

СТРУКТУРА И МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ КЕЛИФИТОВЫХ КАЙМ В ГРАНАТОВЫХ ПОРОДАХ МАССИВА УЗЯНСКИЙ КРАКА (ЮЖНЫЙ УРАЛ)

© 2014 г. И. А. Готтман, Е. В. Пушкарёв, В. В. Хиллер, Д. А. Замятин, С. П. Главатских, Д. В. Кузнецов

Гранатовые породы, варьирующие по составу от пироксенитов до габброидов, образуют в перидотитовом массиве Узьянский Крака (Башкортостан) линейно-вытянутое тело протяженностью около 2 км и мощностью до 20–25 м. Простираются пород, так же как и ориентировка деформационных структур, гнейсовидности и полосчатости, северо-восточное, 30°, а падение субвертикальное или крутое северо-западное. Гранатовые породы и ассоциированные с ними шпинелевые вебстериты и тонкополосчатые амфибол-клинопироксен-клиноцоизитовые породы (амфиболиты) окружены серпентинитами и разделяют в пространстве лерцолит-гарцбургитовый на западе и дунит-гарцбургитовый на востоке блоки массива Узьянский Крака. Положение и геологическое строение этого тела были описаны нами ранее [2] и здесь не рассматриваются.

Главной петрографической особенностью всех гранатовых пород этого тела является развитие реакционных келифитовых кайм, окружающих зерна породообразующего граната. Обычно ширина келифитовых зон составляет 2–5 мм, но иногда достигает 7–8 и реже 10 мм. В зависимости от размера зерен граната он может сохранять реликты, окруженные келифитовой каймой либо полностью замещаться келифитом. В последнем случае структура пород превращается в друзитовую. Еще в 1960 г. С.В. Москалева и М.Т. Орлова [1] предположили, что гранатовые породы Узьянского Крака прошли два этапа метаморфизма: прогрессивный с образованием граната и регрессивный с образованием по гранату реакционных келифитовых кайм, вплоть до его полного уничтожения. Резкая смена в естественных обнажениях гранатовых и безгранатовых пород может указывать на незавершенность процессов регрессивного преобразования пород. Мы предполагаем, что состав минералов из келифитовых зон должен дать информацию об условиях проявления ретроградного этапа преобразования гранатовых пород.

Поскольку келифитизация граната проявлена во всех гранатовых породах Узьянского Крака, для изучения нами взяты два образца, различающиеся по меланократовости и железистости: 1) проба Пе-1433 (53°37.4592' с.ш., 57°51.692' в.д.), пред-

ставляющая собой гранат-амфиболовый клинопироксенит, была отобрана в южной части тела гранатовых пород из скального обнажения (мощностью ~10–15 м и протяженностью – 100 м); 2) проба Пе-1443 (53°37.955' с.ш., 57°52.174' в.д.), амфибол-пироксен-гранатовая порода, отобрана из скального обнажения размером 10 × 15 м в северной части тела. Химический состав пород приведен в табл. 1. Породы содержат, мас. %: SiO₂ – 41, Al₂O₃ – 15–16, MgO – 12–14, (Na₂O + K₂O) – 1.2–1.8, и входят в поле пикробазальтов-пикритов [6].

Структура гранат-амфиболового пироксенита порфиробластическая. Порфиробласты представлены крупными выделениями граната размером до 1–1.5 см. Количество граната в породе около 10%. Клинопироксен (20–30%) образует мелкие ксеноморфные зерна размером 0.5–1 мм. Амфибол (25–40%) формирует порфиробласты овальной или таблитчатой формы с неровными краями размером до 5 мм, плеохроирующие в светло-зеленых тонах. Между темноцветными минералами располагается мелкозернистый агрегат, состоящий из срастаний зерен клиноцоизита, рудного минерала и фаз, не поддающихся оптической диагностике. Этот агрегат слагает до 15–25% породы. В некоторых зернах граната наблюдаются изометричные включения клинопироксена и клиноцоизита размером 1–3 мм.

