ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ МАФИЧЕСКОГО ГРАНУЛИТА (ОАЗИС БАНГЕРА, ВОСТОЧНАЯ АНТАРКТИДА)

И. А. Абдрахманов

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург

ilnur_01_95@mail.ru

В статье приводятся результаты минеральной термобарометрии и физико-химического моделирования формирования гранат-энстатитового гнейса из мезопротерозойской метаморфической толщи оазиса Бангера (Восточная Антарктида). В результате моделирования оценена активность воды, температура и давление формирования породы. Показано, что пиковая температура метаморфизма могла достигать 900 °C и более. Подобные температурные условия указывают на предпосылки протекания УНТ-метаморфизма пород, слагающих фундамент Восточно-Антарктического щита.

Ключевые слова: термобарометрия, гранулиты, гнейс, оазис Бангера, Восточная Антарктида.

PHYSICO-CHEMICAL SIMULATION OF THE CONDITIONS FOR THE MAFIC GRANULITE FORMATION (BUNGER HILLS, EAST ANTARCTICA)

I. A. Abdrakhmanov

Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg

The article presents the results of mineral thermobarometry and physico-chemical simulation of the formation of garnet-enstatite gneiss from the Mesoproterozoic metamorphic suite of the Bunker Hills, East Antarctica. As a result, the water activity, temperature and pressure of rock formation were estimated. It is shown that the peak temperature of metamorphism could reach 900 °C or more. Such temperature conditions indicate the prerequisites for the occurrence of UHT-metamorphism during the formation of the East Antarctic Shield.

Keywords: thermobarometry, granulites, gneiss, Bunker Hills, East Antarctica.

Введение

Оазис Бангера расположен на побережье Восточной Антарктиды на территории Земли Королевы Мэри. От Южного океана (море Дэйвиса) выходы коренных пород отделены шельфовым ледником Шеклтон. Область низких скалистых холмов и углубленных ледником долин с обильными озерами занимает площадь около 300 км² и имеет максимальную высоту 165 м.

Оазис Бангера является частью Восточно-Антарктического щита (рис. 1). В его геологическом строении установлены крупные тела тоналитовых ортогнейсов и интенсивно мигматизированные гранат-силлиманит-кордиеритовые парагнейсы [1, 9]. В толще мигматитов залежали согласные интрузии метабазитов, прослои будинированных силикатных мраморов и многочисленные жилы гранитового состава. Метаморфическая толща смята в крупные складки, крылья которых осложнены более мелкими складками высших порядков. Три системы разломов, к которым приурочены зоны милонитов и диафторических сланцев, разбили этот участок фундамента на отдельные блоки, незначительно передвинутые относительно друг друга. С метаморфическими породами пространственно ассоциированы плутоны габбро и пироксеновых гранитоидов — чарнокитов [1, 9, 10].

По данным U-Pb-датирования циркона, магматический протолит ортогнейсов сформировался в интервале 1700—1500 Ма, тогда как внедрение плутонов габбро и монцогаббро имело место на рубеже 1170—1150 Ма. По данным U-Pb-датирования монацита из парагнейсов, возраст метаморфизма, протекавшего в условиях гранулитовой фации, составляет 1240—1150 Ма. Наиболее молодыми образованиями в регионе являются кембрийские дайки щелочно-основного состава [9, 12].

Целью работы является реконструкция пиковых P-T-условий метаморфизма мафического гранулит оазиса Бангера с использованием минеральной геотермобарометрии в комплексе с физико-химическим моделированием.

Методы исследования

Материалом для исследования послужили породы мафических гнейсов, отобранные в ходе 2-й Советской антарктической экспедиции (коллекция М. Г. Равича и Д. С. Соловьева, которые первыми изучали оазис Бангера в 1956—1957 гг.) на острове Кашалот. Минеральный состав породы изучался в петрографических шлифах. Содержание пороодообразующих оксидов в породе полу-

Для цитирования: Абдрахманов И. А. Физико-химическое моделирование условий формирования мафического гранулит (оазис Бангера, Восточная Антарктида) // Вестник геонаук. 2021. № 2 (314). С. 14—18. DOI: 10.19110/geov.2021.2.3

For citation: Abdrakhmanov I. A. Physicochemical simulation of the conditions for the mafic granulite formation (Bunker Hills, East Antarctica). Vestnik of Geosciences, 2021, 2 (314), pp. 14—18, doi: 10.19110/geov.2021.2.3

Рис. 1. Геологическая карта оазиса Бангера (Восточная Антарктида) с местом отбора проб гранат-энстатитового гнейса (красная точка) [1]

Fig. 1. Geological map of the Bunger Hills (East Antarctica) with the garnet-enstatite gneiss sampling site (red dot)[1]

чены с помощью силикатного анализа в лаборатории ВНИИОкеангеологии (Санкт-Петербург). Состав минералов анализировался с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-6510LA с энергодисперсионным спектрометром JED-2200 (JEOL) (ИГГД РАН, аналитик О. Л. Галанкина).

