ГРАНАТ МЕТАУЛЬТРАМАФИТОВ МАКСЮТОВСКОГО КОМПЛЕКСА [ЮЖНЫЙ УРАЛ]

П. М. Вализер¹, А. И. Русин², А. А. Краснобаев²

¹Ильменский государственный заповедник, Миасс; valizer@ilmeny.ac.ru

²Институт геологии и геохимии им. А. Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург;
rusin@igg.uran.ru, krasnobaev@igg.uran.ru

Гранат в ультрамафитах рассматривается как важный признак глубинных условий их формирования. Изучены гранаты из метаультрамафитов, форстерит-энстатитовых пород и антигоритовых серпентинитов максютовского эклогит-глаукофансланцевого комплекса. Гранат для исследований отбирался из больших (150—200 кг) проб, которые дробились до фракции 0.25 мм. Классическими приемами они доводились до шлиха с последующим отбором под бинокуляр. Микрозондовый анализ гранатов выполнен на растровом микроскопе РЭММА-202М с микроанализатором. Гранаты метаультрамафитов образуют гетерогенное сообщество и представлены широким по составу спектром разновидностей пироп-альмандиновых, альмандиновых, гроссуляр-альмандиновых и альмандин-спессартиновых видов. Кристаллы гранатов содержат включения УНР-НР минералов. По особенностям состава аналогичны гранатам эклогитов, гранат-клинопироксеновых и глаукофановых пород, пространственно-генетически связанных с ними. Малокальциевый пироп-альмандиновый гранат в форстерит-энстатитовых породах допускает предположение о возможности проявления раннего метаморфизма в условиях гранулитовой фации.

Ключевые слова: максютовский комплекс, гранат, форстерит-энстатитовая порода, антигоритовый серпентинит, эклогит, гранат-клинопироксеновая порода.

GARNET FROM METAULTRAMAFIC ROCKS OF MAKSUTOVO COMPLEX [SOUTH URAL]

P. M. Valizer¹, A. I. Rusin², A. A. Krasnobaev²

¹Ilmensky State Reserve, Miass

²Institute of Geology and Geochemistry UB RAS, Yekaterinburg

The garnet from metaultramafic rocks is considered as an important sign of UHP-HP formation conditions. Garnets were investigated from forsterite-enstatite rock and antigorite serpentinite of the eclogite-glaucophane schists Maksutovo Complex. Garnets was selected from the large samples (150—200 kg.) that were fractioned to 0.25 mm. Further, the fraction was treated to a heavy concentrate with subsequent selection from it the garnets. They have been analyzed by using a scanning electron microscope REMMA-202M with microprobe in the mode of secondary electrons.

The garnets from metaultramafic rocks formed a heterogeneous community and they represented different of species pyrope-almandine, almandine, grossular-almandine and almandine-spessartine and are similar to garnets of the eclogites, garnet-clinopyroxenite and glaucophane rocks which spatially and genetically related with them. They contain inclusions of UHP-HP minerals. Low-calcium pyrope-almandine garnet reflects the processes of early metamorphic in conditions of granulite facies of metamorphism for forsterite-enstatite rocks.

Keywords: Maksutovo Complex, garnet, forsterite-enstatite rock, antigorite serpentinite, eclogite, garnet-clinopyroxene rocks.

Введение

Присутствие граната в ультрамафитах рассматривается как важный признак глубинных условий их формирования. Альмандин-пироповый, альмандиновый и гроссуляр-пироповый гранат описан в ультрамафитах массивов: Рай-Из, Войкаро-Сынинский, Алапаевский, Крака, Нурали, Миндяк и др. В длительной истории изучения максютовского комплекса основное внимание было уделено НРМ-УНРМ породным ассоциациям: эклогитам, гранат-глаукофановым сланцам и другим образованиям. Метаультрамафиты в комплексе занимают по представительности такое же место, что и вышеперечисленные породы и пространственно-генетически связаны с ними [2—3, 9, 17]. В метаультрамафитах — форстерит-энстатитовых породах УНРМ эклогит-перидотитовой и антигоритовых серпентинитах НР-УНРМ мафит-ультрамафитовой единиц — были обнаружены гранаты, что позволяет уточнить условия их образования-преобразования и сопоставить с УНРМ породными ассоциациями мафитового состава.

Краткая геологическая характеристика комплекса

Максютовский эклогит-глаукофансланцевый комплекс расположен в юго-восточной части западного склона Южного Урала и представляет собой узкий тектонический блок шириной 12—16 км, протяженностью более 180 км, характеризующийся сложной складчато-надвиговой структурой (рис. 1) и многоэтапной историей метаморфизма. Восточной его границей является серпентинитовый меланж Главного уральского разлома, к востоку от которого развиты девонские известково-щелочные вулканы Магнитогорской островной дуги, перекрытые в приразломной зоне отложениями зилаирского флиша (D_3-C_1). Западным ограничением максютовского комплекса служит Янтышевско-Юлукский надвиг, отделяющий его от кварцито-сланцевых толщ суванякского комплекса (PR_2-V_1), метаморфизованных в условиях зеленосланцевой фации, и разрезов осадочных пород пассивной окраины В.-Европейского кратона.

Рис. 1. Структурная схема максютовского комплекса [17].