Амфибол-пироксен-гранатовая порода имеет тонкополосчатую текстуру и гранобластовую с элементами гипидиоморфно-зернистой структуры. Преобладающим минералом в породе является бледно-розовый гранат, количество которого составляет 35–40 мас. %. Средний размер зерен 1–2 мм. Клинопироксен встречается в виде редких порфиробластов овальной формы размером до 2–3 мм, но большей его частью, около 25–30 мас. %, формируется мелкозернистый агрегат (<1 мм), сложенный ксеноморфными зернами, в основной ткани породы. Светло-коричневый амфибол слагает до 15% породы. Амфибол распределен неравномерно, в виде полос. В породе отмечается повышенное количество сульфидов (до 3 мас. %).

Гранаты в обоих изученных образцах с краев замещаются келифитовыми каймами, строение и состав которых характеризуется общими чертами, но

имеет и некоторые особенности. Так, келифитовые каймы в образце Пе-1433 имеют мощность около 2–3 мм, они полностью, со всех сторон, окружают зерна граната. В минеральном агрегате келифитовой каймы наблюдаются изометричные зерна клинопироксена и клиноцоизита размером до 1–2 мм, которые походят на включения этих минералов в гранате. Можно предположить, что они являются реликтами этих включений, сохранившихся при замещении граната келифитом. Рост келифитовой каймы в этом образце происходил в стационарных условиях равномерного давления. Келифитовая зона состоит из тончайших сростаний минералов, предположительно амфибола и шпинели, состав которых оптически установить затруднительно (рис. 1б). Порфиробласты амфибола, примыкающие к келифитовой кайме, также содержат червеобразные вроски шпинели (см. рис. 1б).

Келифитовые каймы в образце Пе-1443 развиты неравномерно (рис. 1а). На сторонах граната, параллельных гнейсовидности породы и ориентировкам полос, обогащенных амфиболом, ширина келифитовых кайм минимальна и составляет около 0.1–0.2 мм. На сторонах, перпендикулярных этим направлениям, ширина келифита максимальна и составляет до 0.5–0.7 мм. Это указывает на синтетектоническое развитие келифитовых кайм, которые имеют максимальные мощности в “тенях” давления.

Изучение минерального состава келифитовых кайм на рентгеноспектральном микроанализаторе Cameca SX-100 показало, что они состоят из тончайших сростаний орто- и клинопироксена, амфибола, плагиоклаза, шпинели (см. рис. 1а-2, а-3). Кроме того, в келифитовых каймах обнаружены мусковит, клиноцоизит, лисетит, диаспор (последний замещает червеобразные выделения шпинели), сульфиды.

Амфибол из келифитовых кайм по химическому составу отвечает ряду паргасит–магнезиогастингсит $Ca_B \geq 1.5$; $(Na+K)_A \geq 0.50$; $Ti < 0.5$ [5] и характеризуется следующими вариациями $f = 0.23–0.32$, $Al_2O_3 = 12–16$, $Na_2O = 1.5–3$ мас. %. От состава порообразующего амфибола и зерен амфибола, прилегающего к келифитовой кайме, он отличается более высокой желеистостью, низким содержанием кальция, хрома и титана (рис. 2; табл. 2, ан. 1–12).

Состав клинопироксена в каймах отличается от состава порообразующего клинопироксена значительно более низким содержанием глинозема и титана (рис. 3а; табл. 1, ан. 18–26). Следует отметить, что состав клинопироксена образующего изометричные зерна (размером 2–3 мм) в келифитовой кайме, отвечает составу клинопироксена, образующего включения в зернах граната. Такой клинопироксен характеризуется высоким содержанием Al_2O_3 (8–10 мас. %) и повышенным натрия Na_2O (0.6–0.8 мас. %). По-

Таблица 1. Химический состав изученных гранатовых пород массива Узьянский Крака (мас. %)

Компонент	1	2
	Пе-1433	Пе-1443
SiO ₂	41.30	41.40
TiO ₂	0.28	0.28
Al ₂ O ₃	16.25	15.20
Fe ₂ O ₃	3.67	5.26
FeO	3.50	6.40
MnO	0.14	0.21
MgO	14.12	13.43
CaO	16.74	14.56
Na ₂ O	1.43	0.82
K ₂ O	0.40	0.38
P ₂ O ₅	0.08	0.08
П.п.п.	2.00	1.60
Сумма	100.36	100.41
f	0.21	0.31

Примечание. 1 – гранат-амфиболовый клинопироксенит, 2 – амфибол-клинопироксен-гранатовая порода. П.п.п. – потери при прокаливании; $f = Fe/(Fe + Mg)$.

