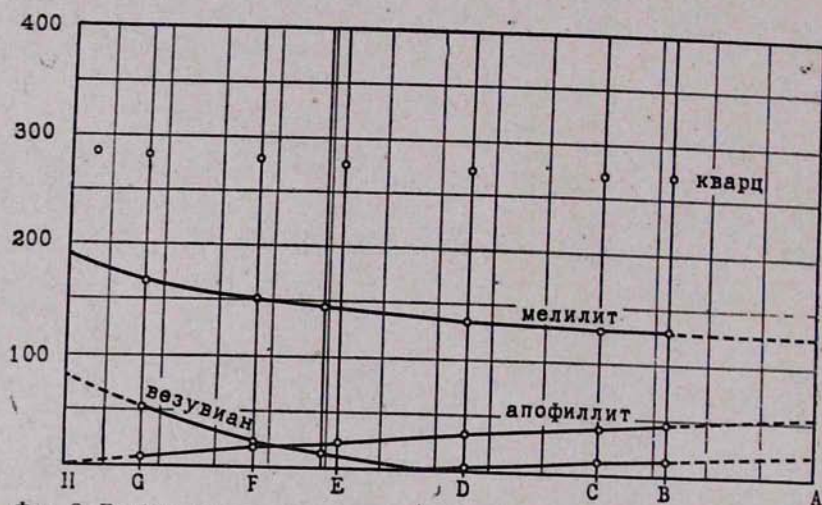
С возрастанием внешнего электромагнитного поля показатели преломления (n_g и n_p или n_m) возрастают, но в различной степени, в связи с чем отмечаются следующие возможные случаи:

1) n_g возрастает значительно быстрее, чем n_p . При этом с увеличением частоты колебаний ω (с уменьшением λ) происходит возрастание двупреломления.

2) n_p возрастает быстрее, чем n_g , и происходит уменьшение двупреломления по всей видимой области оптического спектра.

3) n_p возрастает значительно быстрее, чем n_g . Двупреломление уменьшается до некоторой спектральной линии, где кристалл становится изотропным, а затем вновь возрастает, но уже с обратным знаком.

Для огромного большинства анизотропных веществ изменение силы двупреломления довольно незначительно и не улавливается глазом, что хорошо иллюстрируется (фиг. 2) на примере кварца. Для небольшой части минералов изменение силы двупреломления в видимой части спектра очень велико и мы наблюдаем аномальную интерференционную окраску. Различные случаи изменения силы двупреломления видны на фиг. 2.



Фиг. 2. График дисперсии двупреломления минералов. По оси абсцисс λ в мμ, по оси ординат — разность хода в мμ.

Минералы, подобные мелилиту, для которых двупреломление уменьшается с возрастанием длины волны, обладают интерференционной окраской, названной Ф. Бекке сверхнормальной или супернормальной. Помимо мелилита, такое двупреломление имеют эпидот, цоизит и др.

У минералов, подобных апофиллиту, увеличение двупреломления происходит вместе с увеличением длины волны и наблюдается субнормальная интерференционная окраска. Здесь появляются оливково-зеленые и сине-фиолетовые цвета вместо светло-серых тонов (некоторые апофиллиты, хлориты и др.).

И, наконец, у таких минералов, как некоторые везувианы, хлориты и др., наблюдается аномальная интерференционная окраска, когда вместо стально-серых цветов первого порядка появляются тусклые индиго-во-синие и фиолетово-красные или сиреневые цвета. В этом случае двупреломление для определенной длины волны равно нулю и увеличивается в обе стороны.

Из всего ясно, что выделение указанных разновидностей можно сделать лишь исследуя минералы в монохроматическом свете.

Как известно, световая волна в двоякопреломляющей среде диспергируется на два потока, и разность их хода, определяющая наряду с толщиной шлифа величину двупреломления, служит одной из оптических констант, характеризующих минералы. Несмотря на высокую точность измерения разностей хода компенсаторами, сила двупреломления до последнего времени не играла большой роли по следующим причинам. Во-первых, колебания силы двупреломления, измеренной в белом свете, как правило, невелики. Во-вторых, константа двупреломления, выводимая из формулы $R=d(n_g-n_p)$, где R —разность хода, а d —толщина шлифа, не отличается достаточной точностью, поскольку определение толщины шлифа затруднительно и притом приближенно. Исключение из расчетов толщины шлифа открыло бы широкие возможности в деле диагностики минералов.

С этой целью Е. А. Кузнецов использовал силу двупреломления, устранив величину двупреломления, как таковую, путем исследования дисперсии двупреломления в минералах, определяя разности хода световых волн различной длины. Измерение разностей хода световых волн различной длины с использованием интерференционных светофильтров или монохроматора производится при помощи компенсатора с высокой точностью. Получив разность хода для одного и того же минерала в одной и той же точке для различных длин волн и, сопоставив их с какой-либо из них, принятой за стандартную, получим коэффициенты дисперсии.