1 — мезозойские и кайнозойские отложения, 2 — зилаирский флиш (D_3-C_1), 3 — силурийские отложения и вулканы, 4 — кварцито-сланцевые толщи суваянского комплекса (PR_2-V_1), 5 — бластомилониты, 6 — «офиолитоподобная» единица (метавулканы, слюдяные и графитистые кварцитосланцы) с зонами НР-УНРМ мафит-ультрамафитовой единицы (антигоритовые серпентиниты, гранат-клинопироксеновые, лавсонитсодержащие и гранат-гlauchофановые породы), 7 — метатерригенная единица (слюдистые кварциты, слюдянокварцевые и слюдяные сланцы с гранатом, омфацитом, глаукофаном, фенгитом с телами гранат-омфацит-глаукофановых и гранат-глаукофановых пород) с зонами УНРМ-эклогит-перидотитовой единицы (форстерит-энстатитовые породы, жадеитовые и жадеит-диопсидовые эклогиты), 8 — ультрамафиты Халиловского массива, 9 — амфиболиты, 10 — серпентиниты и серпентинитовый меланж, 11 — диабазовые дайки, 12 — Янтышевско-Юлукский надвиг, 13 — тектонические нарушения.

Fig. 1. Geologic map of Maksutov complex [17].

1 — Mesozoic and Cainozoic sedimentary rocks, 2 — Zilairsky flysch (D_3-C_1), 3 — Silurian metavolcanic and metasedimentary rocks, 4 — quartzites and quartzite schist strata of Suvanyaksky complex, 5 — blastomylonites, 6 — “ofiolites-like” unite — metavolcanic, mica and graphite quartzite schists with zones HP-UHPM mafict-ultramafic rocks unite (antigorite serpentinite, garnet-clinopyroxene, lawsonite and garnet-glaucophane rocks), 7 metasedimentary unite — micaceous quartzites, mica-quartzite and mica schists containing garnet, omphacite, glaucophane, phengite including bodies garnete-omphacite-glaucophane and garnet-glaucophane rocks with zones HP-UHPM-eclogite-peridotite unite (forsterite-enstatite rocks, jadeite and jadeite-diopside eclogites), 8 — ultramafic rocks of Chalilovsky massif, 9 — amphibolites, 10 — serpentinites and serpentinite melange, 11 — diabase dykes, 12 — Yantyshevsko-Yuluksky thrust, 13 — faults.

Геологические, структурные и изотопно-хронологические данные, полученные нами в последнее время [2—6, 9] позволяют предполагать, что формирование максютовского комплекса произошло при аккреции структурно-вещественных единиц: 1. УНРМ эклогит-перидотитовая — форстерит-энстатитовые породы и (горячие) жадеитовые и жадеит-диопсидовые эклогиты; 2. НР-УНРМ мафит-ультрамафитовая — а) антигоритовые серпентиниты, гранат-клинопироксеновые и лавсонитсодержащие породы; б) антигоритовые серпентиниты, гранат-клинопироксеновые и гранат-глаукофановые породы; 3. НРМ метатерригенная — слюдистые кварциты, слюдяно-кварцевые и слюдяные сланцы с гранатом, омфацитом, глаукофаном и фенгитом с телами (холодных) гранат-омфацит-глаукофановых эклогитов, гранат-глаукофановых и жадеит-эгириновых пород; 4. винчит-зеленосланцевая «офиолитоподобная» — метавулканы, слюдяные и графитистые кварцитосланцы; 5. палеозойские образования. Каждая структурно-вещественная единица характеризуется различными обстановками и временем формирования исходного субстрата. Подробная информация по проблемам метаморфизма и возраста породных ассоциаций комплекса изложена в многочисленных работах [1—10, 12—13, 15—18].

Методика исследований

Гранат и сопутствующие минералы для исследований отбирались из больших (150—200 кг) проб, которые дробились до фракции 0.25 мм. Дроблению породы предшествовала «промывка» аппаратуры отобранным материалом с последующим его исключением из обогащения. Подготовленная «тонкая» субстанция отмучивалась от глинистой фракции и классическими приемами обогащалась в лотках. От исходной пробы оставалось 5—10 мг шлиха. Последующий отбор минералов проводился под биноклем. Микроскопический анализ состава минералов выполнен на растровом микроскопе РЭММА-202М с микроанализатором в лаборатории КМИИ Института минералогии (аналитик В. А. Котляров). Ускоряющее напряжение 20 КВт, ток на образце $H \cdot 10^{-10}$ А. Стандарты: AstJME scientific Limited MJNM 25—53 Mineral Mount serial № 01—044.

Индексы минералов: Atg — антигорит, Chl — хлорит, Di — диопсид, En — энстатит, Ep — эпидот, Fsp — калиевый полевой шпат, Fo — форстерит, Grt — гранат, Mgs — магнетит, Mag — магнетит, Ms — мусковит, Omp — омфацит, Chl — хлорит, Crx — клинопироксен, Cr-Spl — хромшпинель, Pg — парагонит, Ph — фенгит, Pmp — пумпеллит, Rt — рутил, Ti-Chu — титаноклиногумит, Qz — кварц, Zo — цоизит.

Гранат

Изучены гранаты метаультрамафитов известных, типовых и наиболее изученных участков и обнажений максютовского комплекса: из форстерит-энстатитовой породы УНР-эклогит-перидотитовой единицы (К-1870, N 51°59'58", E 57°47'31.5", H 339), скальные выходы по левому берегу р. Сакмара, в 2 км ниже д. Караяново [2, 15, 17]; из антигоритового серпентинита НР-УНР мафит-ультрамафитовой единицы: а) (К 2109, N 51°59'54.5", E 57°45'38", H 469.5), правый берег р. Сакмара, район д. Утарбаево [3, 17]; б) (К 2232, N 51°48'45.3", E 57°31'51.6", H 429) левый берег р. Ташла, пос. Новоташлинский [6, 17].

