

УДК 552.48+551.2 (470.22)

МЕЗОПРОТЕРОЗОЙСКИЙ ГРАНУЛИТОВЫЙ КОМПЛЕКС ОАЗИСА БАНГЕРА, ВОСТОЧНАЯ АНТАРКТИДА: РТ-ТРАЕКТОРИИ И СВИДЕТЕЛЬСТВА ФОРМИРОВАНИЯ В ОБСТАНОВКЕ ТЕКТОНИЧЕСКОГО РАСТЯЖЕНИЯ

И. А. Абдрахманов^{1*}, Ю. Л. Гульбин²

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов
Мирового океана имени академика И. С. Грамберга (ФГБУ «ВНИИОкеангеология»)
(наб. р. Мойки, 120, Санкт-Петербург, Россия, 190121), *ilnur_01_95@mail.ru

² Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II (21-я линия В. о., 2,
Санкт-Петербург, Россия, 199106)

В работе обсуждаются вопросы тектоно-термальной эволюции гранулитового комплекса оазиса Бангера, расположенного в пределах провинции Уилкс Восточно-Антарктического подвижного пояса. В состав комплекса входит палеопротерозойская толща переслаивания мигматизированных гранат-силлиманит-кордиеритовых парагнейсов и мафических ортогнейсов, прорванная интрузиями основных, средних и кислых пород чарнокитовой серии. Особенности минерального состава парагнейсов (парагенезис низкоцинкистого герцинита с кварцем, закономерные срастания пламенеvidных выделений ильменита и ульвошпинели), а также показания минеральных термобарометров (Grt–Opx, «Ti-в-кварце», тройного полевошпатового, Ti–Mag–Ilm) указывают на сверхвысокие (>900 °C) температуры метаморфизма. РТ-траектории, построенные методом изохимических диаграмм (программа Theriak/Domino), отражают два эпизода метаморфической эволюции гранулитов: (1) изобарический нагрев при 6–7 кбар до ~940–1030 °C и (2) изобарическое или слабокомпрессионное охлаждение при 5–6 кбар до ~750 °C. С учетом результатов U–Pb-геохронологии циркона и монацита, полученных предшественниками, можно сопоставить эти эпизоды с двумя поздне-мезопротерозойскими тектоно-термальными событиями, относящимися к второму этапу эволюции складчатого пояса Олбани-Фрейзер, юго-западной оконечностью которого является оазис Бангера. Проградная ветвь РТ-траектории связана с обстановкой растяжения и демонстрирует изобарический нагрев пород средних горизонтов земной коры (20–23 км) в условиях высокого теплового потока вплоть до условий УНТ-метаморфизма. Ретроградная ветвь отражает позднеорогенное событие, приведшее к утолщению земной коры. Подобный сценарий описывает характерные черты тектонической эволюции долгоживущих аккреционных орогенов, выраженной в чередовании периодов растяжения земной коры с кратковременными периодами сжатия, отвечающими за синхронное охлаждение литосферы.

Ключевые слова: гранулит; протерозой; РТ-траектории; метаморфизм сверхвысоких температур; аккреционный ороген; оазис Бангера

Для цитирования: Абдрахманов И. А., Гульбин Ю. Л. Мезопротерозойский гранулитовый комплекс оазиса Бангера, Восточная Антарктида: P–T-траектории и свидетельства формирования в обстановке тектонического растяжения // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 2. С. 97–100. doi: 10.17076/geo2182

I. A. Abdrakhmanov^{1*}, Yu. L. Gulbin². MESOPROTEROZOIC GRANULITE COMPLEX OF THE BUNGER HILLS, EAST ANTARCTICA: P–T PATHS AND EVIDENCE FOR AN EXTENSIONAL TECTONIC SETTING

¹All-Russian Scientific Research Institute for Geology and Mineral Resources of the Ocean (VNIIOkeangeologia) (120 Moika River Emb., 190121 St. Petersburg, Russia), *ilnur_01_95@mail.ru

²Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University (2 21st Line V.O., 199106 St. Petersburg, Russia)

