

УДК 552.18

ТЕРМОБАРОМЕТРИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ РАВНОВЕСИЙ В МЕТАСОМАТИТАХ И МЕТАПОРФИРИТАХ БЕРЕЗИТОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ВЕРХНЕЕ ПРИАМУРЬЕ)

© 2015 О.В. Авченко¹, А.С. Вах^{1,2}, К.В. Чудненко³

¹Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, 690022; e-mail: office@fegi.ru;

²Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, 690950; e-mail: rectorat@dvfu.ru;

³Институт геохимии им. А.П.Виноградова СО РАН, Иркутск, 664033; e-mail: dir@igc.irk.ru;

Проведена термобарометрия минеральных равновесий метасоматитов и метапорфиритов Березитового месторождения (Верхнее Приамурье) на основе новых опубликованных уравнений. Оценки давления и температуры изменяются в небольших пределах и дают в среднем величину 4 ± 0.31 кбар и $566 \pm 12^\circ\text{C}$ (определение по центрам зональных гранатов) и 4.4 ± 0.24 кбар и $624 \pm 9^\circ\text{C}$ (определения по краевым зонам зональных гранатов). При этом Р-Т оценки метасоматитов и метапорфиритов отличаются незначительно друг от друга. Уточненная термобарометрия метасоматитов и метапорфиритов подтверждает высказанную нами ранее точку зрения о термальном метаморфизме ранее сформированных березитовых ассоциаций и свидетельствует о том, что эти метасоматиты в формационном отношении не могут относиться к классическим березитам или грейzenам.

Ключевые слова: термобарометрия, минеральные равновесия, метасоматиты, метапорфириты, Березитовое месторождение.

ВВЕДЕНИЕ

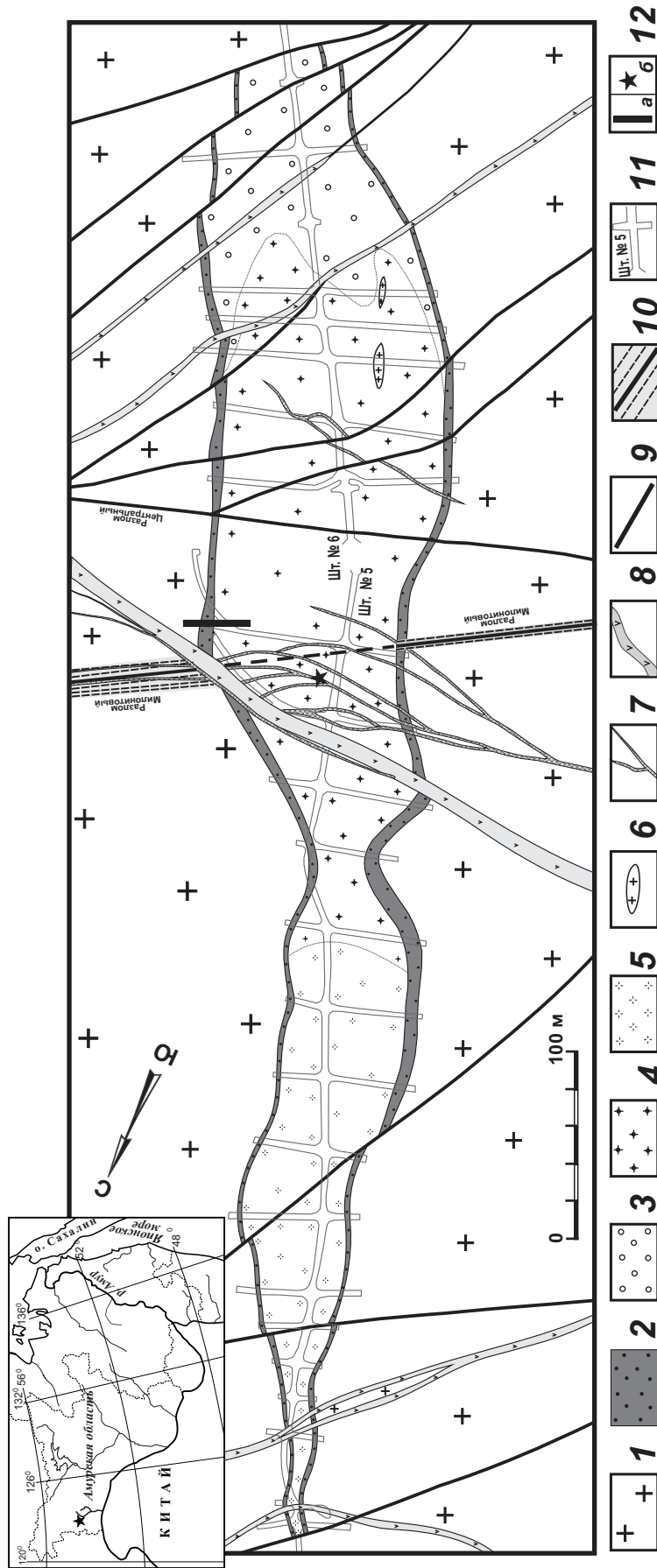
Березитовое месторождение (рисунок) расположено в северо-западной части Амурской области в бассейне нижнего течения р. Хайкта, крупного правого притока р. Большой Ольдой. Оно представляет собой сложный тип золото-полиметаллического оруденения, локализованного в флюидно-эксплозивной структуре, которое по морфологии и составу рудовмещающих пород не имеет близких аналогов среди известных золоторудных месторождений Забайкалья и Дальнего Востока. Отличительной чертой рудоносных пород данного месторождения является широкое развитие в них гранатсодержащих минеральных ассоциаций и своеобразных гранат-биотит-анортит-мусковит-кварцевых минеральных парагенезисов. Детальное изучение рудовмещающих метасоматитов месторождения позволило авторам (Авченко и др., 2014) аргументировано высказать предположение о том, что гранатсодержащие минеральные парагенезисы образовались, вероятной всего, в результате термального метаморфизма ранее сформированных низкотемпературных березитовых ассоциаций.