Гранат в форстерит-энстатитовых породах представлен пироп-альмандином, спессартин-альмандином,

альмандином и гроссуляр-альмандином (табл., рис. 2). Малокальциевый пироп-альмандин ($\#Mg = 0.21-0.28$) образует незональные кристаллы с содержанием от 21 до 27 мол. % Ру, при существенном — до 10 мол. % Sps компонентов. Малокальциевый спессартин-альмандин, высокожелезистый ($\#Mg = 0.04-0.08$) образует кристаллы с низким количеством 4—8 мол. % Ру и от 17 до 21 мол. % Sps компонентов. Такие гранаты не установлены ни в эклогитах, ни в метатерригенной единице [1]. От гранатов ультраосновных пород и серпентинитов они отличаются низким содержанием Ру и повышенным

содержанием Sps компонентов и наиболее соответствуют гранатам из пород гранулитовой фации [14]. Альмандин представлен зональными кристаллами: с — Grs = 22—23 мол. %, Sps до 5 мол. %, $\#Mg = 0.17-0.19$, r — Grs = 8—14 мол. %, $\#Mg = 0.21-0.23$, содержит включения цоизита, фенгита и кварца (рис. 3.1). Альмандины такого состава характерны для глаукофанизированных низкожелезистых жадеит-диопсидовых эклогитов [1]. Среди альмандинов встречаются кристаллы с существенным содержанием (до 15 мол. %) Sps компонента, которые соответствуют альмандину гранат-глаукофано-

Химический состав и кристаллохимические формулы гранатов и UHP-HP минералов включений метавулканических пород (мас. %)

Mineral and stoichiometric composition of garnets and inclusions of UHP-HP minerals of the from metavolcanic rocks (vol. %)

№ п.п	1		2		3		4		5		6		
Компо- нент	Grt		Grt		Grt		Grt		Grt		Grt		Ph
	с	г	с	г	с	г	с	г	с	г	с	г	
SiO ₂	37.7	38.1	36.8	36.8	37.9	38.2	37.3	37.8	38.1	37.9	37.9	37.8	51.5
TiO ₂	0.00	0.07	0.03	0.03	0.06	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.12	0.06	0.79
Al ₂ O ₃	21.5	21.3	20.4	20.5	20.8	21.2	20.4	21.1	21.3	21.5	21.3	21.0	25.4
FeO	29.8	27.6	32.3	30.8	27.6	27.2	28.9	30.6	28.3	31.8	26.7	29.3	2.49
MnO	4.49	4.57	7.43	9.10	3.94	3.96	6.63	2.83	0.62	0.72	2.37	2.61	0.00
MgO	5.13	6.97	1.89	0.99	4.67	5.83	3.06	4.56	3.44	5.02	3.70	4.75	4.32
CaO	1.05	1.24	1.01	1.87	4.75	3.67	3.57	3.04	8.17	2.93	7.71	4.23	1.81
Na ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9.68
Σ	99.67	99.85	99.86	100.09	99.72	100.06	99.91	99.93	99.93	99.87	99.80	99.75	95.99

Коэффициенты кристаллохимической формулы

Si	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.41
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.04
Al	2.02	1.97	1.96	1.98	1.95	1.97	1.93	1.98	1.96	1.96	1.98	1.96	1.98
Fe	1.98	1.81	2.20	2.10	1.83	1.78	1.94	2.03	1.87	1.42	1.76	1.94	0.14
Mn	0.30	0.30	0.52	0.63	0.27	0.26	0.45	0.19	0.04	0.39	0.16	0.18	0.00
Mg	0.61	0.82	0.23	0.12	0.55	0.68	0.37	0.54	0.41	0.17	0.44	0.56	0.43
Ca	0.09	0.10	0.09	0.17	0.40	0.31	0.31	0.26	0.69	1.06	0.65	0.36	0.13
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.82
#Mg	0.21	0.28	0.08	0.04	0.21	0.25	0.13	0.20	0.18	0.22	0.18	0.21	0.76
#Ca	0.03	0.03	0.03	0.06	0.13	0.10	0.10	0.9	0.23	0.08	0.22	0.12	

Continue of table

Таблица (продолжение)

№ п.п	7			8		9		10	11			12	
Компо- нент	Grt		Zo	Grt		Grt		Grt	Grt		Pg	Grt	
	с	г		с	г	с	г		с	г		с	г
SiO ₂	37.4	37.3	38.2	37.8	37.8	38.0	37.9	38.2	38.2	38.3	48.0	37.3	38.0
TiO ₂	0.12	0.00	0.65	0.02	0.00	0.00	0.04	10.29	0.10	0.06	0.58	0.00	0.05
Al ₂ O ₃	20.0	20.2	32.9	20.3	20.7	20.8	20.8	20.7	21.4	21.8	34.7	20.1	20.9
FeO	21.8	23.3	0.72	28.4	25.7	20.3	21.4	20.5	27.5	27.6	4.70	13.5	23.9
MnO	8.60	8.40	0.00	1.73	1.70	5.11	5.80	1.59	0.18	0.31	0.00	18.0	0.49
MgO	0.71	0.67	0.38	3.35	1.97	1.37	1.41	0.87	4.54	5.09	0.00	0.31	0.96
CaO	11.2	10.0	23.6	8.48	12.0	14.4	12.5	17.9	8.00	6.57	0.00	10.8	15.5
Na ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.17	0.00	0.00
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.57	0.00	0.00
Σ	99.83	99.87	97.00	100.08	99.87	99.92	99.85	100.05	99.92	99.73	94.72	100.01	99.80