The paper discusses the tectono-thermal evolution of the Bunger Hills granulite complex located in the Circum-East Antarctic mobile belt. The complex comprises a Paleoproterozoic layered suite which consists of foliated and migmatitic garnet-cordierite-sillimanite-bearing gneiss and mafic orthogneiss intruded by plutons of gabbro, monzogabbro, monzodiorite, and granite of the charnockite series. The indicative mineral assemblages in metapelitic granulites (paragenesis of Zn-poor hercynite with quartz, intergrowth of exsolved ilmenite and ulvöspinel) as well as geothermobarometry (Grt–Opx, Ti-in-Quartz, ternary feldspar, Ti–Mag–Ilm) records provide evidence for ultrahigh-temperature (>900 °C) metamorphism. The P–T paths modeled by Theriak/Domino reflect two episodes of the metamorphic evolution: (1) isobaric heating at 6–7 kbar up to ~940–1030 °C, (2) near-isobaric or slightly compressive cooling at 5–6 kbar till ~750 °C. Considering previous results on U–Pb zircon and monazite geochronology, both episodes can be matched with two late Mesoproterozoic tectono-thermal events relating to the second stage of the evolution of the Albany–Fraser Orogen, which encompasses the Bunger Hills region as its westernmost extremity. The prograde P–T trajectory is associated with an extensional tectonic regime with isobaric heating of rocks at mid-crustal levels under high-heat flux until the conditions of UHT metamorphism. The retrograde trajectory reflects a late-orogenic event causing crustal thickening. This scenario describes the tectonic development of long-lived accretionary orogens, where crustal thinning alternates with short-term thickening periods responsible for synchronous cooling of the lithosphere.

Keywords: granulite; Proterozoic; P–T path; UHT metamorphism; accretionary orogen; Bunger Hills

For citation: Abdrakhmanov I. A., Gulbin Yu. L. Mesoproterozoic granulite complex of the Bunger Hills, East Antarctica: P–T paths and evidence for an extensional tectonic setting. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 2. P. 97–100. doi: 10.17076/geo2182

Гранулитовые комплексы, в том числе с проявлениями УНТ-метаморфизма, играют важную роль в геологическом строении Восточно-Антарктического щита. В тектонической провинции Уилкс (Земля Уилкса, Земля Адели и Берег Георга V) выходы докембрийских пород приурочены к оазису Бангера и островам Уиндмилл. Оазис Бангера сложен тоналит-гранитовыми ортогнейсами, возраст магматического протолита которых составляет ~2700 Ma [Tucker et al., 2017]. С неоархейскими породами ассоциирована палеопротерозойская толща переслаивания смятых в складки и мигматизированных гранат-силлиманит-кордиеритовых парагнейсов (1900–1800 Ma) и пироксен-роговообманковых ортогнейсов (1750–1650 Ma) [Sheraton et al.,

1992; Tucker et al., 2017], прорванная интрузиями основных, средних и кислых пород чарнокитовой серии [Равич и др., 1965].

Особенности минерального состава парагнейсов (парагенезис низкоцинкистого герцинита с кварцем; присутствие в породах высокомагнезиального граната (Py_{30–40}) и ортопироксена с содержанием Al₂O₃ до 8,2–9,2 мас. %; широкое развитие мезопертитов; закономерные срастания пламеневидных выделений титаномагнетита и ульвошпинели (Usp_{55–78})), а также показания минеральных термобарометров (Grt–Opx, «Ti-в-кварце», тройного полевошпатового, Ti–Mag–Ilm) указывают на сверхвысокие (>900 °C) температуры метаморфизма [Абдрахманов и др., 2021; Abdrakhmanov et al., 2024].

Закономерности РТ-эволюции и геодинамического режима формирования гранулитов оазиса Бангера являются предметом дискуссии. В работе [Stüwe, Powell, 1989] на основе данных минеральной термобарометрии и взаимоотношений минералов был сделан вывод о том, что проградная история гранулитового комплекса протекала в условиях растяжения земной коры и декомпрессии, а ретроградная – в условиях компрессии (от 4 до 7 кбар) вследствие утолщения земной коры из-за тектонической нестабильности утоненной литосферы и интенсивной магматической деятельности. Позже эта концепция подверглась критике [Tucker, Hand, 2016; Tucker et al., 2018]. С учетом микроструктурных особенностей метапелитовых гнейсов и данных физико-химического моделирования минеральных парагенезисов было показано, что после достижения пиковых условий метаморфизм протекал в условиях декомпрессии (от 7–9 до 5–6 кбар). На ретроградной стадии имело место изобарическое или слабодекомпрессионное охлаждение.