В связи с этим метасоматиты Березитового месторождения были выделены в формацию высокотемпературных метаморфизованных березитов.

Большую роль в доказательстве этого играет термобарометрия минеральных ассоциаций. Появившиеся недавно новые геотермобарометры на основе гранат-биотит-плагиоклазовых и гранат-биотит-мусковит-плагиоклазовых минеральных равновесий (Wu, 2015; Wu, Chen, 2015; Wu, Cheng, 2006; Wu, Wang et al., 2002; Wu, Zhang, Ren, 2004; Wu, Zhao, 2006) позволяют обосновать эту точку зрения с более высокой степенью надежности.

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА БЕРЕЗИТОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Березитовое месторождение находится в пределах восточного окончания Селенгино-Станового террейна, в зоне сочленения его с мезозойскими образованиями Монголо-Охотского складчатого пояса. Месторождение представлено сульфидсодержащими турмалин-гранат-кварц-мусковитовыми породами, которые локализованы в массиве порфировидных



Геологический план Березитового месторождения. Схема строения рудной зоны месторождения на горизонте 676 м: 1 – порфиридные биотит-роговообманковые гранодиориты палеозойского возраста; 2-5 – основные типы метасоматических пород: 2 – гранат-ортоклаз-биотит-анортит-мусковит-кварцевые, 3 – турмалин-гранат-ортоклаз-мусковит-кварцевые, 4 – турмалин-гранат-мусковит-кварцевые; 5 – турмалин-гранат-кварц-мусковитовые; 6 – пролиты частично измененных гранодиоритов; 7 – дайки метаспиритов; 8 – неизмененные пострудные дайки спессартитов и диоритовых порфиритов; 9 – основные тектонические нарушения; 10 – зона катаклазированных гранодиоритов с прожилково-вкрапленной полиметаллической минерализацией; 11 – подземные горные выработки; 12 – места отбора проб, приведенных в таблицах (а – гранодиоритов и метасоматитов, б – дайки метаспиритов). На врезке звездочкой показано географическое положение Березитового месторождения.

гранодиоритов позднепалеозойского возраста в виде двух совмещенных перевёрнутых конусов, расположенных последовательно друг за другом. В плане рудное тело месторождения имеет сложную линзовидную форму (рисунок). Рудоносные породы месторождения сложены светло серыми, зеленовато-серыми массивными, реже сланцеватыми породами кварц-мусковитового состава, с вкрапленностью альмандин-спессартинового граната и турмалина. Реже в переменных количествах, в их составе встречаются ортоклаз, хлорит, биотит, анортит, цинковая шпинель (железистый ганит), титанит, циркон, эпидот, алланит, пренит, фторапатит, флюорит, графит, гротит (Авченко и др., 2012), червандонит-(Се) (Вах и др., 2010).

