

МЕТАМОРФИЗМ ВЫСОКИХ И СВЕРХВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЙ

УДК 552.55(234.31)

УЛЬТРАБАРИЧЕСКИЕ МЕТАМОРФИЧЕСКИЕ ПОРОДЫ МАССИВА ДОРА-МАЙРА
(Западные Альпы): КАТОДОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЙ АНАЛИЗ КРЕМНЕЗЕМА
И ДВОЙНИКОВАНИЕ КОЭСИТА

Г.-П. Шертл, О. Меденбах, Р.Д. Нойзер

Институт геологии, минералогии и геофизики, Рурский университет в Бохуме, 44780, Бохум, Германия

Катодолюминесцентная (КЛ) микроскопия с горячим катодом успешно используется для распознавания различных фаз кремнезема и различных генераций одного и того же продукта изменения коэсита. Исследуемый тип породы — мелкозернистый пироповый кварцит из Париджи, массив Дора-Майра, Италия. Включения коэсита в пиропе люминесцируют ярким голубовато-зеленым светом, тогда как частоклопоподобные продукты изменения кварца имеют неровный коричневато-фиолетовый цвет. Трещины в коэсите выполнены кварцем, люминесцирующим коричневым светом, что говорит о разном времени их образования. Для кварца основной массы характерна ровная темно-синяя люминесценция. Тонкозернистый, частично волокнистый халцедон, трудно отличимый от продуктов изменения кварца в коэсите, под поляризационным микроскопом люминесцирует ярким желто-коричневым светом. Следовательно, даже мелкие кристаллы коэсита можно легко отделить от различных стадий кварца или от халцедона благодаря характерному катодолюминесцентному свечению. Таким образом, катодолюминесцентная микроскопия — это эффективный и недорогой метод для определения хронологической последовательности изменения кремнезема и выявления отличительных особенностей минералов, которые в других случаях могли остаться незамеченными.

Двойникование метаморфического коэсита напоминает полисинтетический плагиоклаз с отдельными зернами, прорастающими по механизму альбита и периклина. Обнаружено два соответствующих типа пластинок, пересекающихся приблизительно под прямым углом. Они прорастают по плоскостям (021) и (–101).

Кремнезем, коэсит, катодолюминесцентный анализ, Западные Альпы.

UHP METAMORPHIC ROCKS FROM DORA-MAIRA (*Western Alps*):
CATHODOLUMINESCENCE OF SILICA AND TWINNING OF COESITE

H.-P. Schertl, O. Medenbach, and R.D. Neuser

Hot cathode cathodoluminescence (CL) microscopy is used as a powerful tool to distinguish between different silica phases and between different generations of the same breakdown product of coesite. The rock type investigated is a fine-grained pyrope-quartzite from Parigi, Dora Maira Massif, Italy. While coesite inclusions within pyrope display bright bluish-green luminescence colors, their palisade-like breakdown products of quartz are characterized by heterogeneously brownish-violet colors. Cracks within coesite are filled with quartz, which shows brown luminescence colors indicating a different generation. Quartz of the matrix exhibits a homogeneously dark-blue luminescence. Fine-grained, partly also fibrous chalcedony, which is difficult to distinguish from quartz breakdown products of coesite under the polarizing microscope, shows bright brownish-yellow luminescence colors. Consequently, even tiny crystals of coesite can easily be separated from different quartz generations or chalcedony due to their characteristic CL emission. Thus, CL-microscopy is an elegant and inexpensive method to discover chronological breakdown sequences of silica and to develop specific features and informations of minerals which may have become otherwise overlooked.

Twinning of metamorphic coesite resembles of polysynthetic plagioclase exhibiting albite- and pericline-law individuals. Two respective types of lamellae were identified, which intersect each other at an angle of ca. 90°; they are twinned after (021) and (–101).