Коэффициенты кристаллохимической формулы

Si	3.00	3.00	2.97	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.09	3.00	3.00
Ti	0.01	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.03	0.00	0.01
Al	1.90	1.91	2.97	1.89	1.93	1.94	1.96	1.92	1.98	2.01	2.63	1.90	1.95
Fe	1.46	1.57	0.04	1.88	1.70	1.34	1.42	1.35	1.80	1.81	0.25	0.91	1.58
Mn	0.59	0.57	0.00	0.12	0.12	0.34	0.39	0.11	0.01	0.02	0.00	1.22	0.04
Mg	0.08	0.08	0.04	0.39	0.23	0.16	0.17	0.10	0.53	0.60	0.00	0.04	0.11
Ca	0.96	0.87	1.94	0.72	1.02	1.22	1.06	1.50	0.67	0.55	0.00	0.93	1.31
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.77	0.00	0.00
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00
#Mg	0.04	0.04	0.00	0.16	0.11	0.08	0.09	0.07	0.23	0.25		0.02	0.06
#Ca	0.32	0.29	0.00	0.24	0.34	0.41	0.36	0.50	0.22	0.18		0.31	0.44

вых сланцев метатерригенной единицы [15–17]. Гроссуляр-альмандины образуют кристаллы с обратной (с — $\text{Py}_{13}\text{Grs}_{22}$, г — $\text{Py}_8\text{Grs}_{34}$) зональностью, маломарганцевые и с высоким содержанием (до 19 мол. %) Sps и (до 41 мол. %) Grs компонентов. Альмандин-гроссуляры ($\text{Py}_{3-4}\text{Grs}_{50-52}$) аналогичны гранату хлоритовой оторочки тел УНРМ-эклогита, гранат-клинопироксеновых и лавсонитсодержащих пород [3, 5].

Гранат в антигоровых серпентинитах НР-УНРМ мафит-ультрамафитовой единицы (а) по составу соответствует альмандину, гроссуляр-альмандину — альмандин-гроссуляру и альмандин-гроссуляр-спессартину (табл., рис. 2). Альмандин образует неоднородные по составу кристаллы (с — $\text{Py}_{18}\text{Grs}_{22}$, г — $\text{Py}_{20}\text{Grs}_{19}$), которые содержат включения парагонита ($\text{Si} = 3.09$, $\text{Na} = 0.77$ к.ф.), эпидота ($\text{Fe}/\text{Fe}+\text{Al} = 0.23$), кварца, рутила и апатита (рис. 3.2). По

Continue of table

Таблица (продолжение)

№ п.п	12		13			14					15		
	Omp	Ph	Grt		Di	Grt	Di	Ph	Chl	Pmp	Grt	Omp	Kfs*
			с	г									
SiO ₂	54.5	49.0	38.2	38.7	53.7	37.9	52.0	49.4	28.7	38.2	37.4	52.8	62.5
TiO ₂	0.11	0.39	0.17	0.10	0.00	0.17	0.00	0.34	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	10.8	25.4	20.8	20.7	2.41	20.5	3.35	24.4	17.0	25.0	20.2	10.2	18.7
FeO	11.0	6.63	19.1	17.2	8.92	20.1	9.93	6.43	27.1	4.04	28.9	14.2	0.00
MnO	0.09	0.36	1.30	1.19	0.00	1.72	0.17	0.01	0.52	0.53	0.65	0.03	0.00
MgO	4.66	4.40	0.98	2.79	11.5	0.94	10.8	3.93	15.3	3.34	0.81	4.35	0.00
CaO	10.2	0.00	19.4	19.2	22.2	18.4	22.0	0.00	0.84	21.6	12.0	10.9	0.30
Na ₂ O	7.83	0.00	0.00	0.00	1.12	0.00	1.49	0.23	0.17	0.00	0.00	6.93	0.30
K ₂ O	0.06	10.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9.41	0.00	0.00	0.00	0.07	14.1
Σ	99.25	96.18	99.95	99.88	99.85	99.73	99.74	94.15	89.63	92.81	99.96	99.48	99.36
Коэффициенты кристаллохимической формулы													
Si	1.99	3.24	2.99	3.00	2.00	2.99	1.94	3.31	3.00	6.13	2.99	1.95	2.99
Ti	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.10	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
Al	0.46	1.94	1.92	1.89	0.11	1.90	0.15	1.92	2.09	4.73	1.91	0.44	1.05
Fe	0.34	0.36	1.25	1.11	0.28	1.32	0.31	0.36	2.36	0.54	1.93	0.44	0.00
Mn	0.00	0.02	0.09	0.08	0.00	0.12	0.01	0.00	0.05	0.07	0.04	0.00	0.00
Mg	0.25	0.42	0.11	0.32	0.64	0.11	0.60	0.39	2.37	0.80	0.10	0.24	0.00
Ca	0.40	0.00	1.63	1.59	0.89	1.55	0.88	0.00	0.09	3.72	1.03	0.43	0.01
Na	0.55	0.00	0.00	0.00	0.08	0.00	0.11	0.03	0.04	0.00	0.00	0.50	0.03
K	0.00	0.83	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.86
#Mg	0.42	0.52	0.08	0.21	0.70	0.07	0.65	0.52	0.50	0.57	0.05	0.35	
#Ca			0.54	0.53		0.52					0.34		

