

Минералогия коэсит-содержащих ксенолитов эклогитов из кимберлитовой трубки «Удачная»

Подугольникова Е.Е.¹, Михайленко Д.С.^{1,2,3}, Губанов Н.В.^{1,3}, Корсаков А.В.¹

¹ *Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения РАН, Новосибирск, mikhailenkodenis@gmail.com; e.podugolnikova@g.nsu.ru; gubanovnv@igm.nsc.ru; korsakov@igm.nsc.ru*

² *Институт геохимии Китайской Академии наук, Гуанчжоу, Китай*

³ *Институт геологии и геохимии им. акад. Заварицкого УРО РАН, Екатеринбург*

Аннотация. Проведено исследование минерального и химического состава коэсит-содержащих эклогитов из кимберлитовой трубки «Удачная». Главный минеральный состав представлен гранатами пироп-гроссуляр-альмандинового ряда, клинопироксенами двух генераций: первичным омфацитом и вторичным диопсидом. Основные аксессуарные минералы представлены коэситом, кианитом, рутилом и сульфидами. Согласно реконструированному валовому составу, протолитом для изученных эклогитов являлись глубоко субдуцированные породы океанического дна: базальты и габбро. Присутствие в изученных эклогитах коэсита и рутила ограничивает возможность образования пород вследствие процессов частичного плавления, степень которого, по нашим расчетам, не превышала 10 %. Полученные новые результаты имеют важное значение для оценки роли коэситсодержащих пород в вещественном составе верхней мантии.

Ключевые слова: коэсит, ксенолиты, трубка Удачная, эклогиты.

Mineralogy of coesite-bearing eclogite xenoliths from the Udachnaya kimberlite pipe

Podugolnikova E.E.¹, Mikhailenko D.S.^{1,2,3}, Gubanov N.V.^{1,3}, Korsakov A.V.¹

¹ *V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation, mikhailenkodenis@gmail.com; e.podugolnikova@g.nsu.ru; gubanovnv@igm.nsc.ru; korsakov@igm.nsc.ru*

² *State Key Laboratory of Isotope Geochemistry and CAS Center for Excellence in Deep Earth Science, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, Guangzhou, China.*

³ *Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia.*

Abstract. Here we present the mineral and chemical composition of coesite-bearing eclogites from the Udachnaya kimberlite pipe. The rock-forming minerals are represented by garnets of the pyrope-grossular-almandine series, clinopyroxenes of two generations: primary omphacite and secondary diopside. The common accessory minerals are coesite, kyanite, rutile and sulfides. According to the reconstructed bulk composition, the protolith for the studied eclogites was deeply subducted rocks of the ocean floor: basalts and gabbro. Our calculations show that the presence of coesite and rutile restricts the formation of rocks to a degree of partial melting not exceeding 10 %. The new results obtained are of great importance for assessing the role of coesite-bearing rocks in the composition of the upper mantle.

Keywords: coesite, xenoliths, Udachnaya kimberlite pipe, eclogite.

Введение

Коэсит является высокобарической полиморфной модификацией SiO₂ и, наряду с алмазом, свидетельствует об ультравысокобарических условиях формирования породы (Sobolev et al., 2000). Прошло более 30 лет с момента открытия коэсита в лабораторных условиях (Coes, 1953) до его обнаружения в природных объектах: в породах с территории Восточных Альп (Chopin, 1984) и в гнейсах Норвегии (Smith, 1984). Включения коэсита в кристаллах алмаза из кимберлитов диагностированы во многих коренных месторождениях мира и составляют 22 % от общего числа включений эклогитового парагенезиса (Соболев, 2006). На данный момент в литературе опубликованы данные о более чем 250 кристаллах алмаза, содержащих коэсит, в то время как данные о коэситовых экло-

гитах весьма фрагментарные и неполные. Согласно последнему обзору, было описано около 36 образцов коэситовых эклогитов (см. обзор Соболев, 2006). Более того, на данный момент опубликована лишь одна работа с описанием реликтов коэсита из алмазоносного кианитового эклогита из кимберлитов (Михайленко и др., 2019). Исходя из этого, изучение коэситсодержащих эклогитов во многом обусловлено исключительностью такого типа пород.