Silica, coesite, cathodoluminescence, Western Alps

ВВЕДЕНИЕ

С тех пор как в лаборатории компании „Нортон“ синтезировали новую высокобарическую полиморфную модификацию кремнезема, минерал коэсит неоднократно оказывался в центре важных геологических событий. Находка природного коэсита в метеоритном кратере Аризона [1] послужила доказательством

ударного метаморфизма, обусловленного падением метеорита. Позднее коэсит был обнаружен в метаморфических породах, образовавшихся в результате ядерного взрыва [2].

Еще один революционный поворот в науках о Земле произошел в 1984 г., когда находка природного коэсита в ультрабарических метаморфических породах массива Дора-Майра (Западные Альпы) послужила доказательством сверхглубокой субдукции (и эксгумации) бывших коровых пород [3]. Дальнейшее исследование коэсита сосредоточилось на следующих аспектах: парагенезис, экссолюционные структуры коэсита в пироксене и титаните [4—6], влияние ОН на кинетику перехода от коэсита к кварцу [7], кинетика преобразования кварца в коэсит [8], зависимость растворимости ОН от давления [9], роль инфильтрации флюидов [10], современное аномальное давление в коэситовых включениях [11—13], частоколообразный кварц как типичный продукт изменения [14, 15], экспериментальные исследования реологии поликристаллического коэсита [16], изотопия кислорода [17] и т. д.

Данное исследование посвящено катодной люминесценции коэсита и продуктов его изменения из ультрабарических метаморфических пироп-кварцитовых пород массива Дора-Майра. Поскольку люминесценция возникает даже при малейших изменениях в составе или структуре минерала, мы использовали КЛ микроскоп не только для того, чтобы распознавать разные минеральные фазы, но и для того, чтобы характеризовать различные стадии продукта изменения коэсита. Предпосылки к применению КЛ в геологии и информация о ее физическом базисе предоставлены рядом авторов [18—21]. Недавно был опубликован общий обзор по КЛ ультрабарических пород массивов Дора-Майра и Кокчетавский [22].

Другая тема этой статьи — двойникование коэсита. Из-за размеров его моноклинной, но почти гексагональной ячейки ($a = 7,136 \text{ \AA}$, $b = 12,369 \text{ \AA}$, $c = 7,174 \text{ \AA}$, $\beta = 120,34^\circ$ [23]) коэсит проявляет отчетливую тенденцию к двойникованию. Первые данные были опубликованы еще в 1955 г. Л. Рамсделлом [24], который описал двойникование синтетического коэсита, обнаруженное при рентгенокопии.

АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Исследования по катодолюминесценции были выполнены при помощи микроскопа с горячим катодом, который был разработан в Рурском университете Бохума. Микроскоп позволяет исследовать тот же тип шлифа (отполированного и покрытого углеродом), какой обычно используется для измерений электронным микроскопом. Рабочие условия следующие: энергия пучка 14 кэВ, плотность тока пучка — около 9 мкА/мм^2 (подробнее см. [22]). Важно отметить, что не только следы примесей и структурные дефекты или различные кристаллографические направления могут оказать влияние на люминесцирующий цвет, но также и температура образца. В итоге, даже один и тот же образец может показывать различия в цвете и(или) интенсивности в зависимости от типа используемого микроскопа или покрытия (золото, углерод). Двойникование коэсита изучали, используя универсальный столик.

ПЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ ФОН

Исследуемые образцы были отобраны на „классическом“ обнажении Париджи массива Дора-Майра (Западные Альпы) [3, 25]. Исследования проводились на пироповых кварцитах, которые раньше рассматривались как „пироповые коэсититы“ в ультрабарических условиях метаморфизма. Основные компоненты — пироп, кварц, фенгит, тальк и кианит с минимальным количеством коэсита и жадеита. Породы можно разделить на два типа: тонкозернистая — с пиропами, достигающими размера 1,5 см, и грубозернистая — с кристаллами пироба до 25 см. Хотя границы между этими типами размыты, имеются существенные различия, связанные с их минеральными включениями. Примечательно, что мелкие пиропы обычно содержат включения коэсита(кварца), фенгита, кианита, талька, циркона, рутила, монацита и турмалина, тогда как в крупных пиробах нет кремниевой фазы.