End of table

Таблица (окончание)

№ п.п	16			17			18			19			
	Grt	Di	Omp	Grt	Omp	Pmp	Grt	Omp	Pmp	Grt	Omp	Ttn	
SiO ₂	38.0	52.7	53.6	37.9	55.5	39.0	38.1	51.7	54.8	37.9	38.1	55.2	31.8
TiO ₂	0.17	0.00	0.06	0.23	0.04	0.05	0.11	0.00	0.00	0.32	0.08	0.00	32.7
Al ₂ O ₃	20.5	1.99	7.40	21.3	10.3	26.8	21.2	10.9	10.6	20.3	20.7	10.2	5.35
FeO	20.8	10.0	9.05	18.0	7.47	3.20	19.4	10.3	7.80	10.9	17.4	7.62	1.95
MnO	1.15	0.03	0.11	6.0	0.30	2.01	3.68	0.58	0.21	14.1	1.78	0.19	0.00
MgO	1.01	12.0	9.11	0.88	7.57	3.57	1.10	7.02	7.24	0.53	0.94	7.67	0.00
CaO	18.2	21.8	15.6	15.2	12.6	20.4	16.2	12.9	12.3	15.9	20.2	12.8	28.2
Na ₂ O	0.00	1.32	4.65	0.00	5.98	0.00	0.00	5.84	6.57	0.00	0.00	6.35	0.00
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Σ	99.83	99.84	99.58	99.51	99.76	95.03	99.79	99.24	99.52	99.95	99.20	100.03	100.0
Коэффициенты кристаллохимической формулы													
Si	2.99	1.96	1.96	3.00	2.01	6.11	3.00	1.89	1.98	3.00	3.00	1.99	1.01
Ti	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.78
Al	1.90	0.09	0.32	2.00	0.44	4.94	1.97	0.47	0.45	1.90	1.92	0.43	0.20
Fe	1.37	0.31	0.28	1.19	0.23	0.42	1.28	0.31	0.24	0.72	1.15	0.23	0.05
Mn	0.07	0.00	0.00	0.40	0.00	0.27	0.24	0.02	0.00	0.95	0.12	0.01	
Mg	0.12	0.67	0.50	0.11	0.41	0.83	0.13	0.38	0.39	0.06	0.11	0.41	
Ca	1.54	0.87	0.61	1.29	0.49	3.42	1.37	0.51	0.48	1.35	1.70	0.49	0.96
Na	0.00	0.10	0.33	0.00	0.42	0.00	0.00	0.42	0.46	0.00	0.00	0.44	
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
#Mg	0.08	0.68	0.64	0.06	0.64	0.55	0.08	0.54	0.62	0.04	0.08	0.62	
#Ca	0.51			0.43			0.46			0.45	0.57		

Примечание. 1—10 — форстерит-энстатитовая порода (Fo + En + Mgs + Ti-Chu ± Ang ± Chl), проба К-1870, район д. Караяново; 11—16 — антигоровый серпентинит (Ang + Chl + Amp + Mgs + Cr-Spl + Mag), проба К-2109, район д. Утарбаево; 17—19 — антигоровый серпентинит (Ant + Chl + Mgs + Mag), проба К-2232, район п. Новоташлинский.

с — центр, г — край зерна. # Mg = Mg/(Mg + Fe + Mn). # Ca = Ca/(Mg + Fe + Mn + Ca). * содержит BaO — 3.46 мас. %.

Рис. 2. Вариации составов гранатов в метаяльтрафитах.

1—2 — УНПМ-эклогит-перидотитовая единица: 1 — из форстерит-энстатитовой породы, 2 — из УНПМ-эклогита [4—5], 3—6 — НР-УНПМ мафит-ультрамафитовая единица: 3 — из антигортитового серпентинита (а), 4 — из гранат-клинопироксеновой породы [3], 5 — из антигортитового серпентинита (б), 6 — из гранат-глюакофановых сланцев [6].

Fig. 2. Composition variations in the garnets of ultramafites from:

1—2 — UHPM-eclogite-peridotite unite of Maksutov complex: 1 — forsterite-enstatite rocks, 2 — UHPM eclogite [4—5], 3—6 — HP-UHPM association of mafic-ultramafic rocks: 3 — antigorite serpentinites (a), 4 — garnet-clinopyroxene rocks [3], 5 — antigorite serpentinites (b), 6 — garnet-glaucophane schists [6].

Рис. 3. Микрофотографии кристаллов граната с включениями УНП-НР минералов.

1 — из форстерит-энстатитовых пород, 2—3 — из антигортитовых серпентинитов: 2-а (район д. Утарбаево), 3-б (район п. Новоташлинский).