Материалы и методы

Аналитические работы выполнены в «ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН» (г. Новосибирск) и в институте Геохимии Китайской Академии наук (Гуанчжоу, Китай). Состав минералов ксенолита определен на рентгеноспектральном микроанализаторе Jeol JXA-8100; для анализа породообразующих силикатов (граната, омфацита) использовались ускоряющее напряжение 15 кВ и ток зонда 20 нА, время набора сигнала на пике и фоне при определении концентраций петрогенных элементов и микропримесей (P, Mn, Ti, Cr) составляло 80 и 40 с соответственно. Концентрации редких и рассеянных элементов в гранате, омфаците и рутиле были определены с использованием масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (LA-ICP-MS) ELEMENT XR (Thermo Fisher Scientific) и лазерной абляции (ArF Excimer) с лазером 193 нм (ComrexPro 102, Coherent) в институте Геохимии Китайской Академии Наук (Гуанчжоу, Китай). В качестве стандарта использовалось синтетическое стекло NIST SRM 612 с дальнейшим нормированием на содержание SiO₂, предварительно определенном на рентгеноспектральном микроанализаторе. Детальное описание параметров измерений представлены в работе Mikhailenko et al., (2021).

Результаты и обсуждения

Для детального изучения были отобраны 26 ксенолитов эклогитов из коллекции мантийных пород из кимберлитовой трубки Удачная, включая 12 гранат-омфацит-рутил-кианит-коэситовых и 14 гранат-омфацит-рутил-коэситовых разновидностей.

Изученные эклогиты имеют гранобластовую среднезернистую структуру и массивную текстуру. Первичные породообразующие минералы представлены гранатом и реликтами омфацита, а в нескольких образцах также кианитом (~5–20 об. %). Кианит-содержащие эклогиты сильнее всего изменены вторичными процессами: гранат окружен мощными келифитовыми каймами (рис. 1 А); омфацит замещен пироксен-калишпат-плагиоклазовой минеральной ассоциацией, формируя губчатые симплектиты (рис. 1 Б); зерна кианита замещены корунд-шпинель-плагиоклазовым симплектитом. Акцессорные минералы представлены первичными: кианитом, коэситом, алмазом,