Коэситовые включения обычно окружены каемкой ретроградного кварца в виде частокола. Вмещающий пироп имеет радиальные трещины, образующиеся при увеличении объема в результате перехода от коэсита к кварцу (рис. 1,а). Включения в крупных пиробах — это хлорит, тальк, кианит, натровый амфибол, вермикулит, апатит, циркон, рутил, монацит, турмалин и, самое главное, элленбергерит и дюмортьерит [25].

Различные парагенезисы минеральных включений в крупных и мелких гранатах являются, по существу, продуктом двух реакций пиропообразования. Если мегакристаллы пироба образуются в результате реакции хлорит + кианит + тальк = пироп + вода (первая реакция пиропообразования), то мелкие пиропы растут вместе с коэситом на более поздней стадии в ультрабарических условиях метаморфизма, когда протекает реакция тальк + кианит = пироп + коэсит + вода (вторая реакция пиропообразования; дополнительную информацию см. [25]). Максимальные значения температуры были 750°C , а давления — 35 кбар [25, 26].

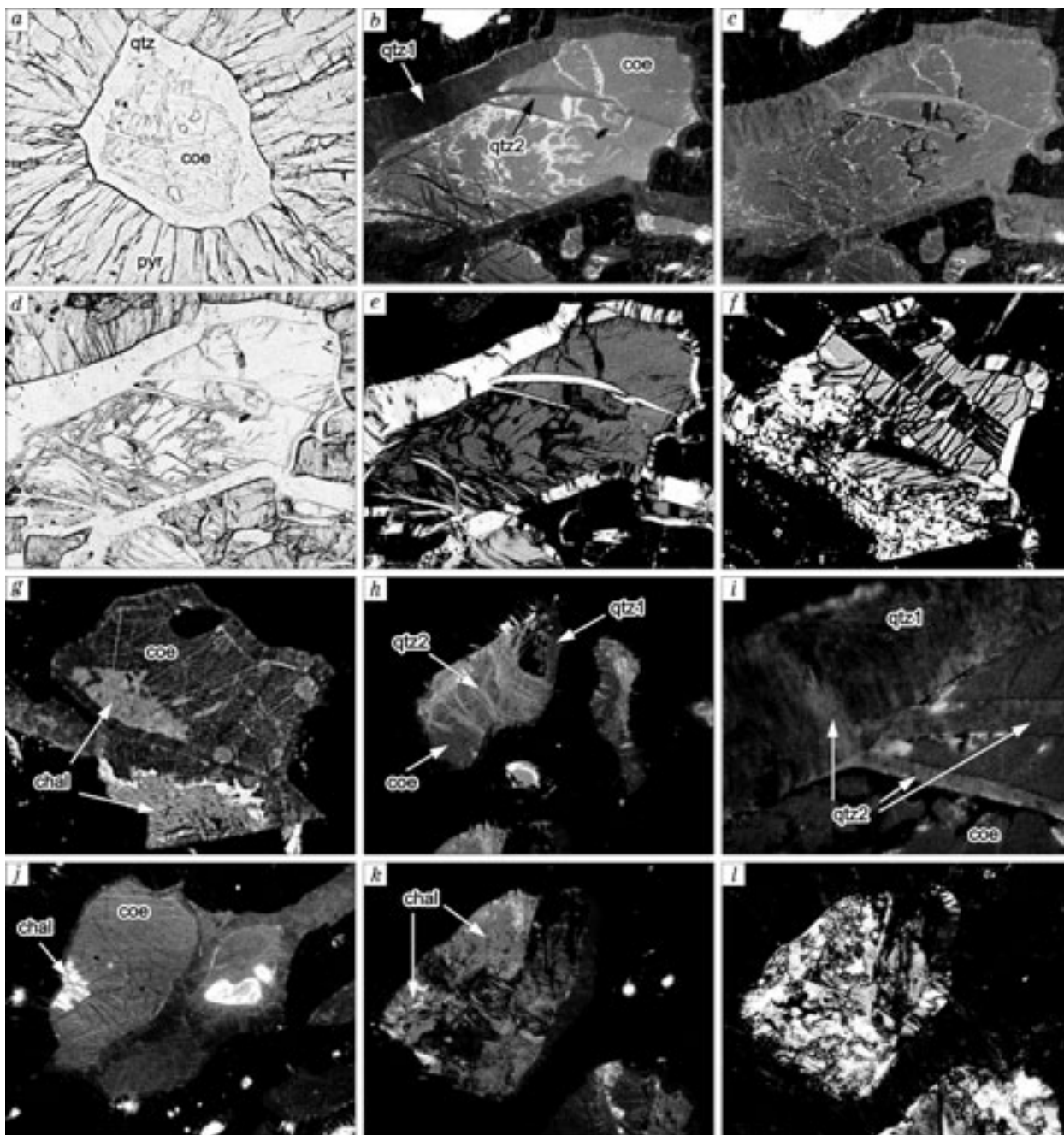


Рис. 1. Включения коэсита в гранате.

Пояснения — в тексте.

Исследуемый здесь тип породы — тонкозернистый пироповый кварцит, содержащий мелкие гранаты с коэситовыми (кварцевыми) включениями. В исключительно редких случаях диаметр мелких пиропов, обычно составляющий 1,5 см, достигает 3 см. Примечательно, что в таких пиробах чаще всего отмечаются двойники коэсита. Хотя двойникование коэсита довольно редкое явление, изучать его легко, поскольку кристаллы могут достигать размера около 8 мм.

КАТОДОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ: НАБЛЮДЕНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Обычно люминесцентные цвета фаз SiO_2 изменяются в широком диапазоне [20, 27]. Поскольку люминесценция возникает при малейших изменениях в составе или структуре минерала, метод КЛ может быть полезен не только для распознавания различных полиморфов SiO_2 , но и для выделения различных генераций одного и того же полиморфа.

