

УДК 552.3+552.4

СИНХРОННОСТЬ ЧАСТИЧНОГО ПЛАВЛЕНИЯ В ЧУПИНСКИХ ГНЕЙСАХ И МЕТАГАББРОИДАХ БЕЛОМОРСКОГО ПОДВИЖНОГО ПОЯСА: РТ-УСЛОВИЯ МИГМАТИТООБРАЗОВАНИЯ И ВОЗРАСТ МИГМАТИТОВ

А. В. Юрченко*, Ш. К. Балтыбаев, Т. А. Мыскова

*Институт геологии и геохронологии докембрия РАН (наб. Макарова, 2, Санкт-Петербург, Россия, 199034), *yurchenko-nastya@yandex.ru*

Оценены РТ-условия и время частичного плавления мигматизированных пород Беломорского подвижного пояса: кианитсодержащих гнейсов чупинской толщи и прорывающих их протерозойских метагабброидов. В исследовании были применены методы термодинамического моделирования минералообразования на основе минимизации энергии Гиббса и U-Pb-метод датирования монацита и титанита методом изотопного разбавления (ID-TIMS). Моделирование минералообразования (PERPLE_X) и минеральная термобарометрия показали, что РТ-оценки формирования пород характеризуют метаморфизм в условиях высокотемпературной амфиболитовой, начальной гранулитовой фации умеренно высоких давлений: $T = 650\text{--}750\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 7,5\text{--}9,5$ кбар для глиноземистых гнейсов и $P = 8,0\text{--}10,5$ кбар для метагабброидов, с регрессивной ветвью метаморфизма, достигающего до $T = 550\text{--}590\text{ }^{\circ}\text{C}$ при давлениях $P = 4,5\text{--}6,0$ кбар. Установлено, что водонасыщенное плавление гнейсов и метагабброидов приводит к образованию гранитных или гранодиорит-тоналитовых расплавов при температуре $680\text{--}730\text{ }^{\circ}\text{C}$ при средних и умеренных давлениях. Моделирование минералообразования с соотношением $\text{CO}_2 : \text{H}_2\text{O} = 0,2 : 0,8$ наилучшим образом воспроизводит наблюдаемый минеральный парагенезис в обоих типах пород. Определение времени частичного плавления чупинских гнейсов выполнялось U-Pb-датированием монацита, а время мигматизации метагабброида устанавливалось U-Pb-датированием титанита. Результаты геохронометрии с использованием двух минералов выявили синхронность протекания частичного плавления в контрастных по составу протолитах: получены совпадающие в пределах погрешности определения возраста значения $\sim 1,85$ млрд лет для мигматитов по глиноземистым гнейсам и метагабброидам. РТ-оценки и результаты геохронометрии свидетельствуют о палеопротерозойском этапе тектоно-термальных событий, широко проявленном в пределах Беломорского подвижного пояса.

Ключевые слова: мигматизация; Беломорский подвижный пояс; чупинские гнейсы; метагабброиды; датирование; моделирование

Для цитирования: Юрченко А. В., Балтыбаев Ш. К., Мыскова Т. А. Синхронность частичного плавления в чупинских гнейсах и метагабброидах Беломорского подвижного пояса: РТ-условия мигматитообразования и возраст мигматитов // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 2. С. 168–171. doi: 10.17076/geo2176

Финансирование. Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда № 25-27-00117.

A. V. Yurchenko, Sh. K. Baltybaev, T. A. Myskova. SYNCHRONISM OF PARTIAL MELTING IN CHUPA GNEISSES AND METAGABBROIDS OF THE BELOMORIAN MOBILE BELT: P-T CONDITIONS OF MIGMATITE FORMATION AND AGE OF MIGMATITES

*Institute of Precambrian Geology and Geochronology, Russian Academy of Sciences (2 Nab. Makarova, 199034 St. Petersburg, Russia), *yurchenko-nastya@yandex.ru*