И действительно, если имеем

$$R_1 = d(n'_g - n'_p) \text{ и } R_2 = d(n''_g - n''_p),$$

где разности хода выражены в миллимикронах, то

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{d(n'_g - n'_p)}{d(n''_g - n''_p)},$$

а при выражении разности хода в волнах $\frac{r_1 \cdot \lambda_1}{r_2 \cdot \lambda_2} = \frac{n'_g - n'_p}{n''_g - n''_p}$.

$$K\delta = \frac{r_1}{r_2} = \frac{(n'_g - n'_p) \cdot \lambda_2}{(n''_g - n''_p) \cdot \lambda_1}.$$

Таким образом, коэффициент дисперсии двупреломления представляет собою отношение разностей хода волны какого-либо цвета (или

иначе какой-либо длины) и разности хода волны, принятой за стандартную.

При исследовании минерала колеблющегося состава кривая дисперсии, полученная для разных длин волн, имеет характерные максимумы, которые находятся в связи с составом, а также структурой минерала.

Здесь мы не останавливаемся подробнее на вопросах методического характера и техники работы, поскольку они в полной мере изложены в соответствующей литературе [5, 6, 8, 12, 14]. Представляется необходимым подчеркнуть лишь то обстоятельство, что для применения метода необходима простая аппаратура (поляризационный микроскоп, компенсатор КПК или Берека и набор светофильтров), позволяющая использовать его в любой петрографической лаборатории.

Кратко остановимся на результатах работ, проведенных по методу Е. А. Кузнецова.

Первоначально применение метода мыслилось со стороны автора в приложении его для определения химического состава минералов непосредственно в шлифах горных пород оптическим путем. Как можно будет в дальнейшем убедиться, применение метода вышло далеко за пределы тех задач, для решения которых он предназначался.

Как и следовало ожидать, первыми объектами исследований по методу Е. А. Кузнецова стали минералы сложного состава, для которых характерны изоморфные замещения элементов. К их числу в первую очередь надо отнести амфиболы [7, 10, 14, 21] и пироксены [14, 25]. Здесь необходимо оговориться, что наличие в этих группах минералов различного состава с самого начала ставит вопрос о построении диаграмм связи «состав—дисперсия двупреломления», для каждой серии в отдельности. Действительно, они отличаются друг от друга не только в химическом составе, но и в структурном отношении, что и подтверждается данными дисперсии двупреломления, полученными для них.

Помимо этих групп минералов, методом сравнительной дисперсии двупреломления были исследованы мусковиты [12], биотиты и флогопиты [6, 14], бериллы [11, 14], апатиты [14], цирконы [14], клиногумиты [14], ромбические пироксены [14], хлориты [2, 14], калиевые полевые шпаты [25].

Для всех минералов отмечается высокая точность определения компонентов и в первую очередь тех, которые содержатся в их составе в небольшом количестве в качестве примесей. Так, для бериллов методом Е. А. Кузнецова определяются не только главные окислы, но и редкие и рассеянные щелочные элементы (литий, рубидий, цезий). Аналогичная картина наблюдается и для необия, ванадия и гафния в цирконах.

В этой связи интересно упомянуть работу У Цзунь-суй [20] по применению метода Е. А. Кузнецова для исследования зональных цирконов из щелочных пород Октябрьского массива Донецкой области. Автором были определены составы и циркониево-гафниевые отношения для центральных и краевых зон. В результате этих работ было выяснено, что величина циркониево-гафниевого отношения в центральной части зональных цирконов выше, чем в краевой части зерна этого минерала. Изученный материал привел У Цзунь-суя к ряду выводов геохимическо-

го характера, которые представляют определенный теоретический интерес.

Интересные исследования были поставлены И. И. Эдельштейном и А. А. Гониной [26] для изучения поведения никеля в процессе серпентинизации.

Вышеприведенные примеры указывают на возможность определения в составе ряда главнейших порообразующих минералов наиболее характерных элементов-примесей, что имеет большое геохимическое значение для решения ряда петрологических вопросов.

