

УДК 552.42 (99)

## **ЭВОЛЮЦИЯ МИНЕРАЛЬНОГО СОСТАВА ГРАНУЛИТОВ ОАЗИСА БАНГЕРА, ВОСТОЧНАЯ АНТАРКТИДА, КАК ОТРАЖЕНИЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ОБСТАНОВОК ИХ ФОРМИРОВАНИЯ**

**И. А. Абдрахманов<sup>1\*</sup>, Ю. Л. Гульбин<sup>2</sup>, И. М. Гембицкая<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана имени академика И. С. Грамберга (Английский проспект, 1, Санкт-Петербург, Россия, 190121), \*ilnur\_01\_95@mail.ru*

<sup>2</sup> *Санкт-Петербургский горный университет (21-я линия В.О., 2, Санкт-Петербург, Россия, 199106)*

Рассмотрены закономерности эволюции вещественного состава метапелитовых гранулитов. На основе данных минеральной термобарометрии, физико-химического моделирования и изотопного датирования парагенезисов выделено два этапа мезопротерозойского метаморфизма. Показано, что более ранний этап характеризовался сверхвысокими (> 900 °С) пиковыми температурами и был связан с коллизионным событием в ходе формирования суперконтинента Родиния. Второй этап протекал в условиях амфиболитовой фации в обстановке постколлизионного растяжения орогена.

Ключевые слова: метапелитовые гранулиты; геотермобарометрия; изохимические диаграммы; УНТ метаморфизм; оазис Бангера; Восточная Антарктида

Для цитирования: Абдрахманов И. А., Гульбин Ю. Л., Гембицкая И. М. Эволюция минерального состава гранулитов оазиса Бангера, Восточная Антарктида, как отражение геодинамических обстановок их формирования // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 5. С. 6–9. doi: 10.17076/geo1675

## **I. A. Abdrakhmanov<sup>1\*</sup>, Yu. L. Gulbin<sup>2</sup>, I. M. Gembitskaya<sup>2</sup>. EVOLUTION OF MINERAL ASSEMBLAGES IN GRANULITES FROM BUNGER HILLS, EAST ANTARCTICA, AS A RESULT OF THEIR GEODYNAMIC SETTINGS**

<sup>1</sup> *VNIIOkeangeologia (1 Angliiskiy Ave., St. Petersburg, Russia), \*ilnur\_01\_95@mail.ru*

<sup>2</sup> *Saint Petersburg Mining University (2 21st Linia V.O., St. Petersburg, Russia)*

The paper discusses the mineral composition of metapelitic granulites. Two phases of Mesoproterozoic metamorphism are suggested from mineral thermobarometry, isochemical phase diagram modeling, and geochronology. It is shown that the early metamorphism was of ultra-high temperature (UHT) grade and associated with collisional tectonics during the Rodinia supercontinent amalgamation. The later metamorphism was amphibolite-facies and took place in a post-collisional extensional tectonic regime.

Keywords: metapelitic granulite; geothermobarometry; isochemical phase diagram; UHT metamorphism; Bunger Hills; East Antarctica

For citation: Abdrakhmanov I. A., Gulbin Yu. L., Gembitskaya I. M. Evolution of mineral assemblages in granulites from Bunger Hills, East Antarctica, as a result of their geodynamic settings. *Trudy Kareli'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022;5:6–9. doi: 10.17076/geo1675

**Геология.** Комплекс магматических и метаморфических пород оазиса Бангера (западная часть Земли Уилкса) является частью Восточно-Антарктического щита. В рамках геодинамической реконструкции Австрало-Антарктического сегмента Гондваны эта область рассматривается как юго-западная оконечность мезопротерозойского складчатого пояса Олбани-Фрейзер [Tucker et al., 2018]. По данным российских и австралийских геологов [Равич и др., 1965; Sheraton et al., 1995], территория оазиса сложена в южной части крупными телами неоархейских тоналит-гранитовых ортогнейсов (~2800–2700 млн лет), в северной – вулканогенно-осадочной толщей палеопротерозойского возраста (1900–1650 млн лет), смятой в изоклинальные складки и метаморфизованной в условиях гранулитовой фации. В составе толщи преобладают интенсивно мигматизированные парагнейсы (метапелитовые гранулиты); подчиненное значение имеют амфибол-биотит-пироксеновые сланцы и гнейсы (основные гранулиты). Толща прорвана крупными телами синколлизонных чарнокитоидов с возрастом 1170–1150 млн лет.

