

Савина Е.А., Перetyazhko И.С. Условия и процессы формирования кристобалитового клинкера, железистых и мелилит-нефелиновых паралав в пирометаморфическом комплексе Хамарин-Хурал-Хид, Восточная Монголия // Геология и геофизика. 2023. Т. 64. № 12. С. 1690–1715.

Peretyazhko I.S., Savina E.A. Melting processes of pelitic rocks in combustion metamorphic complexes of Mongolia: mineral chemistry, Raman spectroscopy, formation conditions of mullite, silicate spinel, silica polymorphs, and cordierite-group minerals // *Geosciences*. 2023. Vol. 13. N. 12. Article 377.

Peretyazhko I.S., Savina E.A., Khromova E.A. Minerals of the rhönite-kuratite series in paralavas from a new combustion metamorphic complex of Choir–Nyalga Basin (Central Mongolia): chemistry, mineral assemblages, and formation conditions // *Mineralogical Magazine*. 2017. Vol. 81. N. 4. P. 949–974.

Peretyazhko I.S., Savina E.A., Khromova E.A. Low-pressure (>4 MPa) and high-temperature (>1250 °C) incongruent melting of marly limestone: formation of carbonate melt and melilite–nepheline paralava in the Khamaryn–Khural–Khiid combustion metamorphic complex, East Mongolia // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2021. Vol. 176. Article 38.

Э.С. Вивдич^{1,2}, Ш.К. Балтыбаев^{1,2}

¹ – Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, г. Санкт Петербург, Россия
emily.vivdich@yandex.ru

² – Санкт-Петербургский государственный университет,
Институт наук о Земле, г. Санкт Петербург, Россия

Вариации давления при минералообразовании в тектонических зонах

E.S. Vivdich^{1,2}, Sh.K. Baltybaev^{1,2}

¹ – *Institute of Precambrian Geology and Geochronology RAS, St. Petersburg, Russia*

² – *St. Petersburg State University, Institute of Earth's Sciences, St. Petersburg, Russia*

Pressure variations during formation of minerals in tectonic zones

Abstract. The occurrence of “overpressure” is a challenging problem in metamorphic petrology. The paper examines the “overpressure” estimations in metamorphic rocks of the Meyeri tectonic zone (Southeast Fennoscandian Shield, Russia) using geothermobarometry methods. The PT estimations revealed pressure exceeding the lithostatic one by 1–4 kbar that is caused by additional tectonic stress during overthrusting of rocks of the Svecofennian belt on the Archean Karelian Craton. This method can be applied to other similar tectonic zones to detect the “overpressure” phenomenon.

Введение. Температура и давление – это основные факторы метаморфизма, установление природы которых является важной задачей при реконструкции условий метаморфического минералообразования. В случае давления обычно говорят о литостатическом, но также обсуждается вопрос появления давления, которое превышает литостатическое («overpressure») или ниже него («underpressure») [Gerya, 2015 и ссылки внутри]. Хотя численное моделирование подтверждает возможность появления «сверхдавления» благодаря тектоническому фактору [Schmalholz et al., 2014], сведения о выявленных природных примеров этого феномена практически отсутствуют.

В данной работе приводятся результаты РТ-оценки формирования пород Мейерской тектонической зоны [Балтыбаев и др., 1996, 2000] Северного Приладожья (Республика Ка-

релия), рассматриваемого как часть тектонической шовной структуры между палеопротерозойским Свекофенским подвижным поясом и архейским Карельским кратоном. Эта зона концентрирует большое количество месторождений и рудопроявлений [Ладожская..., 2020], поэтому знание условий формирования пород этой зоны полезно при прогнозно-поисковых работах.

Материалы и методы. Образцы метаморфических пород для изучения отобраны из автохтонного (окраина Карельского кратона) и аллохтонного (комплексы Свекофенского подвижного пояса) блоков Мейерской тектонической зоны. Состав минералов определен с помощью растрового электронного микроскопа JEOL JSM-6510LA с ЭДС JED-2200 (JEOL, Япония) в Институте геологии и геохронологии докембрия РАН (аналитик О.Л. Галанкина). Данные микроанализа обрабатывались в программе MINAL3 (автор Д.В. Доливо-Добровольский).