Е. А. Кузнецовым было замечено, что «элементы, изоморфно замещающие друг друга, дают на диаграммах линии, наклоненные в противоположные стороны... это особенно ясно видно в тех случаях, когда оба изоморфных компонента определяются при одном и том же светофильтре, что, вероятно, связано с одинаковым координационным положением элементов» [14]. Этот взаимный наклон линий на диаграммах, свидетельствующий о изоморфизме элементов, служит в определенной степени критерием в тех случаях, когда вопрос об изоморфизме неясен. Это привело к мысли о структурном анализе анизотропных минералов путем построения поверхностей коэффициентов дисперсии (K_d). Это достигается нанесением значений K_d на проекционную сетку Вульфа или Шмидта и их обработкой по правилам петротектоники. На разрезах выделяются максимумы, которые отражают расположение атомов в структурах минералов. Подобные исследования были проведены для мусковита, актинолита, берилла, хлорита, по которым получены очень интересные результаты, свидетельствующие о больших возможностях метода сравнительной дисперсии двупреломления в вопросах выяснения структурных особенностей минералов. В этой связи встает вопрос об исследовании плагиоклазов в широком диапазоне состава от альбита до анортита, поскольку для них Э. П. Изохом и Ю. В. Казисыным [4] было высказано мнение о наличии структурной прерывистости в ряду плагиоклазов. Здесь мы не останавливаемся подробно на технике работы и полученных данных, поскольку они детально освещены в печати [8, 11, 12, 13, 14].

Работая по исследованию зависимости между химическим составом минералов и дисперсией двупреломления, Е. А. Кузнецов и автор настоящей статьи пришли к заключению, что методом сравнительной дисперсии двупреломления с большой точностью определяются содержания компонентов, находящихся в небольшом количестве в составе минералов. Именно это обстоятельство навело на мысль о возможности определения незначительных количеств аргона в минералах. Работы в этом направлении проводились Е. А. Кузнецовым применительно к биотитам, а нами — по калиевым полевым шпатам. Выяснилась высокая чувствительность метода и точность определения содержания искомого аргона (Ar^{40}). Поскольку содержания калия как в биотитах, так и в полевых шпатах определялись по ранее выработанным диаграммам, то по соотношению Ar^{40}/K^{40} по специальным таблицам получаем абсолютный возраст исследуемого минерала. Соответствующие диаграммы для определения содержаний Ar^{40} и K^{40} приведены в литературе [15, 16, 22].

Дальнейшим шагом в развитии метода для определения абсолютного возраста минералов оптическим путем явилась особенность, выявленная Е. А. Кузнецовым [15], а именно, «зависимость между дисперсией двупреломления и элементами возрастных определений биотитов лучше выявляется, если сравнивать изменение дисперсии прямо с калий-аргоновым отношением». Это намного упрощает расчеты, так как в этом случае нет необходимости в получении данных содержания Ar^{40} и K^{40} и позволяет, минуя промежуточные расчеты, прямо определять абсолютный возраст минералов по диаграммам «дисперсия—возраст».

Выявленная закономерность была применена при исследовании плагиоклазов, участвующих в сложении подавляющего большинства горных пород и роговых обманок, что позволяет применить метод оптического определения абсолютного возраста в широких масштабах [23, 24]. Полученные данные свидетельствуют о высокой точности определений при небольшой затрате времени.

Надо учесть одно важное обстоятельство, что в данном случае необходимо работать с двумя светофильтрами, а не с четырьмя, как раньше, и это, естественно, намного повышает точность определений.

Обобщая результаты исследований по применению метода сравнительной дисперсии двупреломления, мы можем констатировать возможность определения абсолютного возраста по биотитам, калиевым полевым шпатам, пироксенам, плагиоклазам, роговым обманкам, что позволяет определять возраст почти всех изверженных пород по какому-либо из этих минералов. В некоторых случаях при наличии в породе двух и более минералов (для которых выработаны диаграммы) имеется возможность взаимного контроля данных, что имеет большое практическое значение.

Таким образом, здесь мы вкратце разобрали три основных направления, развиваемых по методу сравнительной дисперсии двупреломления:

- а) по определению химического состава пороодообразующих минералов;
- б) по структурному анализу,
- в) по определению абсолютного возраста минералов.

Однако это не исчерпывает возможности метода, а, наоборот, предполагает дальнейшее развитие каждого из них в отдельности, как и метода в целом.

Самое важное в методе — это оптическое определение под микроскопом в шлифах горных пород, без необходимости выделения из пород мономинеральных фракций (что не всегда возможно) и производства дорогостоящих анализов. Это позволяет при петрографо-минералогических исследованиях определять большое количество данных, дающих богатый материал по геохимии отдельных элементов; проследить изменение концентраций определенных редких и рассеянных элементов в минералах в процессе развития магматического очага, не говоря уже о главных компонентах, а также ряд других петрологических вопросов.