следнее отличает его как от пироксена келифитовых кайм, так и от порообразующего клинопироксена (см. рис. 3б; табл. 2, ан. 21).

Состав ортопироксена в реакционных каймах варьирует: $f = 0.26–0.33$, $Al_2O_3 = 2.5–5$ мас. %, $CaO = 0.4–1.8$ мас. % (см. табл. 2, ан. 27–30). Плагиоклаз по составу очень стабилен и отвечает анортиту (см. табл. 2, ан. 40, 41). Состав шпинели из кайм, образующей симплектитовые сростания с клинопироксеном, ортопироксеном и амфиболом, одинаков и отвечает магнезиальному герциниту (см. табл. 2, ан. 46, 47).

Мусковит из келифитовой каймы изученных образцов образует редкие зерна размером около 5–10 мкм, по содержанию Na_2O варьирует от 0.15 до 2.7 мас. %. Состав клиноцоизита, образующего в келифитовой кайме мелкие (размером 0.1–0.2 мм) изометричные зерна, соответствует составу клиноцоизита, образующего включения в гранате (см. табл. 2, ан. 42, 43).

Кроме того, в реакционных каймах были обнаружены изометричные зерна размером около 5–50 мкм, состав которых отвечает редкому минералу – алюмосиликату натрия и кальция – лисетиту ($Na_2CaAl_4Si_4O_{16}$). Это вторая находка в мире. Впервые он был обнаружен и описан в музейных образцах эклогитов из Лисет и Реквика в районе Селье (Норвегия) [9]. Считается, что лисетит является индикаторным минералом ретроградных преобразований амфиболитовой ступени высокобарических пород [10].

Методом площадного сканирования было установлено, что суммарный химический состав (см. табл. 2, ан. 39) внутренней части келифитовой каймы в отношении главных элементов соот-