Моделирование минеральных парагенезисов выполнялось с помощью программы Theriak/Domino [3] на основе внутренне согласованных термодинамических данных Holland & Powell с изменениями [7] и моделей активностей твердых минеральных растворов ортопироксена, граната, полевых шпатов, кордиерита, биотита, шпинели, ильменита, осумилита. В качестве чистых фаз учитывались кварц, андалузит, силлиманит, кианит, рутил, титанит. Моделирование выполнялось в системе NCKFMASHT, входными данными для расчетов служили результаты валового химического анализа горной породы.

Результаты исследования

Петрография и минералогия. Изученный гранат-энстатитовый гнейс имеет следующий минеральный состав (%): калиевый полевой шпат — 40, кварц — 20, ортопироксен — 15, гранат — 10, биотит — 5, ильменит — 5, плагиоклаз < 5. Структура породы средне-, мелкозернистая, гранобластовая, текстура полосчатая. По химическому составу содержит следующие компоненты (мас. %): SiO_2 — 70.80, TiO_2 — 0.73, Al_2O_3 — 13.48, Fe_2O_3 — 1.91, FeO — 3.30, MnO — 0.07, CaO — 1.15, Na_2O — 2.23, K_2O — 3.45, P_2O_5 — 0.07.

Гранат представлен в виде зерен неправильной формы, размер которых достигает 1–2 мм. В качестве включений содержит ильменит. Минерал незональный, характеризуется повышенными содержаниями альмандинового и пиропового миналов ($X_{\text{Fe}} = 0.61$ – 0.68 , $X_{\text{Mg}} = 0.28$ – 0.34), низкими содержаниями Ca и Mn ($X_{\text{Ca}} = 0.03$ – 0.04 , X_{Mn} — до 0.01).

Плагиоклаз наблюдается в виде гранобластовых зерен размером до 1–2 мм. Совместно с кварцем и калиевым полевым шпатом он составляет основную ткань породы. По составу минерал отвечает андезину An_{31-34} с незначительным содержанием ортоклазового минала (< 0.01) и иногда содержит антипертиты состава $\text{Ort}_{92}\text{Ab}_8\text{An}_0$. Близкий состав имеют обособленные зерна калиевого полевого шпата $\text{Ort}_{89-95}\text{Ab}_{11-5}\text{An}_0$ (используется обозначение минералов по [13]).

Ортопироксен встречается в виде гранобластовых зерен размером до 1 мм. По составу минерал отвечает железистому энстатиту ($X_{\text{Mg}} = 0.56$ – 0.58) с повышенным содержанием алюминия (6.9–7.4 мас. % Al_2O_3), незначительным содержанием титана (0–0.15 мас. % TiO_2) и кальция (0–0.25 мас. % CaO).

Биотит образует пластинчатые кристаллы размером до 0.3–0.4 мм и мелкошешуйчатые агрегаты, окружающие и частично замещающие кристаллы пироксена. Пластинчатый биотит характеризуется пониженной глиноземистостью (16.2–17.5 мас. % Al_2O_3) и повышенным содержанием титана (3.0–4.0 мас. % TiO_2). Мелкошешуйчатый биотит имеет близкие содержания глинозема (16.2–17.0 мас. % Al_2O_3) и пониженные содержания оксида титана (до 0.2 мас. % TiO_2) по сравнению с крупношешуйчатым биотитом.

Ильменит встречается в виде вкрапленности мелких (0.1 мм) зерен в матриксе, образует сростания с грана-

том и пироксеном и вроски в этих минералах. Содержание примеси магния (0.3–0.7 мас. % MgO).

Термобарометрия. Особенностью химического состава изученного гнейса является повышенное содержание SiO_2 (70.8 мас. %) при пониженном содержании Al_2O_3 (13.5 мас. %). На треугольной диаграмме AFM образец находится ниже конноды «альмандин — умеренноглиноземистый хлорит», рядом с точкой, отвечающей «среднему» пелиту (рис. 2).