Fig. 3. Microphotographs of garnet crystals with including of UHP-HP minerals from: 1 — forsterite-enstatite rocks, 2—3 — antigorite serpentinites; 2-a (area near of v. Utarbaevo), 3-b (area near of v. Novotaschinsky)

составу и типу зональности он сравним с гранатом глаукофанизированных низкожелезистых жадеит-диопсидовых эклогитов [1]. Гроссуляр-альмандин (Py до 4 мол. %, Sps до 2 мол. %) образует неоднородные кристаллы с включениями омфациита (Jd_{42} , #Mg = 0.35) и калиевого полевого шпата (Ba = 3.5 мас. %). Альмандин-гроссуляр (Grs от 51 до 54 мол. %) содержит включения омфациита (Jd_{30} , #Mg = 0.26), диопсида (Jd_{9-11} , #Mg = 0.66–0.70), фенгита (Si = 3.31, Na = 0.03 к.ф., #Mg = 0.52), пумпеллиита ($Al_{общ} = 4.3–5.0$ к.ф., #Mg = 0.43–0.58), хлорита (Si = 3.0 к.ф., #Mg = 0.50) и кварца (рис. 3.2). Гранат такого состава типичен для гранат-клинопироксеновых пород [3]. Зональный альмандин-гроссуляр-спессартин (с — $Py_1Alm_{16-27}Sps_{55-41}Grs_{28-31}$) — гроссуляр-альмандин (г — $Py_{4-5}Alm_{51-60}Sps_1Grs_{34-44}$) содержит включения омфациита (Jd_{47} , #Mg = 0.43) и фенгита (Si = 3.28 к.ф., #Mg = 0.54). Аналогичный гранат, но с более низким содержанием Sps компонента, присутствует в гранат-лавсонитсодержащих породах и мраморах [3, 11, 17].

Гранат антигоритовых серпентинитов НР-УНРМ мафит-ультрамафитовой единицы (б) представлен альмандин-гроссуляром и альмандин-спессартин-гроссуляром (табл., рис. 2). Альмандин-гроссуляр ($Py_{3-5}Alm_{40-42}Sps_{8-13}Grs_{43-46}$) неоднороден. Включения в нем сложены омфациитом (Jd_{47} , #Mg = 0.64) и пумпеллиитом ($Al_{общ} = 4.94$ к.ф., #Mg = 0.55) (рис. 3.3). Он сопоставим по составу с гранатом такой же разновидности из форстерит-энстатитовой породы, только более кальциевой. Альмандин-спессартин-гроссуляр образует зональные кристаллы (с — $Py_2Alm_{21}Sps_{32}Grs_{45}$, г — $Py_4Alm_{36}Sps_4Grs_{56}$), содержит включения омфациита (Jd_{40-47} , #Mg = 0.54–0.64) и титанита ($Al_2O_3 = 3.5$ мас. %). Он отличается от альмандин-гроссуляр-спессартина серпентинитов НР-УНРМ мафит-ультрамафитовой единицы (а) более высоким содержанием Grs и низким Sps компонентов.

Подчеркнем, что отдельные зерна альмандин-спессартин-гроссуляра из антигоритового серпентинита НР-УНРМ мафит-ультрамафитовой единицы (а) (район д. Утарбаево) имеют прерывистую оторочку из антигорита (#Mg = 0.92, Cr = 0.03 к.ф.), содержат включения диопсида и пумпеллиита (рис. 3.2), а зерна альмандин-гроссуляра из антигоритового серпентинита (б) (район п. Новоташлинский) — антигоритовую (#Mg = 0.98, Cr = 0.02 к.ф.) и хлоритовую (#Mg = 0.60, $Si^{4+} = 2.74$ к.ф. и $Al_{общ} = 2.52$ к.ф.) оторочку (рис. 3.3), содержат включения ортопироксена (#Mg = 0.87, $Si^{4+} = 1.86$ к.ф. и $Al_{общ} = 0.19$ к.ф.).

Р-Т условия формирования граната

Оценка термодинамических параметров образования граната в метаультрамафитах выполнена по сосуществующим гранату и включениям в нем, с использованием геотермобарометров Grt-Cpx-Ph, Grt-Cpx, Grt-Ph [19].

В УНРМ эклогит-перидотитовой единице малокальциевые пироп-альмандины с повышенным содержанием марганца (№ 1–4) по особенностям состава могут быть сопоставлены с гранатами гранулитовой фации [11, 14]. Образование высококальциевого альмандина и фенгита (№ 5–6) определяется областью $T = 617–693^\circ C$ при $P = 24–34$ кбар, что согласуется с оценкой образования аналогичного граната и фенгита из ассоциации Grt+Omp+Ph+Czo УНРМ эклогита [4]. Гроссуляр-альмандин — альмандин-гроссуляр (№ 7–10) образован при $T = 450–550^\circ C$ и $P = 11–22$ кбар, т. е. отражает поздние регрессивные преобразования метаультрамафита.

В НР-УНРМ мафит-ультрамафитовой единице (а) высококальциевый альмандин (№ 11) образован при НР-Т условиях на ранней стадии метаморфизма метаультрамафитов, если принять во внимание присутствие включений парагонита, устойчивого при водном флюиде до $P = 25$ кбар, при $T = 595^\circ C$. По альмандин-гроссуляр-спессартину, фенгиту и омфациту (№ 12) получены максимально высокие $T = 717.5 \pm 15^\circ C$ при $P = 35.3 \pm 0.9$ кбар. Формирование альмандин-гроссуляра (№ 13–16) происходило на поздних стадиях преобразования ультрамафитов при $T = 548–678^\circ C$, $P \approx 12–22$ кбар. РТ-параметры образования зонального альмандин-спессартин-гроссуляра — альмандин-гроссуляра (№ 17–19) в антигоритовых серпентинитах (б) соответствуют $T = 527–680^\circ C$ при $P = 12.5–15$ кбар.