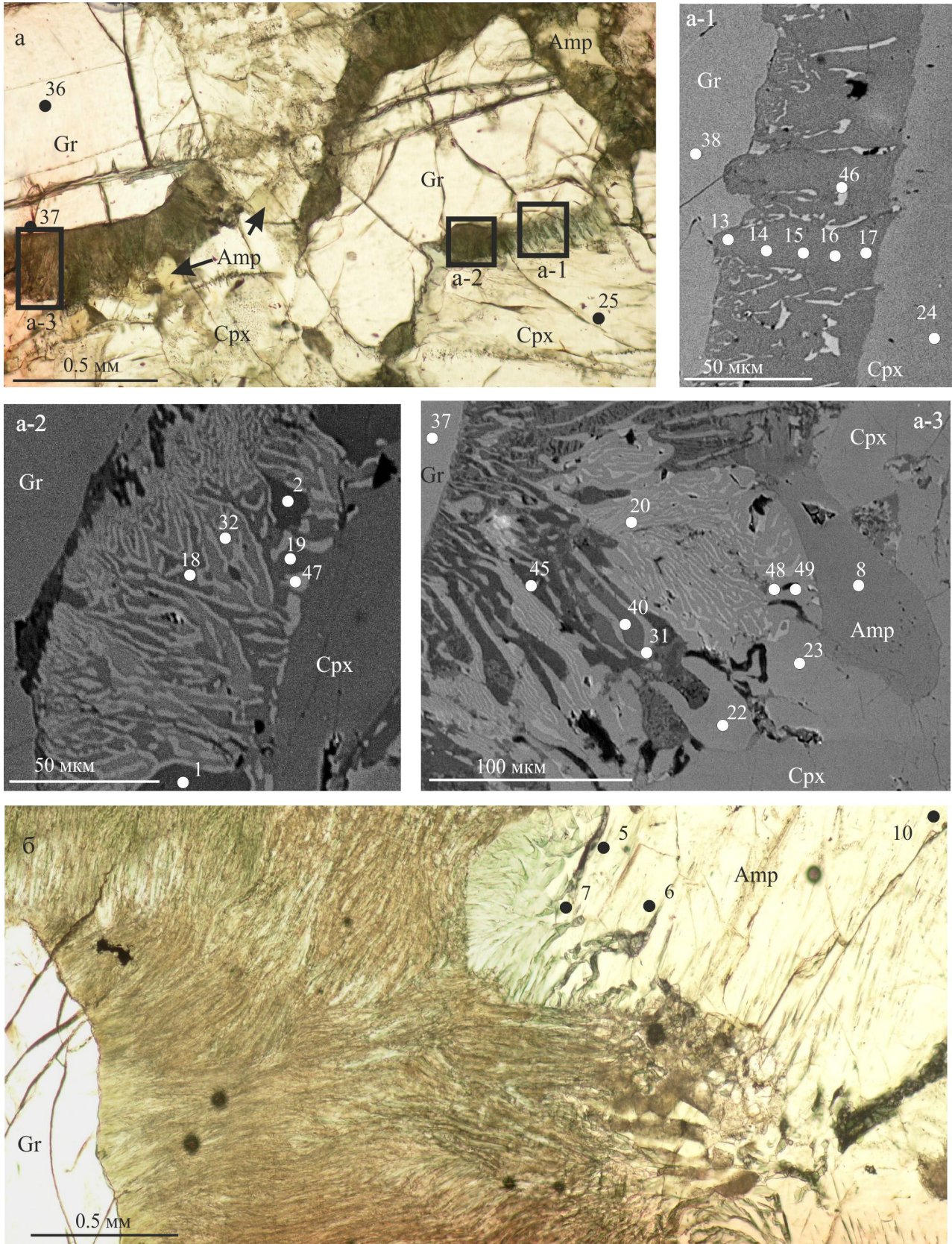


Рис. 1. Микрофотографии шлифов гранатовых пород с келифитовыми каймами вокруг граната.

а – шлиф Пе-1443, а-1, а-2, а-3 – фрагменты фото “а” келифитовой каймы в обратнорассеянных электронах; б – шлиф Пе-1433.

