

Низкоградный метаморфизм в Телецкой зоне (Горный Алтай): геохимия и оценка Р-Т параметров формирования базитовых пород

Зиндобрый В.Д.¹, Буслов М.М.²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, viktor_zindobryi@mail.ru

² Институт геологии и минералогии имени В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, buslov@igm.nsc.ru

Аннотация. В работе рассмотрены особенности вещественного состава и приведена оценка термобарометрических условий формирования метаморфизованных терригенных пород и вулканитов Телецкой зоны. Показано, что метавулканиты по геохимическому составу отвечают океаническим базальтам (E-MORB, OIB, OPB), терригенные породы – известково-щелочным андезитобазальтам и андезитам островных дуг. Химический анализ амфиболов показал, что амфиболы относятся к кальциевым и являются зональными: составы кристаллов варьируют от актинолитов и низкощелочных роговых обманок (в центре) до высокощелочных роговых обманок и паргаситов (на периферии). Парагенетический анализ показал, что актинолиты были сформированы при температуре около 370–500 °С и давлении до 4 кбар. Расчеты по плагиоклаз-роговообманковым термометрам и амфиболовым барометрам демонстрируют, что роговые обманки были сформированы при температуре 563–715 °С и давлении 1.12–7.94 кбар; температура формирования хлоритов, согласно полученным данным, находится в диапазоне 287–345 °С и отвечает регрессивной стадии метаморфизма. Полученная совокупность данных позволяет считать, что исследуемые породы входят в состав аккреционного клина, в котором совмещены базальты океанической коры и турбидиты глубоководного желоба, образованные в результате разрушения пород островной дуги. До позднего силура аккреционный клин был вовлечен в строение крупной Чарышско-Теректинско-Улаганско-Саянской сутурно-сдвиговой зоны.

Ключевые слова: Горный Алтай, амфибол, термобарометрия, базальт, терригенный сланец, геохимия.

Low-grade metamorphism in the Teletsk zone (Gorny Altai): geochemistry and estimate of P-T parameters of the formation of basic rocks

Zindobryi V.D.¹, Buslov M.M.²

¹ Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, viktor_zindobryi@mail.ru

² V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, buslov@igm.nsc.ru

Abstract. The paper considers features of the material composition and evaluates thermobarometric conditions for the formation of metamorphosed terrigenous and volcanic rocks of the Teletsk zone. It is shown that the geochemical composition of metavolcanites belongs to oceanic basalts (E-MORB, OIB, OPB), terrigenous rocks belong to calc-alkaline andesite-basalts and andesites of island arcs. Chemical analysis of amphiboles showed that amphiboles belonged to calcium and were zoned: crystal compositions vary from actinolites and low-alkaline hornblendes (in the centre) to high-alkaline hornblendes and pargasites (on the periphery). Paragenetic analysis showed that the actinolites were formed at a temperature of about 370–500 °C and a pressure of up to 4 kbar. Calculations using plagioclase-hornblende thermometers and amphibole barometers show that hornblende was formed at a temperature of 563–715 °C and a pressure of 1.12–7.94 kbar; the temperature of chlorite formation, according to the data obtained, is in the range of 287–345 °C and corresponds to the regressive stage of metamorphism. The obtained data set allows us to consider that the studied rocks are part of an accretionary wedge that comprises basalts of the oceanic crust and turbidites of a deep-sea trench formed as a result of the destruction of island arc rocks. Until the Late Silurian, the accretionary wedge was involved in the structure of the large Charysh-Terekta-Ulagan-Sayan suture strike-slip zone.

Keywords: Gorny Altai, amphibole, thermobarometry, basalt, terrigenous schist, geochemistry.

Введение

Актуальность исследований. В Центрально-Азиатском складчатом поясе широко распространены надсубдукционные магматические комплексы и гранитоидные батолиты, занимающие огромные площади и свидетельствующие о протекавших аккреционно-коллизийных событиях, а также о гигантских объемах субдуцированной океанической коры, фрагменты которой можно наблюдать

в глаукофансланцевых и эклогитовых комплексах, маркирующих положение палеосубдукционных зон. Эти комплексы встречаются в виде тектонических пластин, чешуй и блоков в серпентинитовых меланжах, входящих в состав субдукционно-аккреционных сооружений (Волкова, Складов, 2007).