В работе применен подход геотермобарометрии, в основе которого лежит использование мультивариантных минеральных равновесий. Специальные программы на основе единой согласованной системы термодинамических данных позволяют построить множество линий минеральных реакций между чистыми фазами и миналами, входящими в состав минералов-твердых растворов, с учетом активностей миналов. Результаты расчетов могут быть представлены в виде системы линий реакций, пересекающихся в случае наличия равновесия в некоторой точке РТ-пространства. Одним из важных критериев достижения химического равновесия является пересечение линий минимум трех независимых реакций в одной точке.

РТ-параметры оценены с помощью программы winTWQ (версии 2.3) [Berman, 1991, 2007]. В расчетах применялась база термодинамических данных JUN92 [Berman, 1988] для пород базитового состава и база DEC06 [Berman, Aranovich, 1996; Berman et al., 2007] для метапелитов. Расчеты подготовлены с помощью TWQ_Comb [Доливо-Добровольский, 2006]. Для амфиболсодержащих парагенезисов в метабазитах также использован модуль avPT программы THERMOCALC (версия 3.40) с базой данных DS55s [Holland, Powell, 1998] и дополнением TC_Comb [Доливо-Добровольский, 2013].

Результаты работ. РТ-параметры становления химического равновесия в парагенезисе $Grt + Bt + Pl + Kfs + Qz$, типичном для метапелитов, оценены с учетом водно-углекислотного (или углекислотно-водного) флюида, мольная доля воды в котором изменялась от 0.3 до 0.7 по данным изучения флюидных включений в метаморфических и метайнтрузивных породах Северного Приладожья, включая породы тектонической зоны [Балтыбаев и др., 2000, 2022]. Полученные «пучки» включают пересечение трех независимых реакций и указывают на установления равновесия в диапазоне $P = 8.0\text{--}10.8$ при $T = 770\text{--}780$ °С (рис. 1а, б).

С помощью метода TWEEQU проанализированы минеральные ассоциации базитовых метаморфических пород. Для парагенезиса $Grt + Amp + Bt + Pl + Qz$ по пересечению трех независимых реакций получены РТ-параметры равновесия в диапазоне $P = 7.0\text{--}7.3$ кбар и $T = 690\text{--}730$ °С (рис. 1в, г).

Методом мультиравновесной термобарометрии в программе THERMOCALC получены повышенные РТ-параметры в исследуемых образцах метабазитов: в обр. Б-22-526 равновесное состояние фиксируется при $P = 7.7$ кбар и $T = 700$ °С (рис. 2а), в обр. Б-22-613 – при $P = 8.4$ кбар и $T = 730$ °С (рис. 2б). Оценки температуры и давления для этих же образцов, полученные в программе winTWQ, хотя и несколько ниже, но попадают в диапазоны среднеквадратических отклонений $sd(P)$ и $sd(T)$, рассчитываемых в программе THERMOCALC. Полу-

¹ Здесь и далее, минералы и их миналы: *Amp* – амфибол (*fAct* – ферроактинолит, *Prg* – паргасит, *Tr* – тремолит, *fTs* – феррочермакит, *Ts* – чермакит), *Bt* – биотит (*Ann* – аннит, *Eas* – истонит, *Phl* – флогопит, *Sdp* – сидерофиллит), *Grt* – гранат (*Alm* – альмандин, *Grs* – гроссуляр, *Prp* – пироп), *Pl* – плагиоклаз (*Ab* – альбит, *An* – анортит), *Kfs* – калиевый полевой шпат, *Qz* – кварц.

