

Титан в коэсите как новый инструмент мономинеральной термобарометрии

Губанов Н.В. ^{1,2}, Михайленко Д.С. ^{1,2}, Корсаков А.В. ¹, Зедгенизов Д.А. ²

¹ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, gubanovnv@igm.nsc.ru

² Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург

Аннотация. Эклогиты – важный элемент литосферной мантии древних кратонов и высокобарических метаморфических комплексов. Термодинамические условия равновесия минеральных ассоциаций экологитов отражают термальный режим литосферы в основании древних кратонов. Используемые при расчётах Р-Т условий экологитов геотермометры и геобарометры имеют ряд ограничений, связанных с вторичными преобразованиями породообразующих минералов. В данной работе мы использовали новый метод оценки термодинамических условий равновесия пород, основанный на содержании титана в коэсите. Установлено, что концентрации титана в коэсите из экологитовых ксенолитов из трубки «Удачная» варьируют от 14 до 79 ppm, в то время как во включениях коэсита в алмазах этот диапазон составляет 44–136 ppm. Рассчитанные Р-Т параметры экологитов соответствуют диапазону 4.3–6.2 ГПа и 864–1203 °С и демонстрируют хорошую сходимость с классическими гранат-клинопироксеновыми геотермобарометрами. Термодинамические условия для включений коэсита в алмазе варьируют в интервале 4.2–6.5 ГПа и 1010–1360 °С, что соответствует известному полю стабильности алмаза.

Ключевые слова: коэсит, экологит, алмаз, термобарометр, субдукция.

Titanium in coesite as a new monomineral thermobarometer

Gubanov N.V. ^{1,2}, Mikhailenko D.S. ^{1,2}, Korsakov A.V. ¹, Zedgenizov D.A. ²

¹ V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, gubanovnv@igm.nsc.ru

² Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg

Abstract. Eclogites are an important element of the lithospheric mantle of ancient cratons and high-pressure metamorphic complexes. Thermodynamic conditions of equilibrium of mineral associations of eclogites reflect the thermal regime and structure of the lithosphere. The geothermometers and geobarometers used in calculating the P-T conditions of eclogites have a number of limitations associated with the secondary alterations of rock-forming minerals. In this work, we used a new method for estimating the thermodynamic equilibrium conditions of rocks based on the content of Ti in coesite. It was found that the concentrations of titanium in coesite in the studied eclogites from Udachnaya kimberlite pipe vary from 14 to 79 ppm, while in coesite inclusions in diamonds this range is 44–136 ppm. The calculated P-T parameters correspond to the range of 4.3–6.2 GPa and 864–1203 °C and show good agreement with classical geothermobarometers. The thermodynamic conditions for coesite inclusions in diamond vary in the range of 4.2–6.5 GPa and 1010–1360 °C, which corresponds to the known diamond stability field.

Keywords: coesite, eclogite, diamond, thermobarometer, subduction.

Введение

Эклогиты являются важной структурной единицей литосферной мантии в основании древних кратонов и многих высокобарических метаморфических комплексов. Расчёт термодинамических условий равновесия минеральных ассоциаций экологитов предоставляет ценные сведения о геодинамической эволюции литосферы. В настоящее время широко распространены геобарометры и геотермометры, базирующиеся на особенностях химического состава породообразующих минералов мантийных пород – граната, клинопироксена, оливина и ортопироксена (напр., Brey and Köhler, 1990; Nakamura, 2009). Однако, первичные породообразующие минералы ксенолитов экологитов из кимберлитов (в первую очередь омфациит) подвержены вторичным изменениям, осложняющим корректное определение равновесных Р-Т условий. Экологитовые алмазы, захватывающие первич-

ные минеральные включения и препятствующие процессам их вторичного изменения, редко содержат одновременно несколько минеральных фаз, позволяющих провести реконструкцию P-T условий материнских субстратов с использованием классических геотермобарометров.

Коэсит является полиморфной модификацией SiO_2 , встречающейся в высокобарических породах (Sobolev et al., 2000). Определение концентрации титана в коэсите является надежным мономинеральным термобарометром, позволяющим рассчитать термодинамические условия конечного равновесия пород при одном известном параметре (P или T) (Osborne et al., 2019). В настоящее время этот метод еще не нашел широкого применения для мантийных ассоциаций. Цель нашего исследования заключалась в реконструкции P-T условий равновесия коэсит-содержащих алмазов и эклогитов.