В пределах юго-западного обрамления Сибирского кратона выделяются с юго-запада на северо-восток три глаукофансланцевых пояса, отражающих эволюцию ордовикских аккреционно-коллизийных событий в данном регионе: блоки глаукофановых сланцев и эклогитов Чарской зоны (Восточный Казахстан), тектонические чешуи глаукофановых сланцев Уймонской зоны (центральная часть Горного Алтая) и толща глаукофановых сланцев Куртушибинского офиолитового пояса (Западный Саян) (Волкова и др., 2011).

Телецкая зона расположена в сложном тектоническом узле структур Горного Алтая и Западного Саяна и традиционно рассматривается как коллизийно-сдвиговая зона (Буслов, Синтубин, 1995; Смирнова и др., 2002; Буслов и др., 2003; Buslov et al., 2004). $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датировки метаморфических пород по амфиболу и мусковиту (Смирнова и др., 2002) демонстрируют широкий спектр значений (от 378 ± 3 до 328 ± 2 млн. лет), свидетельствующий о сложной и длительной тектонической истории. Однако этот возраст соответствует завершающей стадии формирования данной структуры. В последнее время нами были получены новые $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ данные о раннеордовикском возрасте метаморфических пород, отвечающем времени эксгумации базальтов и терригенных пород из зоны субдукции.

Метаморфизованные вулканиты и терригенные породы Телецкой зоны входят в состав тектонических пластин. На основе их петрографических исследований по минеральному составу и степени метаморфизма выделяется 3 типа пород:

1. Метабазальты, представленные Pl- и Pl-Amp порфиритами, метаморфизованные в условиях зеленосланцевой – эпидот-амфиболитовой фации метаморфизма и сохранившие первичные магматические структуры;
2. Афировые метабазальты, содержащие в своем составе кристаллы Amp, Ep, Chl, Pl и Qtz, и в большей степени, по сравнению с порфиритами, преобразованные в зеленосланцевой – эпидот-амфиболитовой фации метаморфизма.
3. Терригенные сланцы с ясно выраженной полосчатостью, представленные Qtz-Amp-Chl, Qtz-Amp-Ep и Qtz-Amp-Bt сланцами, образованные в условиях эпидот-амфиболитовой (амфиболитовой?) фации метаморфизма.

Объектом исследования выбран комплекс метавулканических и метатерригенных пород Телецкой зоны Горного Алтая.

Цель исследования – на основе термобарометрических исследований и литературных данных определить РТ-параметры образования метабазитовых пород Телецкой зоны Горного Алтая.

Задачи исследования:

1. Провести реконструкцию РТ-условий образования роговых обманок из терригенных сланцев на основе применения геотермобарометрических инструментов;
2. На основе литературных данных дать оценку РТ-параметрам формирования актинолита и эпидота из терригенных сланцев.
3. На основе петрогеохимических исследований установить протолиты метавулканических и метатерригенных пород Телецкой зоны Горного Алтая.

Материалы и методы

Для уточнения минерального состава, оценки РТ-параметров и определения петрогеохимических характеристик метабазитовых пород Телецкой зоны Горного Алтая были проанализированы метабазальты и терригенные сланцы из тектонических пластин серпентинитового меланжа в северной и центральной частях Телецкой зоны в районе р. Башкаус и р. Чебдар.

Определение содержаний оксидов основных породообразующих элементов и редкоземельных и рассеянных элементов проводилось в аналитическом центре ИГМ СО РАН имени В.С. Соболева (г. Новосибирск) по стандартным методикам. Анализ химического состава минералов был вы-

полнен на рентгеновском микроанализаторе Hitachi S-3400N с приставкой Oxford X-Max 20. Съемка проводилась в ресурсном центре «Геомодель» СПбГУ при следующих условиях: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 1 нА, экспозиция 20 с (аналитик Н.С. Власенко).

Результаты и обсуждение

В результате изучения состава минералов из метабазальтов и терригенных сланцев Телецкой зоны Горного Алтая установлено, что:

1. Амфиболы являются зональными и представлены актинолитами и низкощелочными магнезиальными роговыми обманками в центрах кристаллов и высокощелочными магнезиальными роговыми обманками и паргаситами – на их перифериях. При этом по соотношению $(\text{Na}+\text{K})-\text{Al}^{\text{T}}$ амфиболы образуют высокотемпературный тренд (рис. 1);
2. Хлориты из метабазальтов являются пикнохлоритами, из терригенных сланцев – низкожелезистыми рипидолитами, пикнохлоритами и брунсвигитами;
3. Полевые шпаты представлены альбитами, иногда с незначительной примесью ортоклазового компонента, а также олигоклазами с содержанием анортита до An_{29} .