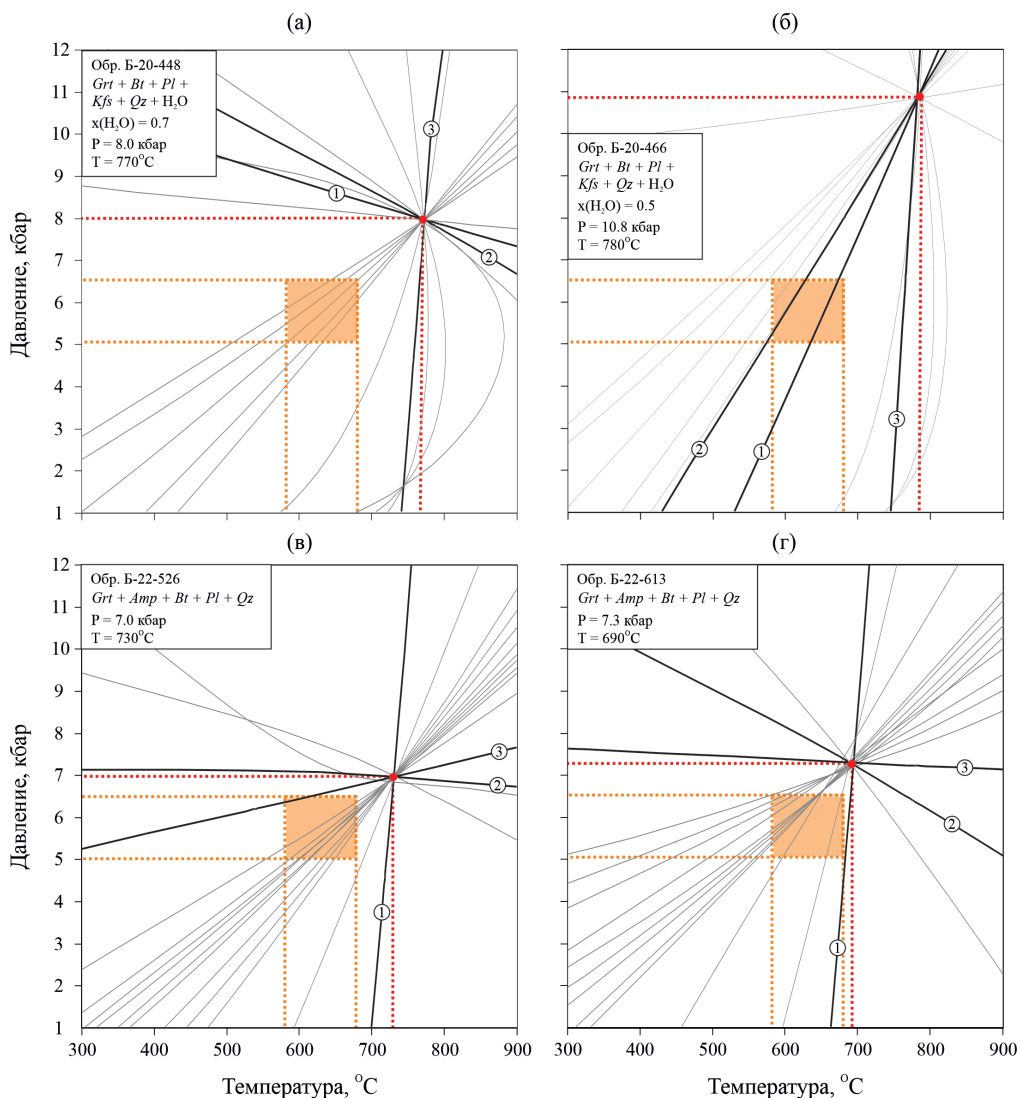


Рис. 1. РТ-диаграммы, рассчитанные в программе winTWQ, для образцов метapelитов (а, б) и метабазитов (в, г), демонстрирующие установление химического равновесия в рассмотренных образцах при давлениях, превышающих литостатическое на 1–4 кбар. Цифрами обозначены линии трех независимых реакций: а – 1) $3Alm + 3Eas + 2Grs + 6Qz = 2Prp + 6An + 3Ann$; 2) $4Kfs + 4Grs + 3Eas + 7Alm + 4H_2O = 7Ann + 12An + 2Prp$; 3) $Alm + Phl = Prp + Ann$; б – 1) $3Sdp + 6Qz + 3Prp + 2Grs = 2Alm + 6An + 3Phl$; 2) $3Sdp + 7Prp + 4Kfs + 4Grs + 4H_2O = 2Alm + 12An + 7Phl$; 3) $Alm + Phl = Prp + Ann$; в, г – 1) $Alm + Phl = Prp + Ann$; 2) $9fTs + 13Prp + 8Grs + 6Ab = 9Alm + 24An + 3Tr + 6Prg$; 3) $3fTs + 12Qz + 5Prp + 4Grs = 3Alm + 12An + 3Tr$. Здесь и на рис. 2, оранжевый прямоугольник – область пиковых значений регионального метаморфизма по [Балтыбаев и др., 2000].