Материалы и методы

Определение содержания титана в коэсите/кварце было осуществлено для 25 образцов эклогитов из трубки «Удачная» (187 анализов), а также для 17 алмазов эклогитового парагенезиса, содержащих коэсит в виде включений. Применялась методика, предложенная в работах Thomas et al., (2010) и Osborne et al., (2019), с использованием электронно-зондового микроанализатора Cameca SX100 в Центре коллективного пользования УрО РАН «Геоаналитик» (ИГГ УрО РАН, Екатеринбург) и в Институте геохимии Китайской академии наук (Гуанчжоу, Китай). Предел обнаружения Ti для разных измерений варьировал от 9 до 13 ppm. В качестве стандартов использовались кварц (SiO_2) и рутил (TiO_2). Составы гранатов и клинопироксенов для использования геотермометра Накамуры (Nakamura, 2009) были получены в «ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН» (г. Новосибирск) на рентгеноспектральном микроанализаторе Jeol JXA-8100 (15 кВ; 20 нА). Время накопления сигнала варьировало от 30 до 80 с.

Результаты и обсуждение

Концентрации Ti в коэсите в изученных эклогитах варьируют от 14 и до 79 ppm (рис. 1), что может отражать различные условия образования. При этом концентрации Ti как в коэсите, так и в окружающем его кварце одинаковые (рис. 2). Для более точной оценки P-T условий конечного

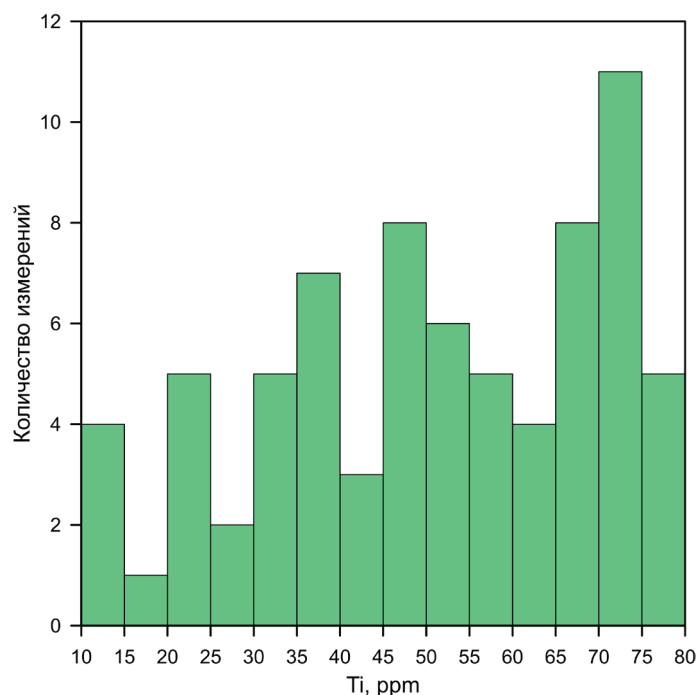


Рис. 1. Содержание титана (ppm) в коэсите из ксенолитов эклогитов из кимберлитовой трубки «Удачная».

Fig. 1. Titanium content (ppm) in coesite from xenoliths of eclogites from the Udachnaya kimberlite pipe.

равновесия эклогитов были использованы различные методы. Первоначальная оценка условий образования эклогитов осуществлялась с помощью комбинации гранат-клинопироксенового геотермометра Накамуры (Nakamura, 2009) с последующим проецированием расчетных значений температур на геотерму теплового потока (Boyd, 1984). Полученные значения давления были использованы при расчёте температур с использованием геотермобарометра Ti–в-коэсите. Составы гранатов и клинопироксенов из изученных эклогитов варьируют в интервалах $\text{Prp}_{31-42}\text{Grs}_{19-38}\text{Alm}_{16-44}$ и $\text{Jd}_{30-32}\text{Di}_{44-56}\text{Hd}_{8-13}$ соответственно. Рассчитанные P-T условия по содержанию Ti в коэсите соответствуют диапазону 4.3–6.2 ГПа и 864–1203 °C (табл. 1).

Мономинеральный геотермометр Ti–в-коэсите демонстрирует хорошую сходимость полученных результатов с классическим гранат-пироксеновым геотер-