The P-T conditions and time of partial melting of migmatized rocks of the Belomorian mobile belt – kyanite-bearing gneisses of the Chupa Formation and the Proterozoic metagabbroids that intrude them – were estimated. The study employed thermodynamic modeling of mineral formation based on Gibbs energy minimization and the U-Pb isotope dilution method (ID-TIMS) of dating of monazite and titanite. Modeling of mineral formation (PERPLE_X) and mineral thermobarometry showed that the estimated P-T conditions correspond to high-temperature amphibolite and initial granulite facies metamorphism with moderately high pressures: $T = 650\text{--}750\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 7.5\text{--}9.5\text{ kbar}$ for aluminous gneisses and $P = 8.0\text{--}10.5\text{ kbar}$ for metagabbroids, with a regressive metamorphism path towards $T = 550\text{--}590\text{ }^{\circ}\text{C}$ at $P = 4.5\text{--}6.0\text{ kbar}$. It was established that water-saturated melting of gneisses and metagabbroids resulted in the formation of granite or granodiorite-tonalite melts at $680\text{--}730\text{ }^{\circ}\text{C}$ under medium and moderate pressures. Modeling of mineral formation with a $\text{CO}_2 : \text{H}_2\text{O}$ ratio of $0.2 : 0.8$ produced the best fit to the observed mineral paragenesis in both rock types. The timing of partial melting of the Chupa gneisses was determined by U-Pb dating of monazite, and the migmatization of the metagabbroid was dated by U-Pb dating of titanite. Geochronometry using two minerals revealed the synchrony of partial melting in compositionally contrasting protoliths: the $\sim 1.85\text{ Ga}$ age dating coincides within error for migmatites from aluminous gneisses and metagabbroids. The P-T estimates and geochronometry results indicate a Paleoproterozoic stage of tectonic-thermal events, widely manifested within the Belomorian Mobile Belt.

Keywords: migmatization; Belomorian Mobile Belt; Chupa gneisses; dating; metagabbroids; thermodynamic modeling

For citation: Yurchenko A. V., Baltybaev Sh. K., Myskova T. A. Synchronism of partial melting in Chupa gneisses and metagabbroids of the Belomorian Mobile Belt: P-T conditions of migmatite formation and age of migmatites. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 2. P. 168–171. doi: 10.17076/geo2176

Funding. This research was funded by the Russian Science Foundation, grant No. 25-27-00117.

Формирование гранитных расплавов при частичном плавлении метаморфических пород является важной составляющей тектонической эволюции, поскольку появление и перемещение анатектического расплава коренным образом изменяет реологические свойства пород, например, снижает их механическую прочность и увеличивает объем метаморфических толщ. Сам факт появления анатектических расплавов свидетельствует о достижении РТ-параметров не ниже условий высокотемпературной субфации амфиболитовой фации метаморфизма. Однако известно, что начало плавления пород зависит не только от РТ-параметров, но и от вещественного состава мигматизируемых пород, их структурно-текстурных особенностей, наличия (и состава) флюида.

В пределах площади распространения чупинской толщи Беломорского подвижного

пояса (БПП) нами изучались контрастные по химическому составу мигматизированные породы (глиноземистые гнейсы и секущие их метаморфизованные габброиды) с целью установления времени анатексиса и сравнения термодинамических режимов протекания частичного плавления в них.

БПП в виде покровно-складчатой структуры сложного строения простирается вдоль Белого моря полосой шириной $100\text{--}150\text{ km}$ и ограничен с юго-запада Карельским и с северо-востока Кольским архейскими кратонами (геоблоками) [Ранний..., 2005]. Он состоит преимущественно из гранитоидов и мигматизированных гнейсов архейского возраста с подчиненным количеством метаинтрузивных базит-ультрабазитовых тел и пегматитов палеопротерозойского возраста [Balagansky et al., 2015; Слабунов и др., 2016]. Расположенная в осевой части БПП

чупинская толща сплошной полосой или в виде разобщенных фрагментов сложена главным образом кианит-гранат-биотитовыми, гранат-биотитовыми, мусковит-биотитовыми и биотитовыми гнейсами с подчиненными прослоями амфиболовых сланцев и телами амфиболитов [Ранний..., 2005].

Среди изученных нами мигматизированных гнейсов чупинской толщи по петрографическому составу выделены: (1) Grt-Bt, (2) Ky-Grt-Bt, с количеством кианита от единичных зерен до 20 об. %, (3) лейкократовые существенно кварц-плагиоклазовые, в которых темноцветные минералы (гранат, биотит, единичные зерна кианита) не превышают 10 об. %, и (4) мусковитсодержащие, в которых мусковит находится в ассоциации или парагенезисе с описанными выше темноцветными минералами.