В настоящей работе для изучения термобарической эволюции гранулитов использовался метод изохимических диаграмм. Результаты моделирования (псевдосечения, графики изоплет пиропового минала в гранате и Al^VI в ортопироксене) в сочетании с данными минеральной термобарометрии позволили ограничить температуру и давления пиковых парагенезисов (Grt–Crd–Sp–Ksp–Pl–Ilm–Qz и Grt–Crd–Opx–Pl–Kfs–Ilm–Qz) значениями >920 °С, 5–7 кбар. Появлению в составе парагенезисов железистой шпинели способствовало частичное плавление парагнейсовых толщ и падение активности воды в системе. Построенные РТ-траектории отражают два эпизода метаморфической эволюции: (1) изобарический нагрев при 6–7 кбар до ~ 940 – 1030 °С в области устойчивости силлиманита, кордиерита и ортопироксена, ограниченной со стороны более высоких давлений равновесием Ilm–Rt; (2) изобарическое или слабокомпрессионное охлаждение при 5–6 кбар до ~ 750 °С в поле устойчивости кордиерита.

С учетом результатов U–Pb-геохронологии циркона и монацита, полученных предшественниками, можно сопоставить эти эпизоды с двумя поздне-мезопротерозойскими тектоно-термальными событиями. Первое имело место в интервале 1240–1180 млн лет, с ним исследователи связывают метаморфизм гранулитовой фации [Tucker et al., 2018]. Второе – в интервале 1200–1170 млн лет, в это время произошло внедрение интрузий габброидов и чарнокитовых гранитов [Sheraton et al., 1992; Tucker

et al., 2017]. Оба события соотносятся с вторым этапом эволюции складчатого пояса Олбани-Фрейзер, юго-западной оконечностью которого считается оазис Бангера. Этот этап протекал в условиях растяжения земной коры (в обстановке задугового спрединга после присоединения островной дуги к континенту), о чем свидетельствует тесная ассоциация высокоградиентного метаморфизма с интрузиями чарнокитоидов [Morrissey et al., 2017]. Геологическим свидетельством рассматриваемой геодинамической обстановки в пределах оазиса Бангера является широкое развитие пластических деформаций (D_1), синхронных с пиковой стадией метаморфизма и проявленных в виде преобладающей сланцеватости и полосчатости в гранулитах и мигматитах (S_1), а также структур будинажа гранитовых жил и прослоев метабазитов, которые, по мнению К. Стюве и Р. Пауэлла [Stüwe, Powell, 1989], указывают на условия растяжения. Вероятно, именно со стадией растяжения связана проградная ветвь РТ-траектории, демонстрирующая изобарический нагрев пород средних горизонтов земной коры (20–23 км) в условиях высокого теплового потока вплоть до условий УНТ-метаморфизма. Смена деформаций растяжения (D_1) деформациями сжатия (D_2 по [Stüwe, Powell, 1989]; D_2 – D_3 по [Sheraton et al., 1995]) стала причиной складчатости метаморфической толщи; исследователи соотносят эти деформации с постпиковой стадией [Stüwe, Powell, 1989]. Можно предположить, что ретроградная ветвь РТ-траектории отражает позднеорогенное событие, приведшее к утолщению земной коры. Подобный сценарий находит подтверждение в рамках модели тектонической эволюции долгоживущих аккреционных орогенов [Collins, 2002], согласно которой смена периодов растяжения земной коры, доминирующих в геологической истории этих орогенов, кратковременными эпизодами сжатия отвечает за синхронное охлаждение литосферы.

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
- Равич М. Г., Климов Л. В., Соловьев Д. С. Докембрий Восточной Антарктиды. М.: Недра, 1965. 470 с.
- Abdrakhmanov I. A., Gulbin Yu. L., Skublov S. G., Galankina O. L. Mineralogical constraints on the pressure–temperature evolution of granulites in the Bunger Hills, East Antarctica // Minerals. 2024. Vol. 14. Art. 488. doi: 10.3390/min14050488

Collins W. J. Nature of extensional accretionary orogens // *Tectonics*. 2002. Vol. 21(4). P. 1024. doi: 10.1029/2000TC001272

Morrissey L. J., Hand M., Kelsey D. E. A curious case of agreement between conventional thermobarometry and phase equilibria modelling in granulites: New constraints on P-T estimates in the Antarctica segment of the Musgrave-Albany-Fraser-Wilkes Orogen // *J. Metamorph. Geol.* 2017. Vol. 35(9). P. 1023–1050. doi: 10.1111/jmg.12266

Sheraton J. W., Black L. P., Tindle A. G. Petrogenesis of plutonic rocks in a Proterozoic granulite-facies terrane – the Bunger Hills, East Antarctica // *Chem. Geol.* 1992. Vol. 97. P. 163–198.