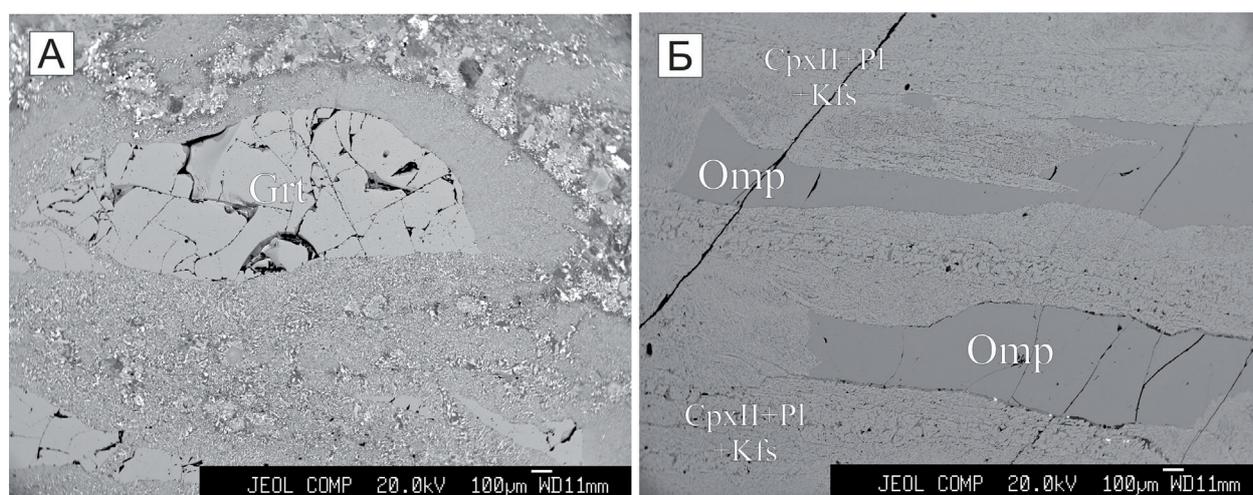


Рис. 1. Микрофотографии в режиме обратно-рассеянных электронов граната окруженного келифитовой каймой (А) и омфацита (Б), частично замещенного пироксен-калишпат-плагиоклазовым симплектитом. Условные обозначения согласно (Whitney, Evans, 2010).

Fig. 1. Back-scattered electron micrographs of garnet with kelyphitic rim (A) and omphacite (B) partly replaced by clinopyroxene-K-feldspar-plagioclase symplectite. Nomenclature after (Whitney, Evans, 2010).

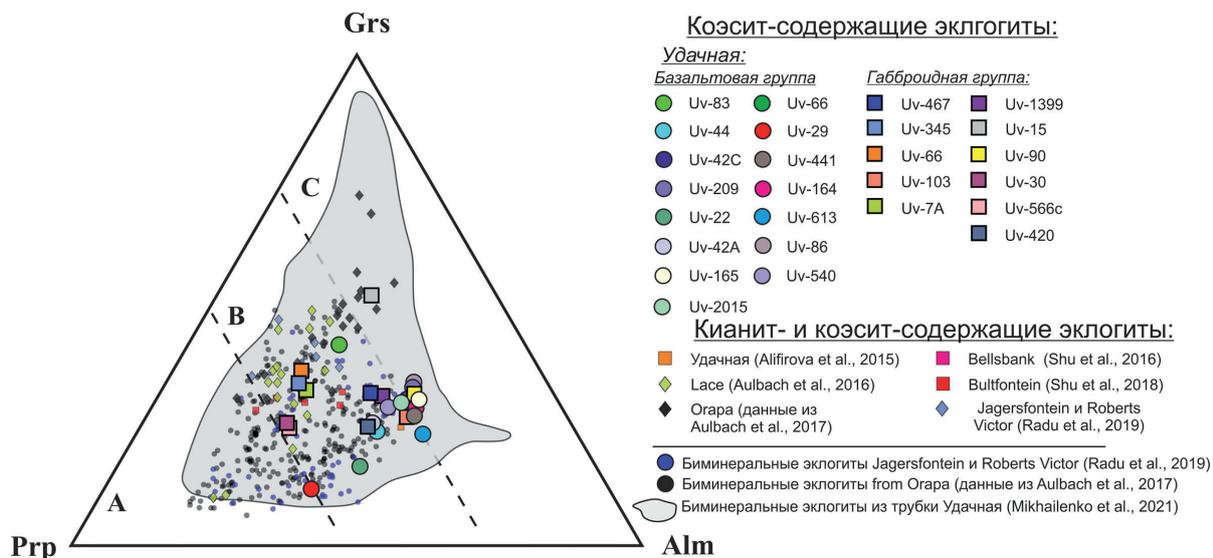


Рис. 2. Особенности химического состава граната из изученных козсит-содержащих эклогитов согласно классификации Колмана (Coleman, 1965). Данные согласно работе Mikhailenko et al., (2021).

Fig. 2. Compositional features of garnet from coesite-bearing eclogites, showing the three-fold (A, B, C) classification of eclogites after Coleman, (1965). Data base after Mikhailenko et al., (2021).

графитом, рутилом, пентландитом, пирротинном и халькопиритом; вторичными: шпинелью, плагиоклазом, корундом, ильменитом ортитом, амфиболом, хлоритом, кальцитом, флогопитом, мусковитом, джерфшеритом и серпентином. Во всех изученных образцах отмечаются следы метасоматического воздействия с кимберлитовым расплавом при транспортировке на поверхность.