Рудоносные метасоматические породы сильно брекчированы, причем обломочный материал брекчий цементируется сульфидными минералами по системе сложных трещин. Основные минералы руд – сфалерит, галенит, пирит, пирротин, магнетит; второстепенные и редкие – марказит, халькопирит, арсенопирит, ильменит, мышьяксодержащий пирит, самородное золото, петцит, калаверит, аргентит, гессит, алтаит, алексит, тетрадимит, теллурувисмутит, айкинит, иорданит, теннантит, буланжерит, джемсонит, висмутовый менегинит, самородный висмут, шеелит.

На контакте с вмещающими гранитоидами рудоносные турмалин-гранат-мусковит-кварцевые породы месторождения окаймляются полосой темно-серых метасоматитов более сложного гранат-биотит-плагиоклаз-мусковит-кварцевого состава. Своеобразие этих метасоматитов определяется наличием в них значительного количества новообразованного плагиоклаза, по составу близкому к анортиту.

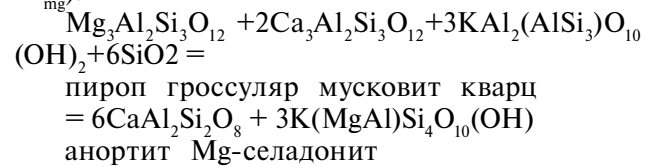
Рудоносная зона рассекается измененными гранатсодержащими дайками метапорфиритов, а также редкими пострудными дайками спессартитов и диоритовых порфиритов. Метапорфириты представляют собой породы темно-серого цвета с мелкозернистой структурой основной массы, и многочисленными идиоморфными порфиробластами альмандин-спессартинового граната, размером до 2-4 мм. Основная масса породы состоит из плагиоклаза, биотита, магнетита, ильменита, и кварца. Характерной особенностью даек метапорфиритов является наличие в них отчетливо выраженных признаков термального метаморфизма.

ОЦЕНКА P-T УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ АССОЦИАЦИЙ В МАСОМАТИТАХ И МЕТАПОРФИРИТАХ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Ранее определение P-T условий образования метасоматитов и метапорфиритов Бе-

резитового месторождения в парагенезисе Grt+Bt+Ms+Pl+Qz (индексы минералов указаны в примечаниях к табл. 1) производилось по программе PETH (Dachs, 1998), в которой для этого имеются Grt-Bt геотермометр в калибровке Л.Л. Перчука и И.В. Лаврентьевой (Перчук, 1993) и геобарометры – Grt-Bt-Pl и Grt-Ms-Pl. Кроме того, температуру Grt-Ms минерального равновесия определяли по эмпирическому гранат-мусковитовому геотермометру (Wu, Wang et al., 2002). Было установлено, что температуры образования минеральных равновесий в рассматриваемых породах месторождения дают интервал от 450 С до 580°С при средней величине примерно в 500°С. Оценки давления дали цифры от 2.75 до 4.8 кбар, при средней величине 3.9 кбар. Оценки условий образования метасоматитов и метапорфиритов при этом оказались очень близкими (Авченко и др., 2014). Недавно Ву с соавторами для плагиоклазовых и гранат-биотит-мусковит-плагиоклазовых минеральных равновесий (Wu, 2015; Wu, Chen, 2015; Wu, Cheng, 2006; Wu, Wang et al., 2002; Wu, Zhang, Ren, 2004; Wu, Zhao, 2006) предложили цепочку взаимосогласованных версий Grt-Bt-Pl-Qz (GBPQ), Grt-Bt-Pl-Ms-Qz (GBMP) и Grt-Pl-Ms-Qz (GMPQ) геотермобарометров и новый мусковитовый геотермометр (Wu, Chen, 2015). В связи с этим авторами была проведена переоценка условий образования метасоматитов и метапорфиритов Березитового месторождения на основе вышеуказанных новых калибровок.