Sheraton J. W., Tingey R. J., Oliver R. L., Black L. P. Geology of the Bunger Hills-Denman Glacier region, East Antarctica // *AGSO Bull.* Canberra. 1995. No. 244. 136 p.

Stüwe K., Powell R. Metamorphic evolution of the Bunger Hills, East Antarctica: evidence for substantial post-metamorphic peak compression with minimal cooling in a Proterozoic orogenic event // *J. Metamorph. Geol.* 1989. Vol. 7. P. 449–464. doi: 10.1111/j.1525-1314.1989.tb00608.x

Tucker N. M., Hand M. New constraints on metamorphism in the Highjump Archipelago, East Antarctica // *Antarctic Sci.* 2016. Vol. 28. P. 487–503. doi: 10.1017/S095410201600033X

Tucker N. M., Payne J. L., Clark C., Hand M., Taylor R. J. M., Kylander-Clark A. R. C., Martin L. Proterozoic reworking of Archean (Yilgarn) basement in the Bunger Hills, East Antarctica // *Precambrian Res.* 2017. Vol. 298. P. 16–38. doi: 10.1016/j.precamres.2017.05.013

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. Assemblage of Fe–Mg–Al–Ti–Zn oxides in granulites of the Bunger Hills, East Antarctica: Evidence of ultrahigh-temperature metamorphism. *Geol. Ore Deposits*. 2022;64(8):519–549. doi: 10.1134/S1075701522080025

Abdrakhmanov I. A., Gulbin Yu. L., Skublov S. G., Galankina O. L. Mineralogical constraints on the pressure-temperature evolution of granulites in the Bunger Hills, East Antarctica. *Minerals*. 2024;14:488. doi: 10.3390/min14050488

Collins W. J. Nature of extensional accretionary orogens. *Tectonics*. 2002;21(4):1024. doi: 10.1029/2000TC001272

Morrissey L. J., Hand M., Kelsey D. E. A curious case of agreement between conventional thermobarometry and phase equilibria modelling in granulites: New constraints on P-T estimates in the Antarctica segment of the Musgrave-Albany-Fraser-Wilkes Orogen. *J. Metamorph. Geol.* 2017;35(9):1023–1050. doi: 10.1111/jmg.12266

Ravich M. G., Klimov L. V., Solov'ev D. S. The Precambrian of East Antarctica. Jerusalem: Israel Program for Scientific Translations; 1968.

Sheraton J. W., Black L. P., Tindle A. G. Petrogenesis of plutonic rocks in a Proterozoic granulite-facies terrane – the Bunger Hills, East Antarctica. *Chem. Geol.* 1992;97:163–198.

Sheraton J. W., Tingey R. J., Oliver R. L., Black L. P. Geology of the Bunger Hills-Denman Glacier region, East Antarctica. *AGSO Bull.* Canberra; 1995. No. 244. 136 p.

Stüwe K., Powell R. Metamorphic evolution of the Bunger Hills, East Antarctica: evidence for substantial post-metamorphic peak compression with minimal cooling in a Proterozoic orogenic event. *J. Metamorph. Geol.* 1989;7:449–464. doi: 10.1111/j.1525-1314.1989.tb00608.x

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;314:194–220. doi: 10.1016/j.precamres.2018.06.006

Tucker N. M., Hand M. New constraints on metamorphism in the Highjump Archipelago, East Antarctica. *Antarctic Sci.* 2016;28:487–503. doi: 10.1017/S095410201600033X

Tucker N. M., Payne J. L., Clark C., Hand M., Taylor R. J. M., Kylander-Clark A. R. C., Martin L. Proterozoic reworking of Archean (Yilgarn) basement in the Bunger Hills, East Antarctica. *Precambrian Res.* 2017;298:16–38. doi: 10.1016/j.precamres.2017.05.013

Поступила в редакцию / received: 04.08.2025; принята к публикации / accepted: 23.12.2025.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Абдрахманов Ильнур Альбертович

канд. геол.-мин. наук, ведущий инженер отдела геологии и минеральных ресурсов Антарктики

e-mail: ilnur_01_95@mail.ru

Гулбин Юрий Леонидович

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

e-mail: ygulbin@yandex.ru

CONTRIBUTORS:

Abdrakhmanov, Ilnur

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

Gulbin, Yurii

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