ченные оценки давления существенно выше давлений, которые фиксируются в окружающих метаморфических породах: до 5–6 кбар по [Балтыбаев и др., 2000].

Выводы. Таким образом, в Мейерской тектонической зоне выявлены «сверхдавления», которые на 1–4 кбар превышают давление пика регионального метаморфизма (~7–11 кбар против 5–6 кбар). Причиной «сверхдавления» может служить дополнительная тектоническая

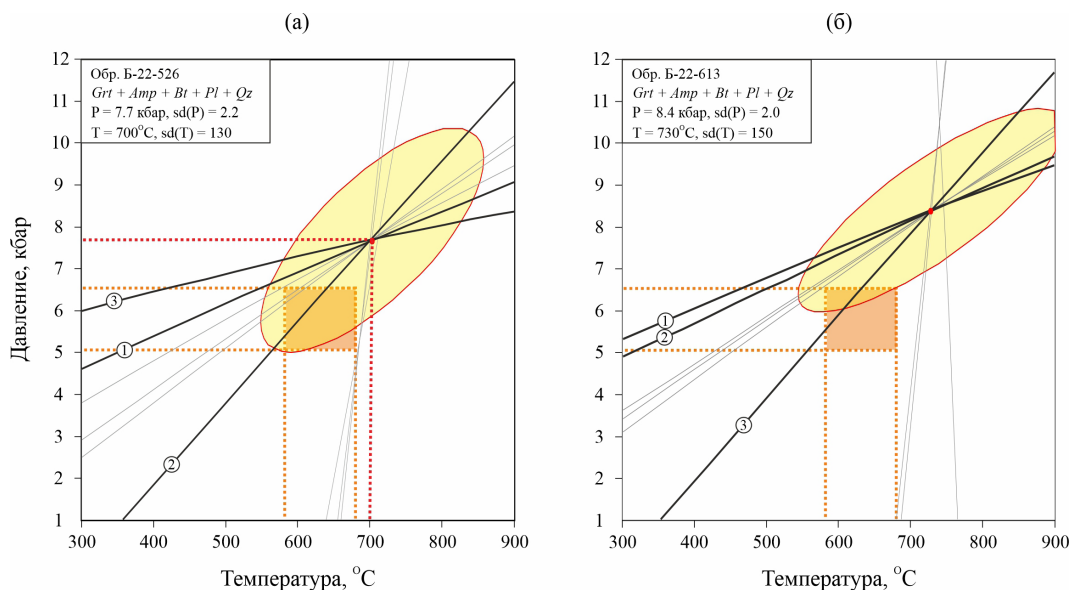


Рис. 2. P-T-параметры, рассчитанные в программе THERMOCALC, для парагенезиса $Grt + Amp + Bt + Pl + Qz$ из образцов метабазитов Б-22-526 (а) и Б-22-613 (б). Цифрами обозначены линии трех независимых реакций: а – 1) $Prp + 2Grs + 3Eas + 6Qz = 3Phl + 6An$; 2) $2Grs + 3Alm + 3Eas + 6Qz = 2Prp + 3Ann + 6An$; 3) $5Prp + 10Grs + 15Eas + 9fAct + 30Qz = 15Ann + 30An + 9Tr$; б – 1) $2Prp + 4Grs + 3Ts + 12Qz = 3Tr + 12An$; 2) $Prp + 2Grs + 3Eas + 6Qz = 6An + 3Phl$; 3) $2Grs + 3Alm + 3Eas + 6Qz = 2Prp + 6An + 3Ann$. $Sd(P)$ и $s_d(T)$ – стандартные отклонения для давления и температуры, соответственно, рассчитываемые программой.