Вывод

Гранаты метаультрамафитов максютовского комплекса образуют гетерогенное сообщество и представлены широким по составу спектром разновидностей пироп-альмандиновых, альмандиновых, гроссуляр-альмандиновых и альмандин-спессартиновых видов. Кристаллы гранатов содержат включения УНР-НР минералов. По особенностям состава они аналогичны гранатам эклогитов, гранат-клинопироксеновых и гранат-глаукофановых пород, пространственно-генетически связанных с ними. Малокальциевый пироп-альмандиновый гранат в форстерит-энстатитовых породах допускает предположение о возможности проявления раннего метаморфизма в условиях гранулитовой фации. Особенности состава гранатов, минералов включений и Р-Т условия их образования позволяют высказать предположение об аналогичных условиях образования-преобразования форстерит-энстатитовых пород («горячих» эклогитов), антигоритовых серпентинитов (гранат-клинопироксеновых и лавсонитсодержащих пород), антигоритовых серпентинитов (гранат-глаукофановых пород).

Литература

1. Вализер П. М. Гранат эклогитов высокobarических комплексов Урала // Литосфера. 2011. № 5. С. 55–72.
2. Вализер П. М., Краснобаев А. А., Русин А. И. Ультравысокobarическая ассоциация в ультрамафитах максютовского комплекса (Южный Урал) // ДАН. 2011. Т. 441 № 4. С. 510–513.
3. Вализер П. М., Русин А. И., Краснобаев А. А., Лиханов И. И. Гранат-пироксеновые и лавсонитсодержащие породы максютовского комплекса // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 11. С. 1754–1777.
4. Вализер П. М., Краснобаев А. А., Русин А. И. Жадеит-гроссуляровый эклогит максютовского комплекса (Южный Урал) // Литосфера. 2013. № 4. С. 50–61.
5. Вализер П. М., Краснобаев А. А., Русин А. И. УНРМ-эклогит максютовского комплекса (Южный Урал) // ДАН. 2015. Т. 461. № 3. С. 316–321.
6. Вализер П. М., Краснобаев А. А., Русин А. И., Зворыгина А. А. Гранат-глаукофановые сланцы Ташлинского блока максютовского комплекса (Южный Урал) // Литосфера. 2015. № 5. С. 51–70.
7. Добрецов Н. Л. Глаукофансланцевые и эклогит-глаукофансланцевые комплексы СССР. Новосибирск: Наука, 1974. 429 с.
8. Краснобаев А. А., Давыдов В. А., Ленных В. И. Геохронологическая эволюция максютовского комплекса (Урал) // ДАН. 1998. Т. 362. № 3. С. 397–401.

9. Краснобаев А. А., Вализер П. М., Анфилов В. Н., Бушарина С. В. Цирконология гранат-глюкофановых сланцев максютовского комплекса (Южный Урал) // ДАН. 2015. Т. 461. № 6. С. 696—700.

10. Ленных В. И. Эклогит-глюкофановый пояс Южного Урала. М: Наука, 1977. 160 с.

11. Ленных В. И. Гранаты Тараташского гранулитового комплекса // Гранаты метаморфических комплексов Урала. Свердловск. 1980. С. 3—7.

12. Лепезин Г. Г., Травин А. В., Юдин Д. С., Волкова Н. И., Корсаков А. В. Возраст и термическая история максютовского метаморфического комплекса (по $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ данным) // Петрология. 2006. Т. 14. № 1. С. 109—125.

13. Русин А. И. Высокобарический метаморфизм Урала // Геодинамика, магматизм, метаморфизм и рудообразование. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН. 2007. С. 421—460.

14. Соболев Н. В. Парагенетические типы гранатов. М: Наука. 1964. 218 с.

15. Dobretsov N. L., Shatsky V. S., Coleman R. G., Lennykh V. I., Valizer P. M., Lion J., Zhang R., Beane R. Tectonic setting and petrology of ultrahigh-pressure metamorphic rocks in Maksyutov complex, Ural Mountains. Russia // Jnt. Geol. Rev. 1996. V. 38. P. 136—160.

16. Glodny J., Bingen B., Austrheim H., Molina J. F., Rusin A. Precise eclogitization ages deduced from Rb/Sr mineral systematics: the Maksyutov complex, Southern Urals, Russia // Geochim. Cosmochim. Acta. 2002. V. 66 (7). P. 1221—1235.

17. Lennykh V. I., Valizer P. M. High-pressure rocks of the Maksyutov complex (Southern Urals) // Fourth International Eklogite field symposium. Novosibirsk, OIGGM SB RAS. 1999. P. 64.

18. Matte P., Maluski H., Caby R., Nicolas A., Kepezhinskis P., Sobolev S. Geodynamic model and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating for the generation and emplacement of the High Pressure (HP) metamorphic rocks in SW Urals // C. R. Acad. Sci Ser. 11. 1993. V. 317. P. 1867—1874.

19. Ravna E. J., Paquin J. Thermobarometric methodologies applicable to eclogites and garnet ultrabases. EMU Notes in Mineralogy. 2003. V. 5 (8). P. 229—259.