Рис. 2. AFM-диаграмма с точкой состава мафического гранулиты. Красный ромб — средний пелит [11]

Fig. 2. AFM-diagram with a point of composition of mafic granulite. Red rhombus — average pelite [11]

По данным моделирования в системе NCKFMASHT (рис. 3), при пониженной активности воды ($a_{\text{H}_2\text{O}} = 0.10$), а также при умеренных давлениях (< 6 кбар) ортопироксен входит в ассоциацию с гранатом, кордиеритом (отсутствующим в образце) и ильменитом. Поле устойчивости этой ассоциации ограничено широкими пределами (800–970 °C). При более высоких давлениях место кордиерита и ильменита занимают силлиманит и рутил. В предыдущей работе [2] учитывалась также активность воды, с помощью которой была определена область вхождения в парагенезис шпинели для фельзического гнейса.

Высокое содержание алюминия в ортопироксене — $\text{Al}(\text{M1}) = \text{Al к.ф.}/2 = 0.15$ – 0.16 — указывает на высокую пиковую температуру метаморфизма. Согласно показаниям Grt-Орх-геотермобарометра, основанного на температурной зависимости $\text{Al}(\text{M1})$ [6], она могла достигать 900–910 °C (при условии, что давление равнялось 5.5 кбар).

По данным Grt-Орх-термобарометрии, учитывающей катионный обмен Fe и Mg между гранатом и пироксеном [8], равновесие двух минералов в отношении фемических компонентов достигалось при более низких температурах (770–880 °C при давлении 5.5 кбар). Показания температуры занижены, поскольку между гранатом и ортопироксеном протекает перераспределение фемических компонентов. Надежнее ориентироваться на более устойчивые элементы, такие как Al (Al в ортопироксене — геотермобарометр), которые фиксируют пик метаморфизма.

Состав реинтегрированного плагиоклаза $\text{Or}_{11}\text{Ab}_{60}\text{An}_{29}$ отвечает температуре около 880 °C (рис. 4) [4]. По данным моделирования, сходный состав ($\text{Or}_9\text{Ab}_{61}\text{An}_{30}$) должен иметь плагиоклаз, равновесный с ортопироксеном и кордиеритом при температуре 900 °C и давлении 5 кбар.

Рис. 3. Isochemical P-T-диаграмма, построенная при условии $a_{\text{H}_2\text{O}} = 0.10$. Кварц в избытке. Жирным выделена линия солидуса

Fig. 3. Isochemical P-T-diagram plotted under the condition $a_{\text{H}_2\text{O}} = 0.10$. Quartz is in excess. The solidus line is highlighted in bold

1
2

Рис. 4. Тройная диаграмма Ab—An—Ort с линиями полевошпатового сольвуса, построенными на основе моделей (синие — по [4], красные — по [5]): 1 — реинтегрированный плагиоклаз, 2 — полевые шпаты, равновесные с ортопироксеном и кордиеритом при температуре 900 °C и давлении 5 кбар (по данным моделирования). На фотографии показан участок кристалла плагиоклаза с антипертитами, использованный для расчетов состава реинтегрированного плагиоклаза

Fig. 4. Triple Ab — An — Ort diagram with feldspar solvus lines constructed from the models (blue by [4], red — by [5]): 1 — re-integrated plagioclase, 2 — feldspars in equilibrium with orthopyroxene and cordierite at a temperature of 900 °C and a pressure of 5 kbar (according to modeling data). The photograph shows a section of a plagioclase crystal with antiperthites used to calculate the composition of re-integrated plagioclase

Выводы

Применяя методы физико-химического моделирования и минеральной термобарометрии, было установлено, что пик метаморфизма, при котором сформировался образец, протекал в условиях пониженной активности воды = 0.10, температура кристаллизации соответ-

ствовала 880—910 °C, давление не превышало 5.0—5.5 кбар. Подобные температурные условия указывают на предпосылки протекания УНТ-метаморфизма пород, слагающих фундамент Восточно-Антарктического щита.