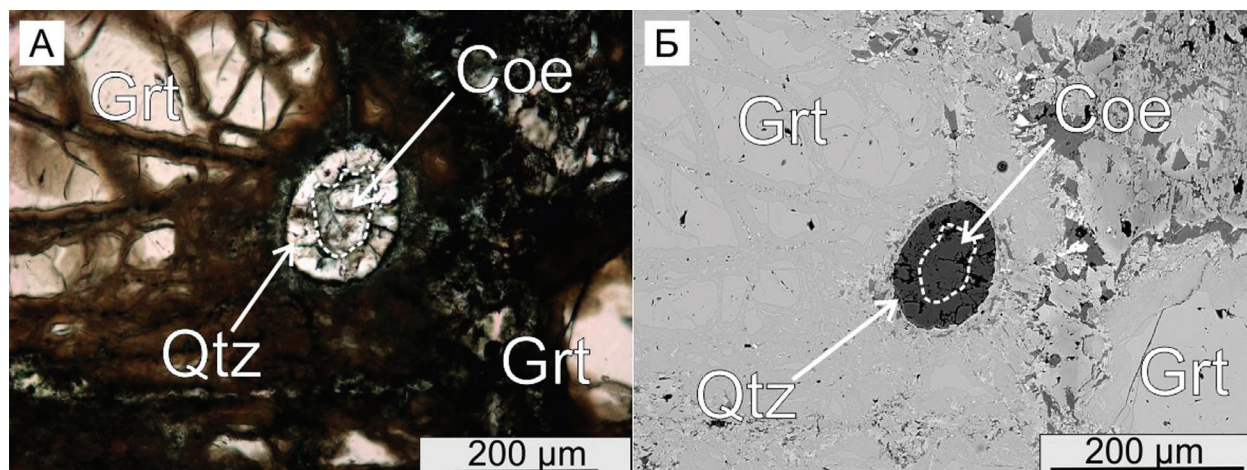


Рис. 2. Фрагмент шлифа эклогита Uv-420 с зерном коэсита, окруженным кварцем, в проходящем свете (А) и в обратно-рассеянных электронах (Б). Grt – гранат, Coe – коэсит, Qtz – кварц.

Fig. 2. Fragment of a thin section of eclogite Uv-420 with a coesite surrounded by quartz in transmitted light (A) and in back-scattered electrons (B). Grt – garnet, Coe – coesite, Qtz – quartz.

Таблица 1. Температуры равновесия ксенолитов эклогитов из кимберлитовой трубки Удачная
Table 1. Equilibrium temperatures of eclogite xenoliths from the Udachnaya kimberlite pipe

Образец	Grt-Cpx (Nakamura, 2009), °C	Ti в коэситах (Osborne et al. 2019), °C
Uv-03-83	1050	1181
Uv-09-441	880	945
Uv-15-10	941	1023
Uv-11-103	1065	930
Uv-09-540	920	910
Uv-10-556c	1137	1198
Uv-14-30	1161	1058
Uv-14-29	1185	941
Uv-13-22	1030	979
Uv-09-467	1113	1002
Uv-14-165	970	1020
Uv-14-66	1100	1031
Uv-11-42A	1000	928
Uv-11-164	945	1031
Uv-15	930	961
Uv-14-90	900	864
Uv-13-99	1020	928
Uv-14-86	870	953
Uv-14-209	900	970
Uv-11-420	1050	970
Uv-11-42c	1000	940
Uv-15-7A	1160	1203
Uv-13-345	1068	985
Uv-13-44	1040	1073
Uv-613	860	975

мометром (Nakamura, 2009). Расчетные значения температуры и давления хорошо коррелируют с косвенными химическими признаками высокобарического происхождения эклогитов – концен-

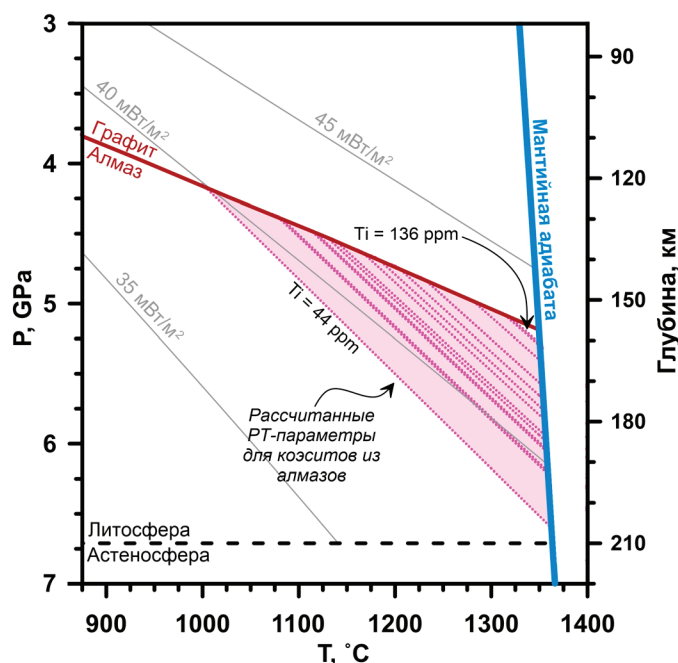


Рис. 3. Поле рассчитанных РТ-условий для включений коэсита в алмазах.

Fig. 3. Calculated PT-conditions for coesite inclusions in diamonds.

лежат в области наиболее распространенной мантийной геотермы (~ 40 мВт/м²; Hasterok and Chapman, 2011).