**Петрография.** Метапелитовые гранулиты сложены преобладающими Grt+Sil ( $\pm$ Crd), Grt+Crd и Grt+Opx ( $\pm$ Crd) парагенезисами. Гранат (Prp 30–40 %) образует относительно крупные гранобласты (сокращения минералов по: [Kretz, 1983]). Более мелкие зерна силлиманита и кордиерита (Mg# 78–89) формируют линзовидные агрегаты, в интерстициях которых располагаются выделения ильменита и алюмошпинелей, включая низкоцинкистый (ZnO 1–3 мас. %) герцинит (Spl 17–52 %). Силлиманит представлен тремя генерациями, которые наблюдаются в виде включений в гранате (Sil<sub>1</sub>), призматических кристаллов в матриксе (Sil<sub>2</sub>) и тонкоигольчатых агрегатов, замещающих кордиерит вдоль межзеренных границ (Sil<sub>3</sub>). Характерным минералом Grt-Sil гранулитов выступает рутил. Ортопироксен (En 56–61 %) обогащен алюминием (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> до 7–9 мас. %, Al<sup>M1</sup> до 0,19–0,20 к.ф.). С перечисленными минералами ассоциируют умеренно-кислый плагиоклаз с антипертитами и мезопертит;

ксеноморфные выделения полевых шпатов интерпретируются как признак частичного плавления парагнейсов. В ограниченном количестве присутствует высокотитанистый (TiO<sub>2</sub> 3–5 мас. %) биотит (Mg# 65–84), образующий включения в гранате (Bt<sub>1</sub>), пластинчатые кристаллы в матриксе (Bt<sub>2</sub>) и совместно с кварцем входящий в состав симплектитов, замещающих гранат и ортопироксен (Bt<sub>3</sub>).

**Термобарометрия.** Особенности вещественного состава гранулитов указывают на сверхвысокие (> 900 °C) пиковые температуры их образования. Минеральными индикаторами УHT метаморфизма выступают: (а) парагенезис шпинели с кварцем [Harley, 2008]; (б) высокое содержание элементов-примесей в кварце (Al 20–175 ppm, Fe 35–1260 ppm, Ti 150–280 ppm). Согласно показаниям «Ti-в-кварце» геотермобарометра [Huang, Audétat, 2012], для давления 6–7 кбар температура кристаллизации этого минерала могла достигать 980–1000 °C. С распадом высокотемпературного твердого раствора кварца связано появление в кварцевых зернах игловидных микровключений рутила и герцинита [Гульбин и др., 2022]; (в) высокое содержание глинозема в ортопироксене. По данным Grt-Opx термобарометрии [Harley, Green, 1982], два минерала были уравновешены в интервале температур 910–970 °C и давлений 5–7 кбар; (г) широкое развитие в гранулитах закономерных сростков Ilm-Crn-Mag, Ilm-Crn-Ti-Mag-Usp-Rt, Ilm-Rt-Ghn состава, образование которых связано с распадом высокотемпературных твердых растворов. В их числе – пластинчатых сростков ильменита и титансодержащего магнетита с необычно высоким содержанием ульвошпинелевого минала (до 55–78 мол. %), возникших в результате распада твердого раствора Ti-Mag<sub>ss</sub> при температуре, возможно, превышавшей 1100 °C [Абдрахманов и др., 2021].