Обычно коэзит люминесцирует голубовато-зеленым светом (см. рис. 1, *b, c*; линейный поляризованный свет и скрещенные николи см. рис. 1, *d, e*) и окружен частоколом коричневатого-фиолетового кварца. Если коэзит образует мелкие включения в тяжелых минералах без ретроградной каемки в виде кварцевого частокола, то довольно трудно отделить коэзит от кварца без использования дорогостоящих методов, таких как раман-спектроскопия [4, 28]. Однако КЛ-микроскопия — очень эффективный и простой способ, позволяющий отличать яркий голубовато-зеленый люминесцирующий коэзит от коричнево-фиолетового, красноватого или темно-голубого кварца. Двойникование коэзита также представляет интерес в связи с получающимися цветами люминесценции. Хотя сдвоенные ламеллы видимы под скрещенными николями (см. рис. 1, *f*), никакой разницы в люминесцентном цвете не наблюдается (см. рис. 1, *g*). В случае же сдвойникового кианита плоскость двойникования хорошо различима, поскольку каждая ламелла имеет свой цвет люминесценции [22, рис. 1, *b*], что, возможно, связано с различной степенью поглощения из-за разной кристаллографической ориентации.

Кварц люминесцирует разным светом в зависимости от того, находится ли он в основной массе, образует частокол вокруг включений коэзита или выполняет трещины в коэзите. Хотя, по меньшей мере, две разновидности кварца, из основной массы и частокола, должны быть коэзитом в условиях ультрабарического метаморфизма, они отличаются по цвету люминесценции. В то время как кварц основной массы имеет устойчивый синий цвет, кварц частокола — коричневатого-фиолетовый (см. рис. 1, *b, g, i*), переходящий в коричневатый-красный по мере увеличения времени эмиссии (см. рис. 1, *c*). Особенно интересно, что в противоположность однородному цвету кварца основной массы, отдельные кристаллы частокола различаются по цвету, и поэтому при использовании КЛ структура частокола хорошо различима. Выполненные кварцем трещины в коэзите имеют коричневый цвет люминесценции (см. рис. 1, *i, h, qtz2*; и рис. 1, *b, c*). Этот кварц отличается от обеих вышеупомянутых разновидностей.