В табл. 1 приведены P-T оценки по GBPQ, GBMP, GMPQ геотермобарометрам в новых калибровках. Оценки давления по GMPQ барометру были взяты на основе реакции с участием магнезиальных миналов (в табл. 1 показано как $-P_{mg}$):



Барометрическая реакция в GMPQ геобарометре, записанная на основе железистых миналов, во внимание не принималась. Это было сделано с целью устранения ошибок, связанных с невозможностью определения трехвалентного железа в мусковите. Все анализы сосуществующих минералов приведены в работе (Авченко и др., 2014).

Полученные оценки давления и температуры изменяются в небольших пределах (табл. 1) и дают в среднем величину 4 кбар и 566°С (определение по центрам зональных гранатов- core) и 4.4 кбар и 624°С (определения по краевым зонам гранатов). При этом оценки P-T в метасоматитах и метапорфиритах оказываются близкими (табл. 1).

ТЕРМОБАРОМЕТРИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ РАВНОВЕСИЙ

Таблица 1. Оценки давления и температуры в метасоматических породах (1-12) и метапорфиритах (13-16) Березитового месторождения по Grt-Bt-Pl-Qz* (GBPQ), Grt-Bt-Pl-Ms-Qz (GBMP), Grt-Pl-Ms-Qz (GMPQ) геотермобарометрам.

| № п/п | № образца | Номера анализов минералов по (Авченко и др., 2014, табл. 2) | Температура (°C) | Давление (кбар) | Наименование геотермо-барометра | Примечание |
|----------------------------|-----------|---|------------------|-----------------|---------------------------------|------------|
| 1 | 8-1 | 2, 4, 5, 6 | 620 | 5.3 | GBPQ | Grt-rim |
| 2 | 8-1 | 2, 4, 5, 6 | 620 | 4.0 | GBMP | Grt-rim |
| 3 | 8-1 | 2, 4, 5, 6 | 620** | 4.0 | GMPQ, P _{mg} *** | Grt-rim |
| 4 | 8-1 | 1, 4, 5, 6 | 542 | 4.3 | GBPQ | Grt-core |
| 5 | 8-1 | 1, 4, 5, 6 | 542 | 2.2 | GBMP | Grt-core |
| 6 | 8-1 | 1, 4, 5, 6 | 542** | 4.0 | GMPQ, P _{mg} | Grt-core |
| 7 | 8/6 | 25, 30, 32, 28 | 650 | 5.4 | GBPQ | Grt-rim |
| 8 | 8/6 | 25, 30, 32, 28 | 650 | 4.4 | GBMP | Grt-rim |
| 9 | 8/6 | 25, 30, 32, 28 | 650** | 4.9 | GMPQ, P _{mg} | Grt-rim |
| 10 | 8/6 | 24, 30, 32, 28 | 597 | 5.4 | GBPQ | Grt-core |
| 11 | 8/6 | 24, 30, 32, 28 | 597 | 4.0 | GBMP | Grt-core |
| 12 | 8/6 | 24, 30, 32, 28 | 597** | 4.4 | GMPQ, P _{mg} | Grt-core |
| 13 | 1326 | 40, 43, 46 | 580 | 3.8 | GBPQ | Grt-rim |
| 14 | 1326 | 38, 43, 46 | 516 | 4.1 | GBPQ | Grt core |
| 15 | 1356 | 49, 51, 53 | 600 | 3.8 | GBPQ | Grt-rim |
| 16 | 1356 | 50, 51, 53 | 598 | 4.1 | GBPQ | Grt-core |
| Средние оценки P-T условий | | | 624±9 | 4.4±0.24 | | Grt-rim |
| | | | 566±12 | 4.0±0.31 | | Grt-core |

Примечание здесь и к табл. 2. * – индексы минералов: Grt – гранат (Grt-rim – краевые зоны граната, Grt-core – центральные); Bt – биотит, Pl – плагиоклаз, Kfs – калиевый полевой шпат, Qz – кварц, Ms – мусковит. ** – температура принята по Grt-Bt термометру;

***P_{mg} – расчет давления с участием магнезиальных минералов.

В табл. 2 приведены оценки температур, выполненных по новому мусковитовому геотермометру, основанному на содержании титана в мусковите для ильменит-(рутил)-содержащих мусковитовых ассоциаций (Wu, Chen, 2015) и гранат – биотитовому геотермометру (Wu, Cheng, 2006). Мусковитовый геотермометр дает температуры от 480°C до 560°C, а гранат-биотитовый геотермометр – от 600°C до 614°C (табл. 2). Таким

образом, пересчитанные оценки давления, оказались близки к ранним оценкам давления. В то же время оценки температур получились выше ранних оценок. Более высокие оценки температур объясняются тем, что в новых версиях учитывается новая термодинамика твердого раствора граната по Холдавэю (Holdaway, 2000).