нагрузка при надвигании пород Свектофеннского подвижного пояса на породы окраины Карельского кратона. Используемая методика оценок давления минералообразования может быть применена для оценки P-T-параметров подобных природных объектов в других регионах, что позволит полноценно оценить масштабы и роль механизма тектонического давления при минералообразовании.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-27-00106).

Литература

Балтыбаев Ш.К., Вивдич Э.С., Галанкина О.Л., Борисова Е.Б. Флюидный режим формирования гнейсов в Мейерской надвиговой зоне Северного Приладожья (юго-восток Фенноскандинавского щита) // Петрология. 2022. Т. 30. № 2. С. 166–193.

Балтыбаев Ш.К., Глебовицкий В.А., Козырева И.В. и др. Геология и петрология свектофеннитов Приладожья. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2000. 198 с.

Балтыбаев Ш.К., Глебовицкий В.А., Козырева И.В., Шульдинер В.И. Мейерский надвиг – главный элемент строения сутуры на границе Карельского кратона и Свектофеннского пояса в Приладожье, Балтийский щит // Доклады Академии наук. 1996. Т. 348. № 3. С. 353–356.

Доливо-Добровольский Д.В. TWQ_Comb: программа для автоматической генерации всех возможных комбинаций из выбранных анализов минералов и их обработки в программах SMPXEXE и TWQEXE термобарометрического комплекса TWQ [Berman, 1991], работающих в пакетном режиме. Версия 1.2.0.4. 2006. <http://www.dimadd.ru/ru/Programs/twqcomb>

Доливо-Добровольский Д.В. TC_Comb: оболочка программы THERMOCALC для эффективной мультиравновесной геотермобарометрии методом avPT с визуализацией и анализом результатов. 2013. URL: <http://www.dimadd.ru/ru/Programs/tccomb>

Ладожская протерозойская структура (геология, глубинное строение и минерагения) / Отв. ред. Н.В. Шаров. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2020. 435 с.

Berman R.G. Internally-consistent thermodynamic data for minerals in the system $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{MgO}-\text{FeO}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{TiO}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ // *Journal of Petrology*. 1988. Vol. 29. No. 2. P. 445–522.

Berman R.G. Thermobarometry using multiequilibrium calculations: a new technique with petrologic applications // *Canadian Mineralogist*. 1991. Vol. 29. No. 4. P. 833–855.

Berman R.G. WinTWQ (version 2.3): A software package for performing internally-consistent thermobarometric calculations // Geological Survey of Canada. 2007. Open File 5462 (revised). URL: <https://doi.org/10.4095/223228>

Berman R.G., Aranovich L.Y. Optimized standard state and solution properties of minerals: Model calibration for olivine, orthopyroxene, cordierite, garnet, and ilmenite in the system $\text{FeO}-\text{MgO}-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{TiO}_2-\text{SiO}_2$ // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1996. Vol. 126. P. 1–24.

Berman R.G., Aranovich L.Ya., Rancourt D.G., Mercier D.G. Reversed phase equilibrium constraints on the stability of Mg–Fe–Al biotite // *American Mineralogist*. 2007. Vol. 92. No 1. P. 139–150.

Gerya T. Tectonic overpressure and underpressure in lithospheric tectonics and metamorphism // *Journal of Metamorphic Geology*. 2015. Vol. 33. P. 785–800.

Holland T.J.B., Powell R. An internally-consistent thermodynamic dataset for phases of petrological interest // *Journal of Metamorphic Geology*. 1998. Vol. 16. P. 309–344.

Schmalholz S.M., Duretz T., Schenker F.L., Podladchikov Y.Y. Kinematics and dynamics of tectonic nappes: 2-D numerical modelling and implications for high and ultra-high pressure tectonism in the Western Alps // *Tectonophysics*. 2014. Vol. 631. P. 160–175.

Whitney D.L., Evans B.W. Abbreviations for names of rock-forming minerals // *American Mineralogist*. 2010. Vol. 95. P. 185–187.