В ходе проверки многочисленных шлифов тонкозернистых пироповых кварцитов внутри коэзитовых (кварцевых) включений в пиропе был обнаружен минерал, люминесцирующий ярким коричневатожелтым светом (см. рис. 1, *g, j, k*). Позднее было показано, что это халцедон [22, рис. 1, *e*]. Он мог оставаться незамеченным, поскольку его трудно отличить от кварца под поляризационным микроскопом из-за одинаковых показателей преломления и двупреломления. При тщательном рассмотрении различных халцедонсодержащих включений в пиропе оказалось, что халцедон способен замещать коэзит после образования частоколоподобного кварца, при этом никак его не изменяя. С другой стороны, даже внутри одного и того же включения SiO_2 сам частоколоподобный кварц может быть замещен халцедоном (см. рис. 1, *g*). Это свидетельствует о том, что халцедон представляет собой кремниевую фазу, образовавшуюся на очень поздней стадии во время эксгумации. Это согласуется с последними данными Дж. Мозенфельдера и др. [10], полученными при помощи фурие-спектроскопии в ИК диапазоне с использованием того же материала, что описан в данной статье. Они показали, что кремниевые фазы типа халцедона или опала (см. рис. 1, *k*) образовывались при низкой температуре после разрушения вмещающей фазы, открывающей дорогу для инфильтрации флюидов. Что же касается частоколоподобного кварца, то предполагается, что он образуется при высокой температуре в процессе расширения вмещающего минерала (см. рис. 1, *a*) в сухих или почти сухих условиях.

Коричневый люминесцирующий кварц, наблюдаемый в трещинах коэзита, также представляет собой позднюю генерацию кремнезема. Данные просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), полученные Дж. Ингрином и П. Жиллетом [29], позволяют считать, что этот кварц образовался, по всей видимости, в результате просачивания флюидов $\text{H}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ и не является ретроградным коэзитом. Однако во вмещающем гранате не было обнаружено выполняющих трещины кварца. В последних работах Ф. Лангенхорста и Дж. Пуарье [30] при помощи ПЭМ был обнаружен частоколоподобный кварц, отличающийся высокой плотностью дислокаций и наличием многочисленных бразильских двойников прорастания параллельно плоскостям $\{10\bar{1}1\}$. Наряду с приведенным выше объяснением различий в цвете люминесценции одного и того же минерала, следует учитывать также и степень поляризации. Например, излучение КЛ параллельно и перпендикулярно оси *c* кварца может быть различным [31] и выражаться в разной степени интенсивности КЛ. Отчасти это может быть справедливо для частоколоподобного кварца. С другой стороны, кварц основной массы не проявляет никакого поляризующего эффекта вследствие кристаллографически различной ориентации кристаллов. Таким образом, некоторые вопросы остаются открытыми, и их еще предстоит решить. Во избежание субъективности при интерпретации цвета люминесценции, можно также разработать спектры различных типов кремнезема, используя КЛ микроскоп (см. рис. 1).

ДВОЙНИКОВАНИЕ КОЭСИТА

Еще Л. Рамсделл [24] описал кристаллы коэзита, сдвойникованные по плоскостям (100) и (021), которые он обнаружил при рентгеноскопических исследованиях. К. Склэр и др. [32] синтезировали псевдогексагональные пластинки, которые были уплощены параллельно (010). Эти авторы наблюдали