Если ко всему этому добавить быстроту определений данных и их высокую точность, то становится очевидной необходимость широкого внедрения этого прогрессивного метода в практику петрографо-минералогических работ. Метод Е. А. Кузнецова открывает новый этап в практике минералогических исследований и его дальнейшее развитие и распространение позволят сделать интересные выводы по ряду вопросов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Буриков Е. В., Кузнецов Е. А. Некоторые вопросы теории и практики метода сравнительной дисперсии двупреломления. Госгеолтехиздат, в сб. «Новые методы в минералогии и петрографии и результаты их применения», 1963.
2. Буриков Е. В. Дисперсия двупреломления хлоритов и их состав. Изв. ВУЗов, геология и разведка, № 9, 1963.
3. Гинзбург И. В. Оптические свойства амфиболов и пироксенов—показатели особенностей их кристаллического строения. Госгеолтехиздат, в сб. «Новые методы в минералогии и петрографии и результаты их применения», 1963.
4. Изох Э. П. и Казницын Ю. В. Структурная прерывистость в ряду альбит-анортит и петрографическое значение плагиоклазов различного структурного типа. Зап. Всес. минералог. об-ва, вып. 3, 1959.
5. Кузнецов Е. А. О дисперсии двупреломления. Изв. ВУЗов, геология и разведка, № 1, 1959.
6. Кузнецов Е. А. Дисперсионный метод анализа минералов. Научн. доклады, Высшей школы, № 2, 1959.
7. Кузнецов Е. А. Дисперсия двупреломления некоторых амфиболов (автореферат доклада), БМОИП, отд. геол., 34, № 2, 1959.
8. Кузнецов Е. А. Дисперсия двупреломления некоторых слюд ряда флогопита-биотита. Вест. МГУ, сер. геол., № 2, 1960.
9. Кузнецов Е. А. Чеховских М. М. О составе и дисперсии двупреломления клинохлора из Карабаша на Урале. Вест. МГУ, сер. геол., № 4, 1960.
10. Кузнецов Е. А. Еще о дисперсии двупреломления и химическом составе амфиболов из кварцевых диоритов и из габбро Урала. Вест. МГУ, сер. геол., № 5, 1960.
11. Кузнецов Е. А., Ли Чжао-лин. Дисперсия двупреломления, химический состав и структура бериллов. Вест. МГУ, сер. геол., № 6, 1960.
12. Кузнецов Е. А. Дисперсия двупреломления и структура мусковита. Вест. МГУ, сер. геол., № 1, 1961.
13. Кузнецов Е. А. Метод сравнительной дисперсии двупреломления. Вест. МГУ, сер. геол., 5, 1961.
14. Кузнецов Е. А. Метод сравнительной дисперсии двупреломления. Госгеолтехиздат, М., 1962.
15. Кузнецов Е. А., Чибухчан З. О. О возможности определения абсолютного возраста горных пород методом сравнительной дисперсии двупреломления. Советская геология, № 2, 1963.
16. Кузнецов Е. А. Абсолютная геохронология и оптика. Вест. МГУ, сер. геол., № 2, 1963.
17. Кузнецов Е. А. О составе цирконов в некоторых интрузивных породах Урала и их цирконий-гафнийном отношении. Госгеолтехиздат. В сб. «Новые методы в минералогии и петрографии и результаты их применения», 1963.
18. Кузнецов Е. А. О возможности определения возраста горных пород методом сравнительной дисперсии двупреломления. Госгеолтехиздат. В сб. «Новые методы в минералогии и петрографии и результаты их применения», 1963.
19. Кузнецов И. Е. Опыт применения дисперсионного метода анализа минералов для изучения габбро-диоритового массива горы Круглой (Южный Урал). Вест. МГУ, сер. геол., вып. 1, 1962.

20. У Цзунь-суй. Щелочные породы Октябрьского массива Донецкой области и их взаимоотношение с основными породами. Автореферат диссертации, М., 1963.
21. Чибухчан З. О. О методе сравнительной дисперсии двупреломления и дисперсия двупреломления роговых обманок. Гостеолтехиздат. В сб. «Новые методы в минералогии и петрографии и результаты их применения», 1963.
22. Чибухчан З. О. К вопросу о возможности определения абсолютного возраста калиевых полевых шпатов методом сравнительной дисперсии двупреломления. Гостеолтехиздат. В сб. «Новые методы в минералогии и петрографии и результаты их применения», 1963.
23. Чибухчан З. О. Об определении абсолютного возраста плагиоклазов методом сравнительной дисперсии двупреломления. ДАН Арм. ССР, т. 37, № 4, 1963.
24. Чибухчан З. О., Хоренян Р. А. Об определении абсолютного возраста роговых обманок методом сравнительной дисперсии двупреломления. ДАН Арм. ССР, т. 37, № 5, 1963.
25. Чибухчан З. О., Хоренян Р. О. составе и дисперсии двупреломления калиевых полевых шпатов и моноклинных пироксенов. Изв. АН Арм. ССР, сер. геол., № 3, 1964.
26. Эдельштейн И. И., Гонина А. А. Изучение миграции никеля в процессе серпентинизации ультрабазитов путем определения сравнительной дисперсии двупреломления методом Е. А. Кузнецова. Методические материалы для лабораторий Геологических управлений и экспедиций, М., 1963.