Таким образом, новые геотермобарометрические исследования метасоматитов с еще боль-

Таблица 2. Определение температуры в метасоматических породах по содержанию титана в мусковите (Ms^{Ti}) и Grt-Bt термометру (GB).

| № п/п | № образца | Номера анализов минералов по (Авченко и др., 2014, табл. 2) | Температура (°C) | Наименование геотермометра | Примечание |
|-------|-----------|---|------------------|----------------------------|-----------------------------|
| 1 | 8-1 | 6 | 540 | Ms^{Ti} | |
| 2 | 8-1, А | 11 | 520 | Ms^{Ti} | |
| 3 | 8-2 | 15 | 480 | Ms^{Ti} | |
| 4 | 8-6 | 31, 32 | 560 | Ms^{Ti} | Среднее из двух определений |
| 5 | Б-1 (1) | 35, 36 | 540 | Ms^{Ti} | Среднее из двух определений |
| 6 | Б-1 (1) | 34, 37 | 614 | GB | Grt-rim |
| 7 | Б-1 (1) | 33, 37 | 600 | GB | Grt-core |
| 8 | 8-2 | 12, 14 | 600 | GB | Grt-core |

шей уверенностью подтверждает высказанную нами точку зрения о термальном метаморфизме ранее сформированных низкотемпературных березитовых ассоциаций (Авченко и др., 2014). Это следует из прогрессивного характера температур образования минеральных ассоциаций (температуры, рассчитанные с учетом состава ядерных зон гранатов, оказываются ниже, чем температуры, рассчитанные по составам краевых частей гранатовых кристаллов) и факту повышенных температур минеральных ассоциаций, что, конечно, отличает гранатосодержащие метасоматиты от типичных березитов и грейзенов. Например, указывается, что для метасоматитов березитовой формации температуры формирования составляют 350–490°C или 250–450°C (Метасоматизм..., 1998). Е.Н. Граменицкий (Граменицкий, 2012) по данным изучения флюидных включений в кварце приводит интервал температур при образовании березитов 280–320°C, а по данным термобарометров 250–450°C при давлениях от 1 до 2 кбар. Однако, верхний температурный предел образования березитов (450°C), как указывает Е.Н. Граменицкий (2012) на основании экспериментальных данных, видимо, завышен. Для грейзенов по данным изучения изотопов кислорода и флюидных включений указываются температуры их образования в интервале 350–550°C (Метасоматизм..., 1998) или 350–500°C (Граменицкий, 2012).

Вместе с тем, наличие метаморфизованных даек, пересекающих рудоносные гранатосодержащие метасоматиты месторождения, и Т-Р параметры образования их минеральных равновесий, близкие к Т-Р параметрам метасоматитов (табл. 1), также хорошо объясняются с позиций наложенного, более позднего метаморфизма, одновременно накладывающегося на метасоматиты и метапорфириты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведена термобарометрия минеральных равновесий метасоматитов и метапорфиритов Березитового месторождения на основе недавно опубликованных уравнений (Wu, 2015; Wu, Chen, 2015; Wu, Cheng, 2006; Wu, Wang et al., 2002; Wu, Zhang, Ren, 2004; Wu, Zhao, 2006) Оценки давления и температуры изменяются в небольших пределах и дают в среднем величину 4 ± 0.31 кбар и $566\pm 12^\circ\text{C}$ (определение по центрам зональных гранатов) и 4.4 ± 0.24 кбар и $624\pm 9^\circ\text{C}$ (определения по краевым зонам гранатов). При этом Р-Т оценки метасоматитов и метапорфиритов близки. Таким образом, эта новая термобарометрия метасоматитов подтверждает высказанную нами ранее точку зрения о термальном метаморфизме ранее сформированных низкотемпературных березитовых ассоциаций (Авченко и др., 2014).

Исследования выполнены при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (№ 15-05-00809).