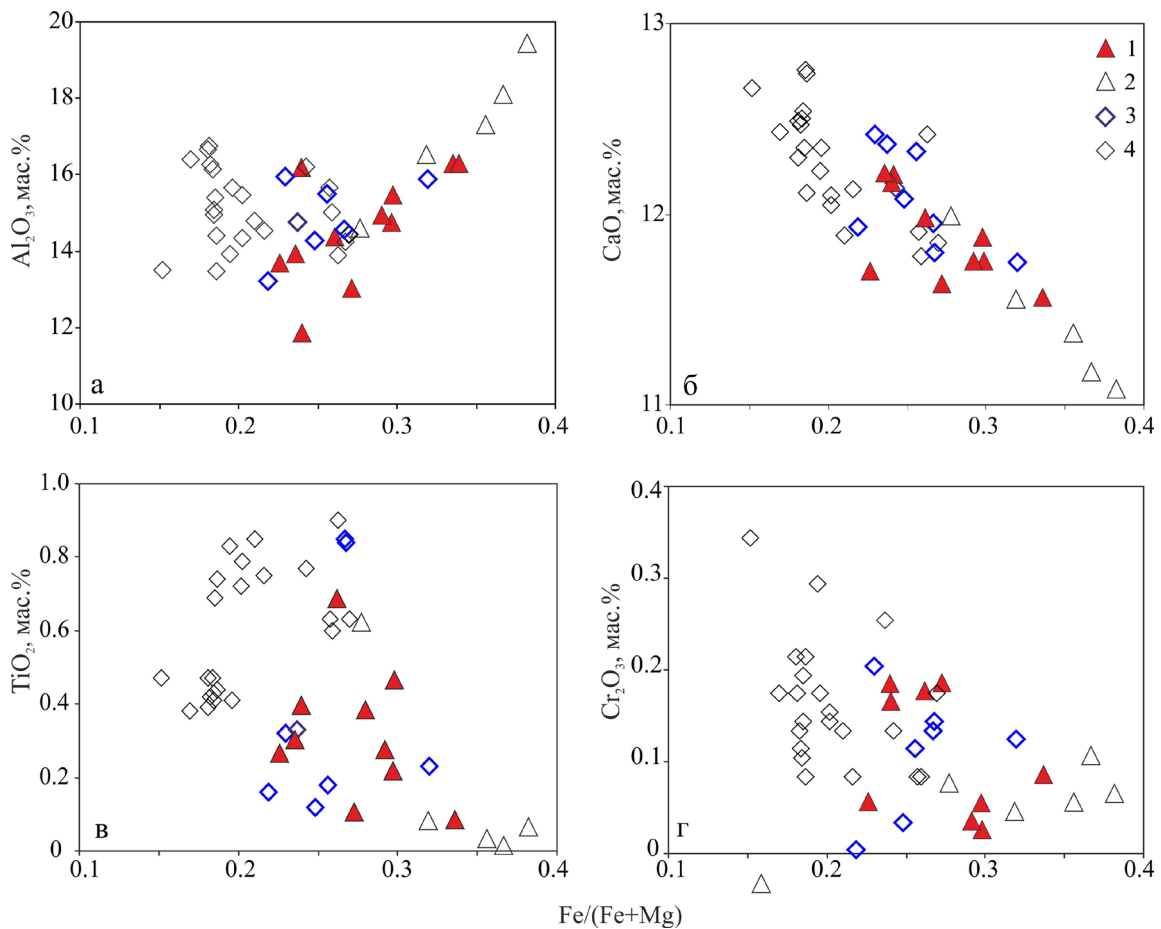
Таблица 2. Состав минералов из гранатовых пород массива Узьянский Крака (мас. %)