Зерна гранатов преимущественно крупные (до 3 мм), оранжево-красного цвета. Келифитовые каймы, состоящие из плагиоклаза, шпинели и клинопироксена, повсеместно окружают зерна гранатов. Мощность келифитовых кайм составляет от 50 до 200 мкм. По химическому составу гранаты принадлежат к пироп-гроссуляр-альмандиновому ряду и, согласно классификации Колмана (Coleman, 1965), относятся к группе В и С (рис. 2). В зернах граната диагностированы минеральные включения рутила, коэсита/кварца, кальцита, алмаза, графита и кианита.

Пироксен представлен двумя генерациями. Первая представлена омфацитом (Morimoto, 1989) в виде крупных (до 1.6 мм) ксеноморфных зерен темно-зелёного цвета, вокруг которых наблюдается развитие вторичного пироксена (второй генерации) в виде симплектитов, состоящих из диопси-

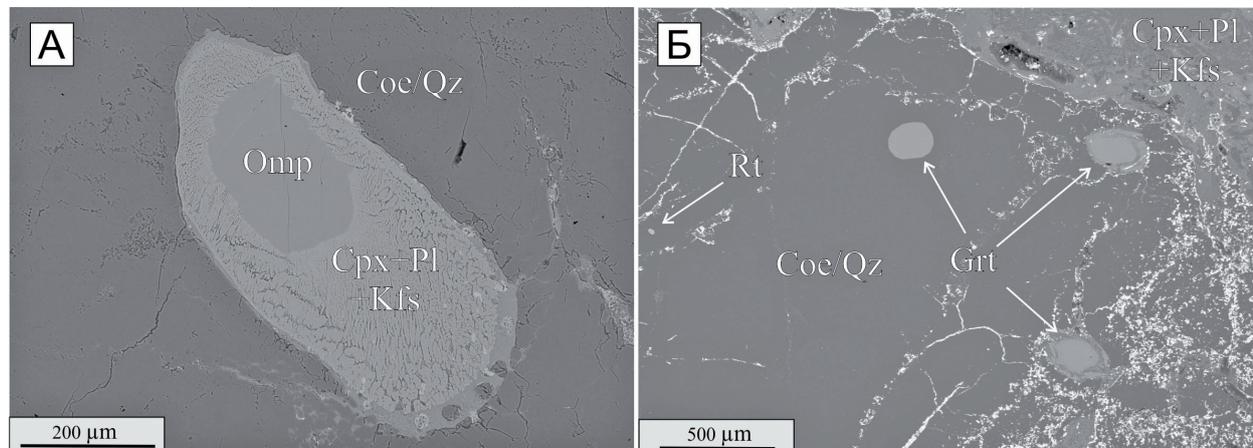


Рис. 3. Микрофотографии в режиме обратно-рассеянных электронов включения омфацита (А) и зерен граната-рутила в коэсите (Б). Условные обозначения согласно (Whitney, Evans, 2010).

Fig. 3. Back-scattered electron micrographs inclusions of omphacite (A) and garnet-rutile in coesite (B). Nomenclature after (Whitney, Evans, 2010).

да, плагиоклаза и калиевого полевого шпата. Размер вновь образованных фаз в симплектите увеличивается по мере удаления от реликта омфациита. Омфациит в изученных образцах относится к группе В и С (Taylor and Neal, 1989) с вариациями содержания Na_2O и Al_2O_3 0.4–6.5 и 0.3–14.4 мас. %, соответственно. Содержание K_2O варьирует от 0.1 до 0.4 мас. %.

Зерна кианита светло-голубого цвета, удлинённые, размером от 0.3 до 0.8 мм. Кианит встречается в межзерновом пространстве, а также в виде включений в гранате и омфациите. Помимо этого, кианит может содержать включения граната, омфациита и рутила. Установлены незначительные примеси FeO (до 0.4 мас. %) и TiO_2 (до 0.2 мас. %).