**Эволюция метаморфизма.** Результаты моделирования минеральных парагенезисов (метод изохимических диаграмм, программа Theriak/Domino) в сочетании с данными «Ti-в-биотите» геотермометрии [Henry et al., 2005] позволяют оценить P-T параметры образования раннего парагенезиса (Grt+Sil<sub>1</sub>+Bt<sub>1</sub>)

значениями 6–7 кбар, 760–830 °С. В ходе проградного метаморфизма давление оставалось примерно постоянным или (в случае рутилсодержащих ассоциаций) возрастало до 8–10 кбар. Пиковые парагенезисы (Grt + Sil<sub>2</sub> + Spl, Grt + Crd + Spl, Grt + Оpx + Crd + Spl) формировались в субсолидусной и гиперсолидусной области (6–7 кбар, >950 °С). Стабилизации шпинели способствовало снижение активности воды в системе, вызванное частичным плавлением парагнейсов. На ретроградной стадии имело место изобарическое (при давлении ~ 5 кбар) охлаждение до температуры 850–900 °С, приведшее к частичному перераспределению фемических компонентов между сосуществующими минералами. Последующий рост литостатического и водного давления (до ~ 6 кбар при температуре около 750 °С) стал причиной появления в составе гранулитов позднего парагенезиса (Sil<sub>3</sub> + Bt<sub>2-3</sub>).

**Геодинамическая интерпретация.** По данным LA-ICP-MS U-Pb датирования циркона и монацита из парагнейсов [Tucker et al., 2018], возраст последнего «омоложен» в сравнении с возрастом циркона. Результаты датирования ограничивают временной интервал гранулитового метаморфизма значениями 1220–1180 млн лет, «постпиковых» изменений пород – значениями 1180–1100 млн лет. Результаты наших исследований позволяют интерпретировать эти данные как свидетельство двух этапов метаморфизма. Более ранний «гранулитовый» этап характеризовался закрученной по часовой стрелке «декомпрессионной» P-T траекторией и был связан с одним из коллизионных событий, сопровождавших формирование суперконтинента Родиния. Более поздний «амфиболитовый» этап проявился в обстановке постколлизионного растяжения, вызванной коллапсом орогена, и протекал в условиях роста давления как результата утолщения земной коры за счет интенсивного гранитоидного магматизма.

## Литература

- Абдрахманов И. А., Гульбин Ю. Л., Гембицкая И. М. Ассоциация Fe–Mg–Al–Ti–Zn оксидов в гранулитах оазиса Бангера, Восточная Антарктида: свидетельства метаморфизма сверхвысоких температур // Записки РМО. 2021. Т. 150, № 4. С. 38–76. doi: 10.31857/S086960552104002X
- Гульбин Ю. Л., Абдрахманов И. А., Гембицкая И. М., Васильев Е. А. Ориентированные микровключения оксидов системы Al–Fe–Mg–Ti в кварце из метапелитовых гранулитов оазиса Бангера, Восточная Антарктида // Записки РМО. 2022. Т. 151, № 4. С. 1–18. doi: 10.31857/S0869605522040037

- Равич М. Г., Климов Л. В., Соловьев Д. С. Докембрий Восточной Антарктиды. М.: Недра, 1965. 470 с.
- Harley S. L. Refining the P-T records of UHT crustal metamorphism // *J. Metamorph. Geol.* 2008. Vol. 26. P. 125–154. doi: 10.1111/j.1525-1314.2008.00765.x
- Harley S. L., Green D. H. Garnet-orthopyroxene barometry for granulites and peridotites // *Nature.* 1982. Vol. 300. P. 697–701. doi: 10.1038/300697A0
- Henry D. J., Guidotti C. V., Thompson J. A. The Ti-saturation surface for low-to-medium pressure metapelitic biotites: Implications for geothermometry and Ti-substitution mechanisms // *Amer. Miner.* 2005. Vol. 90. P. 316–328. doi: 10.2138/am.2005.1498
- Huang R., Audétat A. The titanium-in-quartz (TitaniQ) thermobarometer: A critical examination and re-calibration // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2012. Vol. 84. P. 75–89. doi: 10.1016/j.gca.2012.01.009
- Kretz R. Symbols for rock-forming mineral // *Amer. Miner.* 1983. Vol. 68. P. 277–279.
- 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.
- Tucker N. M., Hand M., Kelsey D. E., Taylor R., Clark C., Paynee 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 Res.* 2018. Vol. 314. P. 194–220. doi: 10.1016/j.precamres.2018.06.006