Для гнейсов характерны как мелкозернистые, так и крупнозернистые порфиrolепидогранобластовые, лепидогранобластовые, гранобластовые структуры и массивные, чаще полосчатые, текстуры. Как правило, порфиробласты представлены гранатом, гораздо реже – кианитом.

Мигматизация чупинских гнейсов проявлена неравномерно – встречаются породы как не затронутые мигматизацией, так и сильно мигматизированные, содержащие до 50–70 об. % лейкосомы. Мощность лейкосом варьирует от первых миллиметров до первых сантиметров. Они представлены в основном плагиоклаз-кварцевыми сегрегациями с единичными зернами биотита, мусковита и граната; изредка встречаются также разности с калиевым полевым шпатом.

Для определения времени мигматизации были отобраны пробы лейкосомы из чупинских гнейсов в зоне пологозалегающих надвигов северо-западного простирания.

Гнейс, содержащий лейкосому, представляет собой грубополосчатую, линзовидно-пятнистую крупно- и гигантозернистую породу, в которой лейкократовые обособления до 4 см по мощности состоят из кварца, плагиоклаза и единичных зерен граната.

Секущий гнейсы массив метагабброидов субширотного простирания сложен мигматизированными гранат-амфиболовыми кристаллосланцами и амфиболитами. Основными породообразующими минералами являются амфибол, средний-основной плагиоклаз, гранат, биотит, кварц.

Мигматизация массива проявлена неравномерно и представлена двумя типами лейкосом, отличающихся размером, минеральным составом и, не исключено, относящихся

к двум разным этапам или стадиям мигматитообразования.

Первые, более ранние лейкосомы небольшие по мощности: от совсем тонких миллиметровых прожилков до 5 см, состоят преимущественно из лейкократовых минералов – кварца и плагиоклаза, встречаются единичные зерна мелкого граната. Амфиболитизация вокруг этих лейкократовых обособлений не столь интенсивная, как вокруг лейкосом второго типа, секущих раннюю лейкосому и в которых более интенсивно проявлен лейкократовый материал.

Второй тип лейкосом связан с формированием зон пластического течения северо-западного простирания. В этих зонах лейкосома второго типа имеет вид крупнозернистых лейкократовых обособлений мощностью до 20–30 см, содержащих кварц, плагиоклаз, гранат и клинопироксен. Вокруг нее наблюдается интенсивная амфиболитизация и укрупнение зерен амфибола и граната. Титанит для датирования был отобран из второго типа лейкосом.

Наблюдаемые в породах (гнейсах и метагабброидах) метаморфические минеральные парагенезисы хорошо воспроизводятся при моделировании минералообразования в программе PERPLE_X [Connolly, 1990].

Парагенезисы Grt+Pl+Ky+Bt+Rt в гнейсах и Amp+Grt+Pl+Qz±Tnt±Cpx в метагабброидах на PT-диаграммах занимают области высокотемпературной амфиболитовой фации средних и умеренно высоких давлений. Этим оценкам не противоречат результаты минеральной термобарометрии, показывающие $T = 620\text{--}680\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $P = 6,2\text{--}9,8\text{ кбар}$ для гнейсов, $T = 550\text{--}710\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $P = 8,6\text{--}12,2\text{ кбар}$ для метагабброидов. Следует отметить, что для гнейсов получены более низкие оценки давления минералообразования, что может быть связано с особенностями установления химического равновесия между минералами в метагаббро и гнейсах.

Моделирование минералообразования с соотношением $\text{CO}_2 : \text{H}_2\text{O}$ во флюиде 0,2 : 0,8 наиболее адекватно воспроизводит минеральный парагенезис, наблюдаемый в шлифах. Повышение доли CO_2 (> 0,3) приводит к появлению карбонатов, что не соответствует природным наблюдениям. Уменьшение мольной доли воды от 1,0 до 0,6 во флюиде увеличивает начальную температуру плавления пород на 50–70 °C.

Температура появления гранитного расплава в породах разного состава хотя и несколько отличается, но по данным моделирования возможно одновременное образование анатектических лейкосом при 680–730 °C. Выявлено, что главнейшим параметром, влияющим

на температуру плавления, кроме состава протолита, является доля (активность) воды в метаморфическом флюиде.