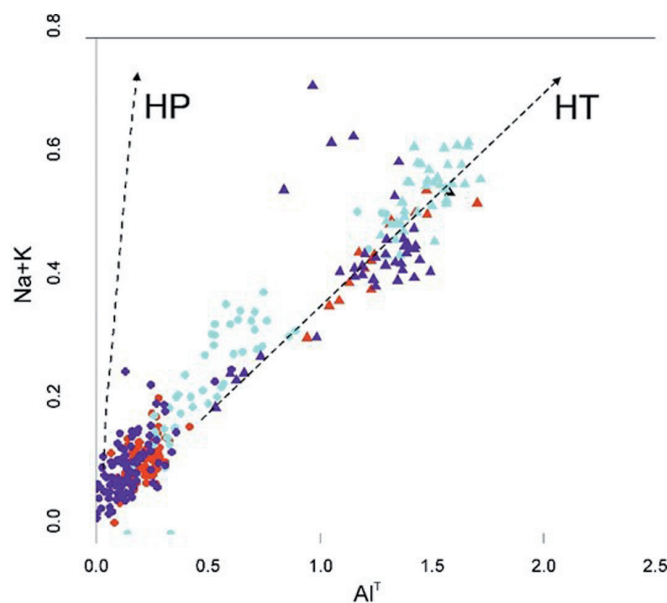


Рис. 1. Соотношение $(\text{Na}+\text{K}) - \text{Al}^{\text{T}}$ в амфиболах из пород Телецкой зоны Горного Алтая. Линии трендов показаны по (Searle, Malpas, 1982). Кружками показаны составы амфиболов из центральных частей кристаллов, треугольниками – из краевых; красный цвет – сланец Б-17-149, синий цвет – сланец Б-17-150, бирюзовый цвет – метабазальт Б-17-128. Тренды высокobarических (HP) и высокотемпературных (HT) метаморфических процессов.

Fig. 1. Ratio $(\text{Na}+\text{K}) - \text{Al}^{\text{T}}$ in amphiboles from rocks of the Teletsk zone of Gorny Altai. Trend lines are after (Searle, Malpas, 1982). Circles show compositions of amphiboles from the central parts of the crystals, triangles – from edge parts; red color – schist B-17-149, blue color – schist B-17-150, turquoise color – metabasalt B-17-128. Trends of high-pressure (HP) and high-temperature metamorphic processes.

Согласно данным (Graham, 1974) общая склонность кайм и наростов роговой обманки заключать актинолитовые ядра и пятна во многих амфиболовых порфиробластах интерпретируется как реакционная текстура, в которой актинолит может представлять реликты более ранней низкотемпературной стадии метаморфизма. Именно поэтому для определения максимальных Р-Т параметров формирования терригенных сланцев была выбрана пара «роговая обманка-плагноклаз». Появление пар «роговая обманка-актинолит» может свидетельствовать о недостижении химического равновесия в результате медленного и неполного уравнивания низкотемпературных актинолитов во время проградного метаморфизма. Считается, что составы внешних кайм роговой обманки приближаются к равновесным с соседними фазами составов. Эти особенности могут свидетельствовать о низких скоростях минеральных реакций, связанных с превращением известковых амфиболов, в небольшом диапазоне повышения степени метаморфизма. Для установления РТ-параметров первой стадии метаморфизма использовались литературные данные об экспериментальных исследованиях синтеза актинолитов и перехода «лавсонит→эпидот».

Hellner E. и Schurmann K. (1966) проводили синтез амфиболов тремолит-ферроактинолитового состава при температуре от 300 °С до 650 °С при давлении 1 кбар с использованием автоклавов. В своих исследованиях авторы делали акцент на определении верхней границы устойчивости Fe-Mg-актинолита и установили, что этот минерал устойчив до 570 °С при 1 кбар. Jenkins D.M. и Bozhilov

K.N. (2003) проводили эксперименты с синтезом амфибола, богатого ферроактинолитом, при температурах 400–600 °С и давлении 2–10 кбар с объемным содержанием кальция 1.6–2 ф.е. В процессе экспериментов наибольшие выходы актинолита были получены при температуре 425 °С и давлении до 3 кбар. При больших температурах зародышеобразование происходило в очень небольших количествах, а при температуре 500 °С – не наблюдалось. Повышение давления до значений, больших 3 кбар, способствовало образованию грюнерита.