Заключение

В результате проведенных работ было установлено, что диапазон Р-Т условий формирования эклогитов варьирует в интервале 4.3–6.2 ГПа и 864–1203 °С при общем содержании титана в 14–79 ppm. Полученные оценки соотносятся с термодинамическими условиями, полученными при использовании классических гранат-клинопироксеновых геотермометров. Поле Р-Т условий для включений коэситов из алмазов ограничено значениями 4.2–6.5 ГПа и 1010–1360 °С (содержания титана изменяются от 44 до 136 ppm), что соответствует известному полю стабильности алмаза.

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод о том, что мономинеральный геотермометр Ti-в-коэсите может быть использован для определения Р-Т условий среды минералообразования для коэситов из эклогитов и коэсит-содержащих алмазов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 21-77-10006). Отбор образцов выполнен по государственному заданию ИГМ СО РАН (122041400241-5).

Литература

1. Beyer C., Frost D.J., Miyajima N. Experimental calibration of a garnet–clinopyroxene geobarometer for mantle eclogites // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2015. V. 169. № 18. <https://doi.org/10.1007/s00410-015-1113-z>.
2. Boyd F.R. Siberian geotherm based on Iherzolite xenoliths from the Udachnaya kimberlite, USSR // *Geology*. 1984. V. 12. P. 528–530. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1984\)12<528:SGBOIX>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1984)12<528:SGBOIX>2.0.CO;2).
3. Brey G.P., Köhler T. Geothermobarometry in four-phase Iherzolites II. New thermobarometers, and practical assessment of existing thermobarometers // *Journal of Petrology*. 1990. V. 31. P. 1353–1378. <https://doi.org/10.1093/petrology/31.6.1353>.
4. Day H.W. A revised diamond-graphite transition curve // *American Mineralogist*. 2012. V. 97. P. 52–62. <https://doi.org/10.2138/am.2011.3763>.
5. Hasterok D., Chapman D.S. Heat production and geotherms for the continental lithosphere // *Earth and Planetary Science Letters*. 2011. V. 307. P. 59–70. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.04.034>.

трациями Na₂O в гранате (до 0.2 мас. %) и K₂O в омфаките (до 0.32 мас. %), а также с концентрациями TiO₂ в гранате и клинопироксене (до 0.37 и 0.34 мас. %, соответственно).

Диапазон концентраций титана во включениях коэсита в алмазе ограничен значениями 44 ppm и 136 ppm. При этом разные зерна в пределах одного образца не демонстрируют значительных вариаций в содержании Ti. В связи со сложностью подбора одного из параметров (Р или Т) было построено поле возможных Р-Т условий для изученной коллекции коэситов из алмазов. Поле ограничено линией перехода графит/алмаз (Day, 2012) и мантийной адиабатой (Hasterok and Chapman, 2011). Рассчитанные Р-Т условия для включений коэсита в алмазе варьируют в интервале 4.2–6.5 ГПа и 1010–1360 °С (рис. 3), что соответствует известному полю стабильности алмаза (Sobolev, 1977; Stachel and Harris, 2008). Полученные значения

6. Nakamura D. A new formulation of garnet–clinopyroxene geothermometer based on accumulation and statistical analysis of a large experimental data set // *Journal of Metamorphic Geology*. 2009. V. 27. P. 495–508. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2009.00828.x>.
7. Osborne Z.R., Thomas J.B., Nachlas W.O., Baldwin S.L., Holycross M.E., Spear F.S., Watson E.B. An experimentally calibrated thermobarometric solubility model for titanium in coesite (TitaniC) // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2019. V. 174. P. 1–13. <https://doi.org/10.1007/s00410-019-1575-5>.
8. Sobolev N.V. Deep-Seated Inclusions in Kimberlites and the Problem of the Composition of the Upper Mantle. American Geophysical Union, Washington, D.C. 1977. 279 p. <https://doi.org/10.1029/SP011>.
9. Sobolev N.V., Fursenko B., Goryainov S., Shu J., Hemley R., Mao A., Boyd F.R. 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. <https://doi.org/10.1073/pnas.220408697>.
10. Stachel T., Harris J.W. The origin of cratonic diamonds – Constraints from mineral inclusions // *Ore Geology Reviews*. 2008. V. 34. P. 5–32. <https://doi.org/10.1016/J.OREGEOREV.2007.05.002>.
11. Thomas J.B., Bruce Watson E., Spear F.S., Shemella P.T., Nayak S.K., Lanzirotti A. TitaniQ under pressure: the effect of pressure and temperature on the solubility of Ti in quartz // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2010. V. 160. P. 743–759. <https://doi.org/10.1007/s00410-010-0505-3>.