References

1. Valizer P. M. *Granat eclogitov vysokobaricheskikh kompleksov Urala* (Garnet of eclogite high baric complexes of the Urals). Litosfera, 2011, No. 5, pp. 55—72.

2. Valizer P. M., Krasnobaev A. A., Rusin A. I. *Ultravysokobaricheskaya assotsiatsiya v ultramafitakh maksiutovskogo kompleksa (Yuzhny Ural)* (Ultra high baric association in ultramafites of maksiyutovsky complex). DAN, 2011, V. 441, No. 4, pp. 510—513.

3. Valizer P. M., Rusin A. I., Krasnobaev A. A., Leehanov I. I. *Granat-piroksenovye i lavsonitsozderzhashchie porody maksiutovskogo kompleksa* (garnet-pyroxene and lavsonite-containing rocks of maksiyutovsky complex). Geologiya i geofizika, 2013, V. 54, No. 11, pp. 1754—1777.

4. Valizer P. M., Krasnobaev A. A., Rusin A. I. *Zhadeit-grossularovyye eclogit maksiutovskogo kompleksa (Yuzhny Ural)* (Zhadeite-grossular eclogite of maksiyutovsky complex). Litosfera, 2013, No. 4, pp. 50—61.

5. Valizer P. M., Krasnobaev A. A., Rusin A. I. *UHPM-eclogit maksiutovskogo kompleksa (Yuzhny Ural)* (UHPM-

eclogite of maksiyutovsky complex). DAN, 2015, V. 461, No. 3, pp. 316—321.

6. Valizer P. M., Krasnobaev A. A., Rusin A. I., Zvorygina A. A. *Granat-glaukofanovye slantcy Tashlinskogo bloka maksiutovskogo kompleksa (Yuzhny Ural)* (Garnet-glaucophane shales of Tashlinsky block of maksiyutovsky complex (South Urals)). Litosfera, 2015, No. 5, pp. 51—70.

7. Dobretsov N. L. *Glaukofanslantcevye i eclogit-glaukofanslantcevye komplekсы SSSR* (Glaucophane and eclogite glaucophane shale complexes of the USSR). Novosibirsk: Nauka, 1974, 429 pp.

8. Krasnobaev A. A., Davydov V. A., Lennykh V. I. *Geokhronologicheskaya evolyutsiya maksiutovskogo kompleksa (Ural)* (Geochronological evolution of maksiyutovsky complex (Urals)). DAN, 1998, V. 362, No. 3, pp. 397—401.

9. Krasnobaev A. A., Valizer P. M., Anfilogov V. N., Busharina S. V. *Tsirkonologiya granat-glaukofanovykh slantsev maksiutovskogo kompleksa (Yuzhny Ural)* (Zirconology of garnet-glaucophane shales of maksiyutovsky complex (South Urals)). DAN, 2015, V. 461, No. 6, pp. 696—700.

10. Lennykh V. I. *Eclogit-glaukofanovyye poyasy Iuzhnogo Urala* (Eclogite-glaucophane belt of South Urals). Moscow, Nauka, 1977, 160 pp.

11. Lennykh V. I. *Granaty Taratashskogo granulitovogo kompleksa* (Garnets of Taratashsky granulite complex). Granaty metamorficheskikh kompleksov Urala. Sverdlovsk. 1980, pp. 3—7.

12. Lepezin G. G., Travin A. V., Iudin D. S., Volkova N. I., Korsakov A. V. *Vozrast i termicheskaya istoriya maksiutovskogo metamorficheskogo kompleksa (po $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dannym)* (Age and thermal history of maksiyutovsky metamorphic complex ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ data)). Petrologiya. 2006, V. 14, No. 1, pp. 109—125.

13. Rusin A. I. *Vysokobaricheskii metamorfizm Urala* (High baric metamorphism of Urals). *Geodinamika, magmatizm, metamorfizm i rudoobrazovanie*. Ekaterinburg, IGG UrO RAN, 2007, pp. 421—460.

14. Sobolev N. V. *Parageneticheskie tipy granatov* (Paragenetic types of garnets). Moscow, Nauka, 1964, 218 pp.

15. Dobretsov N. L., Shatsky V. S., Coleman R. G., Lennykh V. I., Valizer P. M., Lion J., Zhang R., Beane R. Tectonic setting and petrology of ultrahigh-pressure metamorphic rocks in Maksyutov complex, Ural Mountains. Russia In: Jnt. Geol. Rev. 1996. V. 38. P. 136—160.

16. Glodny J., Bingen B., Austrheim H., Molina J. F., Rusin A. Precise eclogitization ages deduced from Rb/Sr mineral systematics: the Maksyutov complex, Southern Urals, Russia // Geochim. Cosmochim. Acta. 2002. V. 66 (7). P. 1221—1235.

17. Lennykh V. I., Valizer P. M. High-pressure rocks of the Maksyutov complex (Southern Urals) // Fourth International Eklogite field symposium. Novosibirsk, OIGGM SB RAS. 1999. P. 64.

18. Matte P., Maluski H., Caby R., Nicolas A., Kepezhinskis P., Sobolev S. Geodynamic model and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating for the generation and emplacement of the High Pressure (HP) metamorphic rocks in SW Urals // C. R. Acad. Sci Ser. 11. 1993. V. 317. P. 1867—1874.

19. Ravna E. J., Paquin J. Thermobarometric methodologies applicable to eclogites and garnet ultrabases. EMU Notes in Mineralogy. 2003. V. 5 (8). P. 229—259.