Проведение нижней температурной границы формирования терригенных сланцев основано на результатах новейших термобарометрических исследований metabazaltov Западной Камчатки (Бадрединов и др., 2020). Авторы установили, что ассоциация альбит+лавсонит+кварц+мусковит+хлорит остается устойчивой при температуре до 370 °С при давлении от 3 до 8 кбар. При температуре выше 370 °С лавсонит исчезает из ассоциации, замещаясь эпидотом. При варьировании давлений от 3.2 до 3.8 кбар и температур от 310 до 370 °С существует область, в которой устойчивы лавсонит с эпидотом. Таким образом, наличие эпидота и отсутствие лавсонита в ассоциации с актинолитом в изучаемых терригенных сланцах позволяет предполагать, что они были сформированы при температурах от ≈ 370 до ≈ 500 °С и давлении до ≈ 3 кбар.

Результаты вычислений по термометрам (Blundy, Holland, 1990; Holland, Blundy, 1994) демонстрируют относительно высокие параметры формирования роговых обманок (563–715 °С). Расчеты по минералогическим барометрам (Johnson, Rutherford, 1989; Schmidt, 1992; Ague, 1997) показали низкие-умеренные параметры процессов образования роговых обманок (1.12–7.94 кбар). Использование более современного минералогического барометра (Mutch, 2016) привело примерно к таким же результатам (2.04–6.32 кбар). Полученные значения свидетельствуют о том, что терригенные сланцы были образованы в условиях эпидот-амфиболитовой фации метаморфизма. Результаты расчетов температур формирования хлоритов по термометрам (Cathelineau, 1988; Jowett, 1991) демонстрируют низкие значения (287–345 °С).

Изучение особенностей микроструктур терригенных сланцев позволило предположить, что в ходе своей эволюции они претерпели регрессивный метаморфизм. На это указывает наличие структур растворения на границах, а также частичное замещение хлоритом кристаллов граната. Полученные данные термометрии, указывающие на более низкие, чем у амфиболов, температуры формирования хлоритов подтверждают это предположение.

Таким образом, образование терригенных сланцев началось с формирования островодужных вулканитов, которые впоследствии были сначала разрушены, а потом преобразованы диагенетическими процессами. Далее продукты этого преобразования незначительно погрузились в зону субдукции, где в условиях зеленосланцевой фации метаморфизма (температура ≈ 370 –500 °С и давление до ≈ 3 кбар) были образованы актинолит и эпидот. Затем при температуре 563–715 °С и давлении 1.12–7.94 кбар, что соответствует условиям эпидот-амфиболитовой фации метаморфизма, были образованы плагиоклаз и роговообманковая кайма вокруг актинолита. Потом при еще больших значениях температуры и давления (вероятно, в условиях амфиболитовой фации) происходило образование граната по реакции $\text{Hbl} + \text{Pl} \rightarrow \text{Grt} + \text{Cpx} + \text{Qz}$ (Harley, 1989), что подтверждается реликтами клинопироксена возле кристаллов граната. Завершился процесс регрессивным метаморфизмом, сопровождавшимся образованием хлорита при температуре 287–345 °С.

В геохимическом плане терригенные сланцы и metabazaltы представлены несколькими типами протолитов. Большинство графиков редкоземельных элементов, нормированных к хондриту (Sun, McDonough, 1989) показывают слегка наклонные спектры распределения РЗЭ, слегка обогащенные легкими относительно тяжелых РЗЭ – $(\text{La}/\text{Yb})_N = 2.40$ в среднем (рис. 2а). На мультиэлементных диаграммах они также образуют слабоотрицательные спектры с разной степенью дифференциации Rb, Cs, Ba, Th и K. Такие спектры характерны для океанических базальтов типа E-MORB. Помимо базальтов COX, в Телецкой зоне присутствуют породы, протолитом для которых послужили базальты океанических островов ($(\text{La}/\text{Yb})_N = 7.42$) и океанических плато ($(\text{La}/\text{Yb})_N = 1.57$) (рис. 2б).

Терригенные сланцы представляют собой породы с отрицательными спектрами распределения РЗЭ с высокими отношениями LREE/HREE, близкими к OIB – $(\text{La}/\text{Yb})_N = 6.33$ в среднем.