Компонент	Амфибол										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
SiO ₂	42.93	42.95	41.61	41.71	44.3	46.34	43.04	43.32	46.27	43.33	
TiO ₂	0.21	0.27	0.46	0.08	0.12	0.16	0.18	0.84	0.47	0.32	
Al ₂ O ₃	14.69	14.87	15.4	16.25	14.27	13.21	15.5	14.25	13.49	15.94	
Cr ₂ O ₃	Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.	0.11	0.14	0.34	0.20	
FeO*	10.69	10.44	10.65	11.66	8.73	8.1	8.79	9.51	5.23	7.72	
MnO	0.14	0.17	Не обн.	0.19	0.17	0.12	0.19	Не обн.	Не обн.	0.17	
MgO	13.9	13.94	13.81	12.68	14.55	15.91	14.07	14.31	16.07	14.25	
CaO	11.86	11.75	11.75	11.55	12.08	11.93	12.33	11.8	12.66	12.42	
Na ₂ O	2.72	2.68	2.95	2.50	1.95	1.72	2.00	2.70	1.49	2.00	
K ₂ O	Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.	0.1	Не обн.	0.12	0.13	
Сумма	97.17	97.13	96.78	96.71	96.25	97.53	96.31	96.98	96.23	96.48	
f	0.30	0.29	0.30	0.34	0.25	0.22	0.26	0.27	0.15	0.23	
Компонент	Амфибол							Клинопироксен			
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
SiO ₂	43.12	44.4	39.2	40.55	40.66	41.96	43.03	52.55	52.68	51.94	
TiO ₂	0.41	0.44	0.06	0.01	0.03	0.08	0.62	0.06	0.05	0.2	
Al ₂ O ₃	15.65	14.42	19.4	18.07	17.28	16.46	14.54	2.21	2.21	3.56	
Cr ₂ O ₃	0.17	Не обн.	Не обн.	0.1	Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.	
FeO*	6.87	6.55	12.55	12.27	12.16	10.95	9.76	6.67	6.41	6.12	
MnO	0.12	Не обн.	0.27	0.25	0.13	0.21	Не обн.	0.15	0.16	0.17	
MgO	15.51	15.73	11.17	11.66	12.12	12.86	14.01	14.99	14.95	14.85	
CaO	12.35	12.74	11.07	11.16	11.37	11.55	11.98	23.31	23.31	22.92	
Na ₂ O	2.12	1.87	2.69	2.74	2.57	2.64	2.8	0.17	0.18	0.13	
K ₂ O	0.11	0.13	Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.	–	–	–	
Сумма	96.44	96.44	96.48	96.82	96.38	96.76	96.88	100.18	99.99	99.93	
f	0.20	0.19	0.38	0.37	0.36	0.32	0.28	0.20	0.19	0.18	
Компонент	Клинопироксен										
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
SiO ₂	48.56	50.10	52.43	49.14	49.81	48.68	48.64	49.66	48.56	48.64	
TiO ₂	0.32	0.45	0.24	0.42	0.47	0.31	0.4	0.52	0.32	0.4	
Al ₂ O ₃	10.31	6.35	2.81	7.83	8.2	9.41	9.9	7.81	10.31	9.9	
FeO	3.41	5.53	5.44	4.8	4.34	4.26	3.81	4.73	3.41	3.81	
MnO	0.01	0.10	0.1	0.1	0.05	0.08	0.02	0.06	0.01	0.02	
MgO	12.63	13.85	15.05	13.25	13.08	12.99	12.52	12.68	12.63	12.52	
CaO	23.71	23.40	23.53	23.3	23.18	23.23	23.21	22.51	23.71	23.21	
Na ₂ O	0.57	0.26	0.21	0.39	0.63	0.18	0.7	0.84	0.57	0.7	
Сумма	99.60	100.19	99.82	99.28	99.80	99.25	99.30	98.87	99.60	99.30	
f	0.13	0.18	0.17	0.17	0.15	0.15	0.14	0.17	0.13	0.14	
Компонент	Ортопироксен					Гранат			Состав келифитовой каймы	Плагиоклаз	
	31	32	33	34	35	36	37	38			39
SiO ₂	51.95	52.42	52.86	52.07	52.9	40.58	41.09	39.91	43.64	43.38	
TiO ₂	0.05	0.03	0.08	0.04	0.07	0.04	0.06	0.03	–	–	
Al ₂ O ₃	5.01	2.68	2.47	4.16	2.86	22.95	22.63	22.58	21.92	34.89	
Cr ₂ O ₃	–	–	–	–	–	0.05	0.1	0.06	–	–	
FeO	17.43	20.37	18.88	17.74	18.2	13.89	13.94	14.12	9.51	0.53	
MnO	0.41	0.48	0.35	0.36	0.37	0.32	0.27	0.24	–	–	
MgO	22.72	23.18	24.5	23.96	24.57	12.35	12.53	12.37	12.53	–	
CaO	1.78	0.53	0.44	0.56	0.52	10.12	10.2	10.13	10.47	19.78	
Na ₂ O	Не обн.	0.01	Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.	0.82	0.31	
K ₂ O	–	–	–	–	–	–	–	–	1.10	Не обн.	
Сумма	99.04	99.70	99.61	99.06	99.66	100.3	100.82	99.44	99.99	99.00	
f	0.30	0.33	0.30	0.29	0.29	0.38	0.38	0.39	0.30	–	

Таблица 2. Окончание.