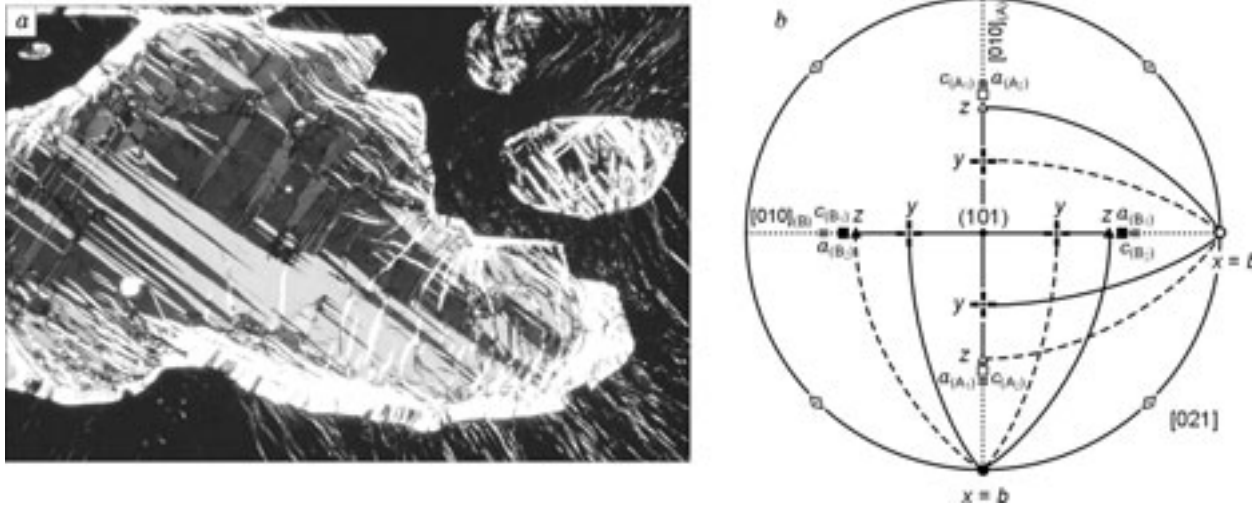


Рис. 2. Полисинтетические двойники коэсита (а) и стереографическая проекция (b).

контактные двойники коэсита практически во всех опытах и подтвердили, что плоскостью двойникового является (021). С. Нака и др. [33] установили два новых типа коэситовых двойников на материале, синтезированном из аморфного кремнезема, кристобалита или кварца. При оптических исследованиях было показано, что плоскостями двойникового являются $(\bar{1}21)$ и $(\bar{2}33)$. Здесь интересно отметить, что двойники прорастания, которые наблюдали японские исследователи, чаще всего встречаются в опытах без воды. При тех же условиях, но при наличии воды, были получены только монокристалльные зерна коэсита. С. Нака и др. [33] также показали, что синтез коэситовых двойников невозможен без воды при давлении 30 кбар и температуре 900 °С, тогда как при тех же условиях, но при более высоких температурах (1300 °С), двойникование происходило. Позже А. Бурре и др. [34] описали микродвойникование по плоскости (100), обнаруженное при помощи электронной микроскопии высокого разрешения.

Двойник коэсита из пироп-кварцитовых пород массива Дора-Майра напоминает полисинтетический плагиоклаз, состоящий из отдельных кристаллов, сростшихся по альбитовому и периклиновому законам [35, рис. 2]. В метаморфических коэситах массива Дора-Майра были обнаружены два соответствующих типа ламеллей; плоскости их двойникового пересекаются приблизительно под прямым углом. Ламелли сростаются по плоскостям (021) и $(\bar{1}01)$ (рис. 2), причем последняя наблюдалась в природном коэсите впервые. Аналогичное двойникование коэсита из гроспидита рудника „Робертс Виктор“ было описано недавно Ф. Лангенхорстом [36, рис. 6], который обнаружил кимберлитовый коэсит, подвергшийся пластической деформации, тогда как коэсит из массива Дора-Майра имеет мало признаков деформации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Хотя описанные катодоллюминесцентные исследования пироп-кварцитовых пород были направлены главным образом на изучение минеральных включений кремнезема, в данном конкретном случае они привели к удивительным результатам: было установлено присутствие халцедона и опала, заменивших кремнезем в ультрабарических породах. Кроме того, легко распознаются возможные стадии разнообразных продуктов изменения коэсита, поскольку разные генерации одной и той же разновидности минерала вроде кварца имеют разные цвета люминесценции. Таким образом, катодоллюминесцентная микроскопия помогает расшифровать различные „ретроградные события“ и лучше понять взаимодействие между флюидами и породами во время эксгумации пород, особенно если эти исследования подкрепляются изучением флюидных включений с использованием фурье-спектроскопии ИК-диапазона.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Chao E.C.T., Shoemaker E.M., Madsen B.M.** First natural occurrence of coesite from Meteor Crater, Arizona // *Science*, 1960, v. 132, № 3421, p. 220—222.
2. **Shoemaker E.M.** Impact mechanics at Meteor Crater, Arizona // *The Moon, Meteorites and Comets* / B.M. Middlehurst, G.P. Kuiper (eds.). Chicago, Illinois, Univ. Chicago Press, 1963, p. 301—306.
3. **Chopin C.** Coesite and pure pyrope in high-grade blueschists of the Western Alps: A first record and some consequences // *Contr. Miner. Petrol.*, 1984, v. 86, p. 107—118.