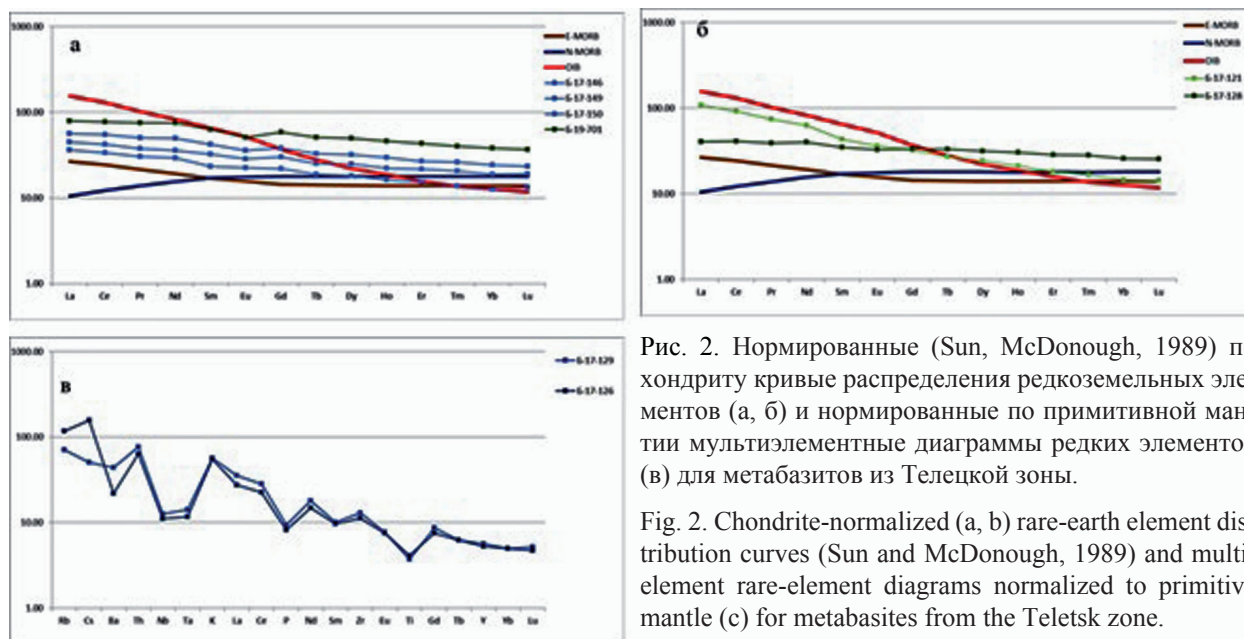


Рис. 2. Нормированные (Sun, McDonough, 1989) по хондриту кривые распределения редкоземельных элементов (а, б) и нормированные по примитивной мантии мультиэлементные диаграммы редких элементов (в) для метабазитов из Телецкой зоны.

Fig. 2. Chondrite-normalized (a, b) rare-earth element distribution curves (Sun and McDonough, 1989) and multi-element rare-element diagrams normalized to primitive mantle (c) for metabasites from the Teletsk zone.

На мультиэлементных диаграммах эти породы демонстрируют сильную дифференциацию Rb, Cs, Ba, Th, K, повышенные значения отношения LILE/HREE, отчетливые Nb-, Ta-, P- и Ti-минимумы (рис. 2 в). На основании этих данных можно предположить, что эти породы образовались в результате разрушения вулканитов островных дуг.

Заключение

В результате проведенных исследований пород из Телецкой зоны получены новые термобарометрические, петро- и геохимические данные.

Геохимические исследования показали, что блоки и пластины метабазальтов представлены океаническими базальтами E-MORB, OIB и OPB типов. Терригенные сланцы являются продуктами разрушения, диагенеза и метаморфизма островодужных вулканитов базальт-андезитового состава. Исследуемый комплекс пород заключен в тектонические пластины, входящие в состав аккреционного клина.

На основе результатов термобарометрического моделирования и литературных данных определено, что первая стадия метаморфизма протекала при температурах около 370–500 °C и давлении до 4 кбар, а его пик отвечает условиям эпидот-амфиболитовой и амфиболитовой (до $T = 715^{\circ}\text{C}$, $P \approx 8$ кбар) фации.

Автор выражает благодарность д.г.-м.н Ш.К. Балтыбаеву, профессору кафедры петрографии ИНОЗ СПбГУ, за неоценимую помощь в подборе нужных геотермобарических инструментов. Кроме того, автор благодарен инженеру Н.С. Власенко (ресурсный центр «Геомодель» СПбГУ) за проведение всех аналитических исследований на СЭМ.