## References

- Abdrakhmanov I. A., Gulbin Yu. L., Gembitskaya I. M. Fe–Mg–Al–Ti–Zn oxide assemblage in granulites of the Bunger Hills, East Antarctica: evidence of ultrahigh-temperature metamorphism. *Zapiski RMO = Proceedings of the RMS.* 2021;150(4):38–76. doi: 10.31857/S086960552104002X (In Russ.)
- Gulbin Yu. L., Abdrakhmanov I. A., Gembitskaya I. M., Vasilev E. A. Oriented microinclusions of oxides of the Al–Fe–Mg–Ti system in quartz from metapelitic granulites of the Bunger Hills, East Antarctica. *Zapiski RMO = Proceedings of the RMS.* 2022;151(4):1–18. doi: 10.31857/S0869605522040037 (In Russ.)
- Harley S. L. Refining the P-T records of UHT crustal metamorphism. *J. Metamorph. Geol.* 2008;26:125–154. doi: 10.1111/j.1525-1314.2008.00765.x
- Harley S. L., Green D. H. Garnet-orthopyroxene barometry for granulites and peridotites. *Nature.* 1982;300:697–701. doi: 10.1038/300697A0
- Henry D. J., Guidotti C. V., Thompson J. A. The Ti-saturation surface for low-to-medium pressure metapelitic biotites: Implications for geothermometry and Ti-substitution mechanisms. *Amer. Miner.* 2005;90:316–328. doi: 10.2138/am.2005.1498
- Huang R., Audétat A. The titanium-in-quartz (TitaniQ) thermobarometer: A critical examination and re-calibration. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2012;84:75–89. doi: 10.1016/j.gca.2012.01.009
- Kretz R. Symbols for rock-forming mineral. *Amer. Miner.* 1983;68:277–279.
- 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;244. 136 p.

*Ravich M. G., Klimov L. V., Solov'ev D. S.* Precambrian East Antarctica. Moscow: Nedra; 1965. 470 p. (In Russ.)  
*Tucker N. M., Hand M., Kelsey D. E., Taylor R., Clark C., Payne J. L.* A tripartite approach to unear-

thing the duration of high temperature conditions versus peak metamorphism: An example from the Bunge Hills, East Antarctica. *Precambrian Res.* 2018;314:194–220. doi: 10.1016/j.precamres.2018.06.006

*Поступила в редакцию / received: 22.08.2022; принята к публикации / accepted: 25.08.2022.*  
*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.*

#### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:**

##### **Абдрахманов Ильнур Альбертович**

ведущий инженер отдела геологии и минеральных ресурсов Антарктики

*e-mail: ilnur\_01\_95@mail.ru*

##### **Гульбин Юрий Леонидович**

д-р геол.-мин. наук, доцент, заведующий кафедрой минералогии, кристаллографии и петрографии

*e-mail: ygulbin@yandex.ru*

##### **Гембицкая Ирина Михайловна**

канд. геол.-мин. наук, ведущий научный сотрудник

*e-mail: gembitskaia\_im@pers.spmi.ru*

#### **CONTRIBUTORS:**

##### **Abdrakhmanov, Ilnur**

Leading Engineer

##### **Gulbin, Yuri**

Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Associate Professor, Head of Department

##### **Gembitskaya, Irina**

Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Leading Researcher