Для двух проб монацита из глиноземистых гнейсов получены конкордантные значения возрастов 1853 ± 5 и 1854 ± 5 млн лет, а для дискордантной фигуративной точки изотопного состава титанита возраст по отношению $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ составил 1858 ± 3 млн лет. Линия дискордии, проведенная по всем фигуративным точкам измеренных изотопных отношений титанита и монацита, определяет возраст в точке пересечения этой линии с конкордией, равный 1852 ± 2 млн лет.

Таким образом, U-Pb-датирование монацита из мигматизированных чупинских гнейсов и титанита из метагаббро указывает на субсинхронное протекание анатексиса в сравниваемых породах в палеопротерозойское время ~ 1,85 млрд лет назад. РТ-оценки метаморфизма выявили условия высокотемпературной амфиболитовой – начальной гранулитовой фации умеренно высоких давлений: $T = 650\text{--}750$ °С, $P = 7,5\text{--}9,5$ кбар для глиноземистых гнейсов и $P \approx 8,0\text{--}10,5$ кбар для метагабброидов, с регрессивной ветвью метаморфизма, доходящего до $T = 550\text{--}590$ °С при давлениях $P = 4,5\text{--}6,0$ кбар.

Литература

Ранний докембрий Балтийского щита / Отв. ред. В. А. Глебовицкий. СПб.: Наука, 2005. 711 с.

Слабунов А. И., Азимов П. Я., Глебовицкий В. А., Жанг Л., Кевлич В. И. Архейская и палеопротерозойская мигматизация пород Беломорской

провинции Фенноскандинавского щита: петрология, геохронология, геодинамические следствия // ДАН. 2016. Т. 467, № 1. С. 71–74. doi: 10.7868/S0869565216070239

Balagansky V., Shchipansky A., Slabunov A. I., Gorbunov I., Mudruk S., Sidorov M., Azimov P., Egorova S., Stepanova A., Voloshin A. Archaean Kuru-Vaara eclogites in the northern Belomorian Province, Fennoscandian Shield: crustal architecture, timing, and tectonic implications // *Int. Geol. Rev.* 2015. Vol. 57. P. 1543–1565. doi: 10.1080/00206814.2014.958578

Connolly J. A. Multivariable phase-diagrams – an algorithm based on generalized thermodynamics // *Am. J. Sci.* 1990. Vol. 290. P. 666–718. doi: 10.2475/ajs.290.6.666

References

Balagansky V., Shchipansky A., Slabunov A. I., Gorbunov I., Mudruk S., Sidorov M., Azimov P., Egorova S., Stepanova A., Voloshin A. Archaean Kuru-Vaara eclogites in the northern Belomorian Province, Fennoscandian Shield: crustal architecture, timing, and tectonic implications. *Int. Geol. Rev.* 2015;57: 1543–1565. doi: 10.1080/00206814.2014.958578

Connolly J. A. Multivariable phase-diagrams – an algorithm based on generalized thermodynamics. *Am. J. Sci.* 1990;290:666–718. doi: 10.2475/ajs.290.6.666

Glebovitskii V. A. (ed.). Early Precambrian of the Baltic Shield. St. Petersburg: Nauka; 2005. 711 p. (In Russ.)

Slabunov A. I., Kevlich V. I., Azimov P. Ya., Glebovitskii V. A., Zhang L. Archean and Palaeoproterozoic migmatizations in the Belomorian Province, Fennoscandian Shield: petrology, geochronology, and geodynamic settings. *Doklady Earth Sciences*. 2016; 467(1):259–263. doi: 10.1134/S1028334X16030077

Поступила в редакцию / received: 31.07.2025; принята к публикации / accepted: 23.12.2025.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Юрченко Анастасия Владимировна

канд. геол.-мин. наук, научный сотрудник лаборатории петро- и рудогенеза

e-mail: yurchenko-nastya@yandex.ru

Балтыбаев Шаукет Каимович

д-р геол.-мин. наук, заведующий лабораторией петро- и рудогенеза, главный научный сотрудник

e-mail: shauket@mail.ru

Мыскова Татьяна Анатольевна

канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник лаборатории геологии и геодинамики

e-mail: tmyskova@gmail.com

CONTRIBUTORS:

Yurchenko, Anastasiya

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

Baltybaev, Shauket

Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Head of Laboratory, Chief Researcher

Myskova, Tatyana

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