Список литературы

- Авченко О.В., Вах А.С., Чудненко К.В., Шарова А.О. Физико-химические условия образования Al-F сфена в рудно-метасоматических породах Березитового месторождения // Геохимия. 2012. № 5. С. 453–469.
- Авченко О.В., Вах А.С., Чудненко К.В., Худоложкин В.О. Генезис гранатосодержащих пород Березитового месторождения (Верхнее Приамурье. Россия) // Геология рудных месторождений. 2014. Т. 56. № 1. С. 19–40.
- Вах А.С., Авченко О.В., Карабцов А.А. Червандонит – (Се) в рудах Березитового месторождения – вторая находка в мире // Тихоокеанская геология. 2010. Т. 29. № 3. С. 14–23.

- Граменицкий Е.Н.* Петрология метасоматических пород // М.: ИНФРА-М, 2012. 219 с.
- Метасоматизм и метасоматические породы / Под ред. Жарикова В.А. М.: Научный мир, 1998. 489 с.
- Перчук Л.Л.* Магматизм, метаморфизм и геодинамика. М.: Наука, 1993. 190 с.
- Dachs E.* PET: Petrological elementary tools for mathematics // Computers & Geosciences. 1998. V. 24. № 3. P. 219-235.
- Holdaway M.J.* Application of new experimental and garnet Margules data to the garnet-biotite geothermometer // American Mineralogist. 2000. V. 85. P. 881-889.
- Wu C.M.* Revised empirical garnet-biotite-muscovite-plagioclase geobarometer in metapelites // J. metamorphic Geol., 2015. V. 33. Iss. 2. P. 167-176.
- Wu C.M., Chen H.X.* Calibration of a Ti-in-muscovite geothermometer for ilmenite- and Al₂SiO₅-bearing metapelites // Lithos. 2015. V. 212-215. P. 122-127.
- Wu C.M., Cheng B.H.* Valid garnet-biotite (GB) geothermometry and garnet-aluminum silicate-plagioclase-quartz (GASP) geobarometry in metapelitic rocks // Lithos. 2006. V. 89. P. 1-23.
- Wu C.M., Wang X.S., Yang C.H. et al.* Empirical garnet-muscovite geothermometry in metapelites // Lithos. 2002. V. 62. P. 1-13.
- Wu C.M., Zhang J., Ren L.D.* Empirical Garnet-Biotite-Plagioclase-Quartz (GBPQ) Geobarometry in Medium – to High-Grade Metapelites // Journal Petrology. 2004. V. 45. № 9. P. 1907-1921.
- Wu C.M., Zhao G.C.* Recalibration of the garnet-muscovite (GM) geothermometer and the garnet-muscovite-plagioclase-quartz (GMPQ) geobarometer for metapelitic assemblages // Journal of Petrology. 2006. V. 47. P. 2357-2368.

THERMOBAROMETRY OF MINERAL EQUILIBRIUMS IN METASOMATITES AND META-PORPHYRITES FROM THE BEREZITOVOE ORE DEPOSIT (UPPER PRIAMURYE)

Avchenko O.V.¹, Vakh A.S.^{1,2}, Chudnenko K.V.³

¹Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, 690022, e-mail: office@fegi.ru

²Far Eastern Federal University, Vladivostok, 690950, e-mail: rectorat@dyfu.ru

³A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, Irkutsk, 664033, e-mail: dir@igc.irk.ru

Thermobarometry of mineral equilibria in metasomatites and meta-porphyrites of the Berezitovoe ore deposit (Upper Priamurye) was performed using the new published equations. P-T estimates vary insignificantly and show average pressure 4 ± 0.31 kbar and temperature $566 \pm 12^\circ\text{C}$ (for zoned garnet cores) and 4.4 ± 0.24 kbar and $624 \pm 9^\circ\text{C}$ (for zoned garnet edges). In addition, P-T estimates for metasomatites and meta-porphyrites practically do not differ. The refined thermodynamic data for metasomatites and meta-porphyrites confirm our hypothesis concerning the thermal metamorphism of the earlier formed berezite assemblages. In terms of formation theory, the obtained data suggest that these metasomatic rocks cannot be attributed to the classical berezite or greisen.

Keywords: thermobarometry, mineral equilibria, metasomatites, meta-porphyrites, Berezitovoe ore deposit.