Литература

1. Бадрединов З.Г., Авченко О.В., Тарарин И.А., Ноздрачев Е.А. Природа метаморфизма низкотемпературных метаморфических пород зоны перехода континент-океан (на примере пенсантайской толщи Западной Камчатки) // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2020. Т. 46. № 2. С. 16–29.
2. Буслов М.М., Ватанабе Т., Смирнова Л.В., Фудживара И., Ивата К., де Граве И., Семаков Н.Н., Травин А.В., Кириянова А.П., Кох Д.А. Роль сдвигов в позднепалеозойско-раннемезозойской тектонике и геодинамике Алтае-Саянской и Восточно-Казахстанской складчатых областей // Геология и геофизика. 2003. Т. 44. № 1-2. С. 49–75.
3. Буслов М.М., Синтубин М. Структурная эволюция Телецкой зоны Алтае-Саянской складчатой области // Геология и геофизика. 1995. Т. 36. № 10. С. 91–98.

4. Волкова Н.И., Складов Е.В. Высокобарические комплексы Центрально-Азиатского складчатого пояса: геологическая позиция, геохимия и геодинамические следствия // Геология и геофизика. 2007. Т. 48. №1. С. 109–119.
5. Волкова Н.И., Травин А.В., Юдин Д.С. Ордовикские глаукофановые сланцы как отражение аккреционно-коллизийных событий в Центрально-Азиатском подвижном поясе // Геология и геофизика. 2011. Т. 52. № 1. С. 91–106.
6. Смирнова Л.В., Тениссен К., Буслов М.М. Кинематика и динамика формирования позднепалеозойской структуры Телецкого региона (зона сочленения Горного Алтая и Западного Саяна) // Геология и геофизика. 2002. Т. 43. № 2. С. 115–127.
7. Ague J.J. Thermodynamic calculation of emplacement pressures for batholithic rocks, California: Implications for the aluminum-in-hornblende barometer // *Geology*. 1997. V. 25. P. 563–566.
8. Blundy J.D., Holland T.J.B. Calcic amphibole equilibria and a new amphibole-plagioclase geothermometer // *Contributions to mineralogy and petrology*. 1990. V. 104. P. 208–224.
9. Buslov M.M., Watanabe T., Fujiwara Y., Iwata K., Smirnova L.V., Saphonova I.Yu., Semakov N.N. Late Paleozoic faults of the Altai region, Central Asia: tectonic pattern and model of formation // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2004. V. 23. P. 655–671.
10. Cathelineau M. Cation site occupancy in chlorites and illites as a function of temperature // *Clay Minerals*. 1988. V. 23. P. 471–485.
11. Graham C.M. Metabasite amphiboles of the Scottish Dalradian // *Contributions to mineralogy and petrology*. 1974. V. 47. P. 165–185.
12. Harley S.L. The origins of granulites: a metamorphic perspective // *Geological magazine*. 1989. V. 126. P. 215–247.
13. Hellner E., Schurmann K. Stability of metamorphic amphiboles: the tremolite-ferroactinolite series // *Journal of Geology*. 1966. V. 74. P. 322–331.
14. Holland T., Blundy J. Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1994. V. 116. P. 433–447.
15. Jenkins D.M., Bozhilov K.N. Stability and thermodynamic properties of ferro-actinolite: a re-investigation // *American Journal of Science*. 2003. V. 303. P. 723–752.
16. Johnson M.C., Rutherford M.J. Experimental calibration of the aluminium-in-hornblende geobarometer with application to Long Valley caldera (California) volcanic rocks // *Geology*. 1989. V. 17. P. 837–841.
17. Jowett E.C. Fitting iron and magnesium into the hydrothermal chlorite geothermometer // *Geological association of Canada*. May. 1991. 15 p.
18. Mutch E.J.F., Blundy J.D., Tattich B.C., Cooper F.J., Brooker R.A. An experimental study of amphibole stability in low-pressure granitic magmas and a revised Al-in-hornblende geobarometer // *Contributions to mineralogy and petrology*. 2016. V. 171. № 10. P. 1–27.
19. Schmidt M.W. Amphibole composition as a function of pressure: an experimental calibration of the Al-in-hornblende barometer // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1992. V. 110. P. 304–310.
20. Searle M.P., Malpas J. Petrochemistry and origin of sub-ophiolitic metamorphic and related rocks in the Oman Mountains // *Journal of the geological society*. 1982. V. 139. P. 235–248.
21. Sun S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // *Geological society of London, special publication*. 1989. V. 42. P. 313–345.