4. **Zhang L., Song S., Liou J.G. et al.** Relict coesite exsolution in omphacite from Western Tianshan eclogites // *China Amer. Miner.*, 2005, v. 90, p. 181—186.
5. **Zhu Y.F., Ogasawata Y.** Phlogopite and coesite exsolution from super-silicic clinopyroxene // *Inter. Geol. Rev.*, 2002, v. 44, p. 831—836.
6. **Ogasawara Y., Fukasawa K., Maruyama S.** Coesite exsolution from supersilicic titanite in UHP marble from the Kokchetav Massif, northern Kazakhstan // *Amer. Miner.*, 2002, v. 87, p. 454—461.
7. **Lathe C., Koch-Müller M., Wirth R. et al.** The influence of OH in coesite on the kinetics of the coesite-quartz phase transition // *Amer. Miner.*, 2005, v. 90, p. 36—43.
8. **Perrillat J.P., Daniel I., Lardeaux J.M., Cardon H.** Kinetics of the coesite-quartz transition: application to the exhumation of ultrahigh-pressure rocks // *J. Petrol.*, 2003, v. 44, p. 773—788.
9. **Mosenfelder J.L.** Pressure dependence of hydroxyl solubility in coesite // *Phys. Chem. Miner.*, 2000, v. 27, p. 610—617.
10. **Mosenfelder J.L., Schertl H.-P., Smyth J.R., Liou J.G.** Factors in the preservation of coesite: the importance of fluid infiltration // *Amer. Miner.*, 2005, v. 90, p. 779—789.
11. **Parkinson C.D., Katayama I.** Present-day ultrahigh-pressure conditions of coesite inclusions in zircon and garnet: evidence from laser Raman microspectroscopy // *Geology*, 1999, v. 27, p. 979—982.
12. **Sobolev N.V., Fursenko B.A., Goryainov S.V. et al.** Fossilized high pressure from the Earth's deep interior: the coesite-in-diamond barometer // *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2000, v. 97, p. 11875—11879.
13. **Ye K., Liou J.-B., Cong B., Maruyama S.** Overpressures induced by coesite-quartz transition in zircon // *Amer. Miner.*, 2001, v. 86, p. 1151—1155.
14. **Giller P., Ingrin J., Chopin C.** Coesite in subducted continental crust: *P-T* history deduced from an elastic model // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1984, v. 70, p. 426—436.
15. **Molen I. van der, Roermund H.L.M. van.** The pressure path of solid inclusions in minerals: the retention of coesite inclusions during uplift // *Lithos*, 1986, v. 19, p. 317—324.
16. **Renner J., Stöckhert B., Zerbian A. et al.** An experimental study into the rheology of synthetic polycrystalline coesite aggregates // *J. Geophys. Res.*, 2001, v. 106, № B9, p. 19411—19429.
17. **Schulze D.J., Harte B., Valley J.W. et al.** Extreme crystal oxygen isotope signatures preserved in coesite in diamond // *Nature*, 2003, v. 423, p. 68—70.
18. **Marshall D.J.** Cathodoluminescence of geological materials. Allen, Unwin, 1988, 146 p.
19. **Marfunin A.S.** Spectroscopy, luminescence and radiation centers in minerals. Berlin, Heidelberg, New York, Springer-Verlag, 1979, 352 p.
20. **Pagel M., Barbin V., Blanc P., Ohnenstetter D.** Cathodoluminescence in geosciences. Berlin, Springer-Verlag, 2000, 514 p.