Козэсит представлен зернистыми агрегатами неправильной формы размером до 2 мм (рис. 3). Реликты коэсита окружают мощные вторичные каймы, состоящие из кварца и являющиеся псевдоморфозами. Характерной особенностью псевдоморфоз по коэситу является частоклопоподобное обрамление поликристаллическим кварцем (Соболев, 2006). В зернах коэсита/кварца встречаются закономерно ориентированные включения рутила.

Рутил в изученных образцах представлен как в виде самостоятельных зерен неправильной, округлой или изометричной формы, так и в виде игольчатых, закономерно ориентированных включений в гранате, коэсите и клинопироксене. В рутиле отмечаются незначительные примеси SiO_2 (до 0.5 мас. %), Al_2O_3 (до 0.7 мас. %) и FeO (до 0.7 мас. %), а также CaO (до 0.6 мас. %) и MgO (до 0.6 мас. %). Для всех зерен рутила характерны структуры распада в виде ламелей ильменита. Ильменит самостоятельных зерен не образует и находится в виде ламелей и кайм в зернах рутила.

Сульфиды округлой, вытянутой и неправильной формы, встречаются в виде самостоятельных зерен в интерстициях и в виде включений в клинопироксене, гранате и коэсите/кварце. Главным образом сульфиды представлены твердыми растворами пирротина, пентландита, халькопирита и пирита, также встречаются вторичные джерфшерит, смитит и другие разновидности.

Реконструкция состава протолита для мантийных ксенолитов эклогитов является весьма нетривиальной петрологической задачей. Согласно современным работам, протолитом для эклогитов ксенолитов считаются измененные породы океанической коры (базальты и габбро), которые в процессе субдукции на мантийные глубины претерпели метаморфические изменения (Jacob, 2004; Aulbach and Jacob, 2016). Исходя из содержаний петрогенных и рассеянных элементов в реконструированных валовых составах (методика детально описана в работе Mikhailenko et al., (2021)), а также формы спектров распределения редкоземельных элементов, в том числе наличия положительных Eu- и Sr- аномалий, изученные образцы ксенолитов эклогитов были разделены на базальтовую (гранат с $\text{Eu}^* < 1.05$ при высоком содержании $\sum \text{HREE}$) и габброидную (гранат с $\text{Eu}^* > 1.05$ и низким содержанием $\sum \text{HREE}$) группы. Эклогиты базальтовой группы значительно деплетированы легкими редкоземельными элементами (LREE) и не имеют Eu аномалии ($\text{Eu}^* = 0.7–0.9$), в то время как эклогиты габброидной группы обеднены тяжелыми редкоземельными элементами (HREE) и имеют выраженную положительную Eu аномалию ($\text{Eu}^* = 1.1–2.75$). Исходя из реконструированного состава коэситсодержащих эклогитов габброидной группы, их протолиты, по-видимому, были представлены основными породами, соответствующими габброноритам или оливиновым габбро. Геохимические характеристики пород указывают на формирование их протолитов в малоглубинных (<5 кбар) условиях нижних частей океанической коры при фракционировании плагиоклаза и оливина, по-видимому, совместно с клинопироксеном. Протолитом для эклогитов базальтовой группы, вероятно, являлись более высокобарические, обогащенные Al_2O_3 и Na_2O основные породы с высоким модалным содержанием клинопироксена, состоящие из $\text{Crx-Spl-Ol-Pl}\pm\text{Orx}$ (клинопироксена, шпинели, оливина, плагиоклаза, \pm ортопироксена), сформированные за счет плавления деплетированного мантийного источника. Отсутствие Eu аномалии, низкие концентрации Ni и высокие концентрации ванадия и алюминия указывают на незначительное модалное количество плагиоклаза и высокое содержание обогащенного Al клинопироксена и шпинели в протолите пород. Присутствие коэсита в деплетированных LREE эклогитах базальтовой группы и их низкая магнезиальность ($\text{Mg}\# < 60$) ограничивают возможность образования пород вследствие процессов частичного плавления, степень которого по нашим расчетам не превышала 10 %.