Компонент	Плагиоклаз		Клиноцоизит		Мусковит		Шпинель			Диаспор	Лисетит
	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	
SiO ₂	44.36	39.56	39.07	44.76	44.78	–	–	–	1.02	43.16	
TiO ₂	–	–	–	–	0.03	Не обн.	Не обн.	Не обн.	0.13	–	
Al ₂ O ₃	35.11	32.63	31.55	37.09	37.37	59.94	58.73	59.82	85.37	35.51	
Cr ₂ O ₃	–	–	–	0.03	–	0.27	0.31	0.36	0.14	–	
FeO	0.5	0.81	1.78	0.89	1.00	27.74	27.08	24.09	0.71	0.26	
MnO	–	0.1	0.03	Не обн.	Не обн.	0.19	0.2	0.26	–	–	
MgO	–	0.06	0.15	0.15	0.38	10.03	10.81	12.28	0.54	–	
CaO	19.04	24.54	24.57	1.81	0.97	–	–	–	0.19	9.89	
Na ₂ O	0.62	–	–	2.73	0.28	–	–	–	–	11.03	
K ₂ O	Не обн.	–	–	8.32	10.18	–	–	–	–	Не обн.	
Сумма	99.76	97.70	97.15	95.84	94.99	98.59	97.42	97.41	88.10	99.85	

Примечание. 1–17 – амфибол: 1–4 – келифитовая кайма, 5–8 – края зерен амфибола с червеобразными вростками шпинели, 9–12 – основная масса породы, 13–17 – келифитовая кайма (состоящая из амфибола и шпинели); 18–30 – клинопироксен: 18–21 – келифитовая кайма, 22–26 – основная масса породы, 27–30 – включения в гранате; 31–35 – ортопироксен (в келифитовой кайме); 36–38 – гранат, 39 – суммарный состав внутренней зоны келифитовой каймы (площадью 240 × 150 мкм); 40–41 – плагиоклаз; 42–43 – клиноцоизит: 42 – включение в гранате, 43 – в келифитовой кайме; 44–45 – мусковит; 46–48 – шпинель; 49 – диаспор, 50 – лисетит. FeO* – все железо в форме FeO, $f = \text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$, не обн. – элемент не обнаружен. Анализы выполнены на рентгеновском микроанализаторе Cameca SX-100 (ЦКП “Геоаналитик” ИГГ УрО РАН, г. Екатеринбург, аналитик В.В. Хиллер). Номера соответствуют точкам на рис. 1.

Рис. 2. Вариационные диаграммы Fe/(Fe+Mg)–Al₂O₃, –CaO, –TiO₂, –Cr₂O₃ для амфиболов из изученных пород.

Состав амфибола: 1 – келифитовая кайма, 2 – келифитовая кайма с зональным амфиболом, 3 – краевые зоны порфиробласт-амфибола, содержащие вросстки шпинели, 4 – основная масса породы.