Литература

1. Равич М. Г., Климов Л. В., Соловьев Д. С. Докембрий Восточной Антарктиды. М.: Недра, 1965. 470 с.
2. Abdrakhmanov I. A., Gulbin Yu. L. Granulite from the Bunger Hills, Eastern Antarctica: Mineral parageneses and terms of metamorphism. *Advances in Raw Material Industries for Sustainable Development Goals*, 2021. Taylor & Francis Group, London, UK, pp. 70–77.
3. De Capitani C., Petrakakis K. The computation of equilibrium assemblage diagrams with Theriak/Domino software. *American Mineralogist*, 2010. V. 95, pp. 1006–1016.
4. Elkins T. L., Grove T. L. Ternary feldspar experiments and thermodynamic models. *American Mineralogist*, 1990. V. 75, pp. 544–559.
5. Fuhrman M. L., Lindsey D. H. Ternary-feldspar modeling and thermometry. *American Mineralogist*, 1988. V. 75, pp. 201–215.
6. Harley S. L., Green D. H. Garnet—orthopyroxene barometry for granulites and peridotites. *Nature*, 1982. V. 300, pp. 697–701.
7. Holland T. J. B., Powell R. An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest. *J. Metamorphic Geology*, 1998. V. 16, pp. 309–343.
8. Lee H. Y., Ganguly J. Equilibrium Compositions of Coexisting Garnet and Orthopyroxene: Experimental Determinations in the System FeO-MgO-Al₂O₃-SiO₂, and Applications. *Journal of Petrology*, 1988. V. 29, pp. 93–113.
9. Sheraton J. W., Tingey R. J., Oliver R. L., Black L. P. Geology of the Bunger Hills-Denman Glacier region, East Antarctica. *AGSO Bull.* 1995. No. 244. 136 p.
10. Stýve K., Willson C. J. L. Interaction between deformation and charnockite emplacement in the Bunger Hills, East Antarctica. *Struct. Geol.* 1990. V. 12, pp. 767–783.
11. Symmes G. H., Ferry J. M. Calculation of the effects of carbonates on the course of prograde metamorphism of average pelite. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1991. V. 108, pp. 419–438.
12. Tucker N. M., Hand M., Kelsey D. E., Taylor R., Clark C., Payne J. L. A tripartite approach to unearthing the duration of high temperature conditions versus peak metamorphism: An example from the Bunger Hills, East Antarctica. *Precambrian Research*, 2018. V. 314, pp. 194–220.
13. Whitney D. L., Evans B. W. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *Amer. Miner.* 2010. Vol. 95. P. 185–187.

References

1. Ravich M. G., Klimov L. V., Soloviev D. S. *Dokembriy Vostochnoy Antarktidy* (Precambrian East Antarctica). Moscow: Nedra, 1965, 470 p.
2. Abdrakhmanov I. A., Gulbin Yu. L. Granulite from the Bunger Hills, Eastern Antarctica: Mineral parageneses and terms of metamorphism. *Advances in Raw Material Industries for Sustainable Development Goals*, 2021, Taylor & Francis Group, London, UK, pp. 70–77.
3. De Capitani C., Petrakakis K. The computation of equilibrium assemblage diagrams with Theriak/Domino software. *American Mineralogist*, 2010, V. 95, pp. 1006–1016.
4. Elkins T. L., Grove T. L. Ternary feldspar experiments and thermodynamic models. *American Mineralogist*, 1990, V. 75, pp. 544–559.
5. Fuhrman M. L., Lindsey D. H. Ternary-feldspar modeling and thermometry. *American Mineralogist*, 1988, V. 75, pp. 201–215.
6. Harley S. L., Green D. H. Garnet—orthopyroxene barometry for granulites and peridotites. *Nature*, 1982, V. 300, pp. 697–701.
7. Holland T. J. B., Powell R. An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest. *J. Metamorphic Geology*, 1998, V. 16, pp. 309–343.
8. Lee H. Y., Ganguly J. Equilibrium Compositions of Coexisting Garnet and Orthopyroxene: Experimental Determinations in the System FeO-MgO-Al₂O₃-SiO₂, and Applications. *Journal of Petrology*, 1988, V. 29, pp. 93–113.
9. Sheraton J. W., Tingey R. J., Oliver R. L., Black L. P. Geology of the Bunger Hills-Denman Glacier region, East Antarctica. *AGSO Bull.*, 1995, No. 244, 136 p.
10. Stýve K., Willson C. J. L. Interaction between deformation and charnockite emplacement in the Bunger Hills, East Antarctica. *Struct. Geol.* 1990, V. 12, pp. 767–783.
11. Symmes G. H., Ferry J. M. Calculation of the effects of carbonates on the course of prograde metamorphism of average pelite. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1991, V. 108, pp. 419–438.
12. Tucker N. M., Hand M., Kelsey D. E., Taylor R., Clark C., Payne J. L. A tripartite approach to unearthing the duration of high temperature conditions versus peak metamorphism: An example from the Bunger Hills, East Antarctica. *Precambrian Research*, 2018, V. 314, pp. 194–220.
13. Whitney D. L., Evans B. W. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *Amer. Miner.*, 2010, V. 95, pp. 185–187.

Поступила в редакцию / Received 24.12.2020