21. **Richter D.K., Götze Th., Götze J., Neuser R.D.** Progress in application of cathodoluminescence (CL) in sedimentary petrology // *Miner. Petrol.*, 2003, v. 79, p. 127—166.
22. **Schertl H.-P., Neuser R.D., Sobolev N.V., Shatsky V.S.** UHP-metamorphic rocks from Dora-Maira (Western Alps and Kokchetav), Kazakhstan: new insights using cathodoluminescence petrography // *Eur. J. Miner.*, 2004, v. 16, p. 49—57.
23. **Levien L., Prewitt C.T.** High-pressure crystal structure and compressibility of coesite // *Amer. Miner.*, 1981, v. 66, p. 324—333.
24. **Ramsdell L.S.** The crystallography of „coesite“ // *Amer. Miner.*, 1955, v. 40, p. 975—982.
25. **Schertl H.-P., Schreyer W., Chopin C.** The pyrope-coesite rocks and their country rocks at Parigi, Dora-Maira Massif, Western Alps: detailed petrography, mineral chemistry and *PT*-path // *Contr. Miner. Petrol.*, 1991, v. 108, p. 1—21.
26. **Nowlan E.U., Schertl H.-P., Schreyer W.** Garnet-omphacite-phengite thermobarometry of eclogites from the coesite-bearing unit of the southern Dora-Maira Massif, Western Alps // *Lithos*, 2000, v. 52, p. 197—214.
27. **Götze J., Zimmerle W.** Quartz and silica as guide to provenance in sediments and sedimentary rocks // *Contr. Sed. Geol.*, 2000, v. 12, 91 p.
28. **Liu F.L., Xu Z.Q., Liou J.G. et al.** Ultrahigh-pressure mineral inclusions in zircons from gneissic core samples of the Chinese Continental Scientific Drilling Site in eastern China // *Eur. J. Miner.* 2002, v. 14, p. 499—512.
29. **Ingrin J., Gillet P.** TEM investigation of the crystal microstructures in a quartz-coesite assemblage of the Western Alps // *Phys. Chem. Miner.*, 1986, v. 13, p. 325—330.
30. **Langenhorst F., Poirier J.-P.** Transmission electron microscopy of coesite inclusions in the Dora-Maira high-pressure metamorphic pyrope-quartzite // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2002, v. 203, p. 793—803.

31. **Stevens Kalceff M.A., Phillips M.R., Moon A.R., Kalceff W.** Cathodoluminescence microcharacterization of silicon dioxide polymorphs / Pagel et al. (eds.) // Cathodoluminescence in geosciences. Springer, 2000, 514 p.
32. **Sclar C.B., Carrison L.C., Schwartz C.M.** Optical crystallography of coesite // Amer. Miner., 1962, p. 1292—1303.
33. **Naka S., Kameyama T., Suwa K.** Penetration twins in synthetic coesite // Amer. Miner., 1975, p. 726—727.
34. **Bourret A.S., Hinze E., Hochheimer H.D.** Twin structure in coesite studied by high resolution electron microscopy // Phys. Chem. Miner., 1986, v. 13, p. 206—212.
35. **Schreyer W.** Ultradeep metamorphic rocks: the retrospective viewpoint // J. Geophys. Res., 1995, v. 100, № B5, p. 8353—8366.
36. **Langengorst F.** Nanostructures in ultrahigh-pressure metamorphic coesite and diamond: a genetic fingerprint // Mitt. Österr. Miner. Ges., 2003, v. 148, p. 401—412.

*Поступила в редакцию
16 июня 2005 г.*