Заклучение

Проведенные комплексные минералого-геохимические исследования различных коэзитсодержащих ксенолитов эклогитов не выявили существенных различий с биминеральными разновидностями. Новые полученные данные согласуются с уже ранее опубликованными литературными данными. Тем не менее, полученные новые результаты имеют важное значение для оценки роли коэзитсодержащих пород в вещественном составе верхней мантии. Дальнейшие исследования изотопного состава кислорода для коэзита в этих породах позволят получить дополнительные свидетельства об условиях кристаллизации полиморфных модификаций SiO_2 .

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного Фонда (проект № 21-77-10006). Отбор образцов выполнен в рамках госзадания ИГМ СО РАН.

Литература

1. Михайленко Д.С., Корсаков А.В., Резвухина О.В., Головин А.В., Соболев Н.В. Находка коэзита в алмазоносном кианитовом эклогите из кимберлитовой трубки Удачная (Сибирский кратон) // ДАН. 2019. Т. 487. № 4. С. 428–431. <https://doi.org/10.31857/S0869-56524874428-431>.
2. Соболев Н.В. Коэзит как индикатор сверхвысоких давлений в континентальной литосфере // Геология и геофизика. 2006. Т. 47. № 1. С. 95–104.
3. Aulbach S., Jacob D.E. Major-and trace-elements in cratonic mantle eclogites and pyroxenites reveal heterogeneous sources and metamorphic processing of low-pressure protoliths // *Lithos*. 2016. V. 262. P. 586–605. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.07.026>.
4. Chopin C. Coesite and pure pyrope in high-grade blueschists of the Western Alps: a first record and some consequences // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1984. V. 86. №2. P. 107–118. <https://doi.org/10.1007/BF00381838>.
5. Coes Jr L. A new dense crystalline silica // *Science*. 1953. V. 118. N. 3057. P. 131–132. <https://doi.org/10.1126/science.118.3057.131>.
6. Coleman R.G., Lee D.E., Beatty L.B., Brannock W.W. Eclogites and eclogites: their differences and similarities // *Geological Society of America Bulletin*. 1965. V. 76. N. 5. P. 483–508. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1965\)76\[483:EAETDA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1965)76[483:EAETDA]2.0.CO;2).
7. Jacob D.E. Nature and origin of eclogite xenoliths from kimberlites // *Lithos*. 2004. V. 77. N. 1–4. P. 295–316. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.03.038>.
8. Mikhailenko D.S., Aulbach S., Korsakov A.V., Golovin A.V., Malygina E.V., Gerdes A., Stepanov A.S., Xu Y.-G. Origin of graphite–diamond-bearing eclogites from Udachnaya kimberlite pipe // *Journal of Petrology*. 2021. V. 62. N. 8. P. 1–32. <https://doi.org/10.1093/petrology/egab033>.
9. Morimoto N. Nomenclature of pyroxenes // *Mineralogical Journal*. 1989. V. 14. N. 5. P. 198–221. <https://doi.org/10.1007/BF01226262>.
10. Smith D.C. Coesite in clinopyroxene in the Caledonides and its implications for geodynamics // *Nature*. 1984. V. 310. N. 5979. P. 641–644. <https://doi.org/10.1038/310641a0>.
11. Sobolev N.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. N. 22. P. 11875–11879. <https://doi.org/10.1073/pnas.220408697>.
12. Taylor L.A., Neal C.R. Eclogites with oceanic crustal and mantle signatures from the Bellsbank kimberlite, South Africa, Part I: mineralogy, petrography, and whole rock chemistry // *The Journal of Geology*. 1989. V. 97. N. 5. P. 551–567. <https://doi.org/10.1086/629334>.
13. Whitney D.L., Evans B.W. Abbreviations for names of rock-forming minerals // *American mineralogist*. 2010. V. 95. N. 1. P. 185–187. <https://doi.org/10.2138/AM.2010.3371>.