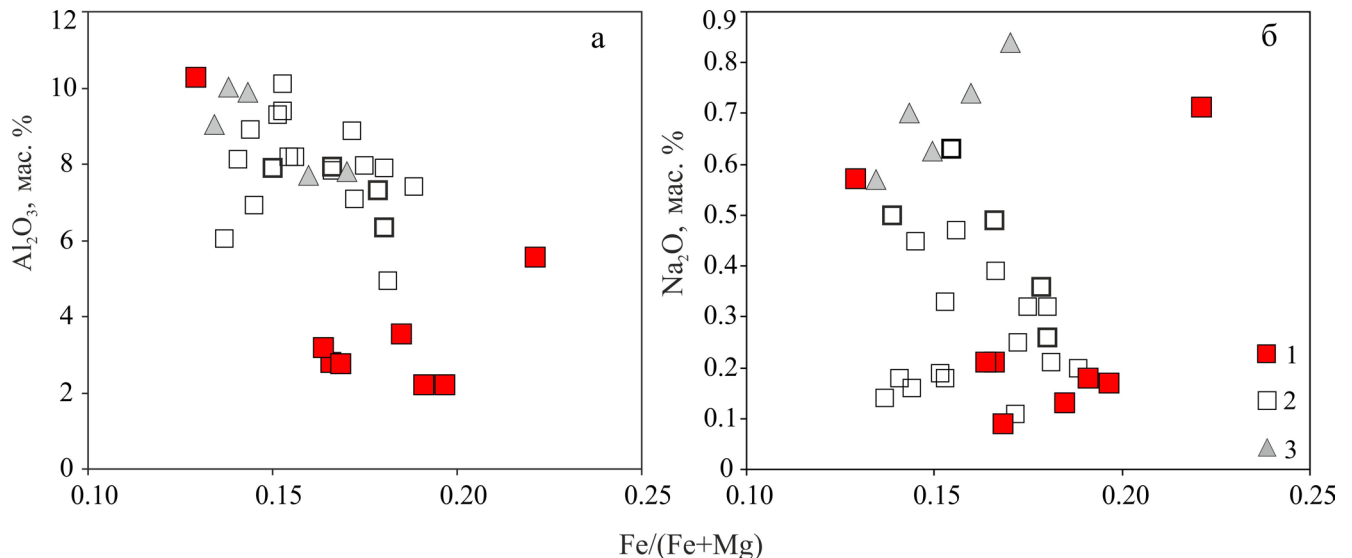


Рис. 3. Вариационные диаграммы Fe/(Fe+Mg)–Al₂O₃ (а) и Fe/(Fe+Mg)–Na₂O (б) для клинопироксенов из исследованных пород.

Состав клинопироксена: 1 – келифитовая кайма, 2 – основная масса пород, 3 – включения в гранате.

ветствует стехиометрии граната, однако по сравнению с последним наблюдается несколько повышенное содержание SiO₂, пониженное FeO и появление примеси K₂O и Na₂O. Иногда на границе между гранатом и клинопироксеном отмечаются реакционная кайма, состоящая только из амфибола и вросков шпинели (см. рис. 1а-1). Состав амфибола в такой кайме плавно изменяется от внутренней зоны келифитовой каймы к внешней. В этом направлении железистость минерала снижается от 0.38 до 0.28, а содержание Al₂O₃ падает от 19.4 до 14.5 мас. % (см. рис. 1; табл. 2, ан. 13–17).

Температура формирования келифитовых кайм, определенная по пироксеновому термометру [4], 630–720°C при давлении 8–13 кбар. Оценки температуры и давления по другим геотермометрам и геобарометрам, хотя и имеют больший разброс, но в целом согласуются с вышеприведенными. Так, температура по содержанию титана в амфиболе [7] составляет 560–630°C, а давление, определенное по амфиболовому геобарометру [8] для наиболее глиноземистых амфиболов келифитовых кайм, – 10–13 кбар, однако в высокобарической области (выше 10 кбар) этот геобарометр дает не очень точные оценки с тенденцией к их занижению [8]. Давление, определенное по амфибол-плаггиоклазовому геобарометру [3], около 7 кбар. Следует отметить, что приведенные оценки температуры и давления по составу пироксенов и амфибола из келифитовой каймы хорошо согласуются с областью устойчивости лисетита, которая составляет, по оценкам Д.К. Смита с соавторами [10], 10 ± 4 кбар при температуре 400°C и 20 ± 4 кбар при температуре 800°C. Таким образом, можно предположить, что

келифитизация граната в породах Узянского Крака происходила при температуре около 630–720°C и давлении около 10–13 кбар, что соответствует зоне перехода между высокобарической амфиболитовой (субфация гранат-пироксеновых амфиболитов) и эклогитовой фациями.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 12-05-00132а, 13-05-00597, 13-05-96031 р_урал а (РФФИ-Урал – правительство Свердловской области), 12-05-00112а), совместных проектов УрО–СО–ДВО РАН № 12-С-5-1004.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Москалева С.В., Орлова М.Т. О генезисе гранатовых пироксенитов массива Крака // Геология и полезные ископаемые Урала. Новая серия. Вып. 28. Л.: ВСЕГЕИ, 1960. С. 143–147.
2. Пушкарёв Е.В., Готтман И.А., Кузнецов Д.В. О геологическом положении высокобарических пород в перидотитовом массиве Узянский Крака на Южном Урале // Ежегодник-2012. Тр. ИГГ УрО РАН. Вып. 160. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2013. С. 62–66.
3. Ферштатер Г.Б. Эмпирический плаггиоклаз-роговообманковый барометр // Геохимия. 1990. № 3. С. 328–334.
4. Brey G.P., Kohler T. Geotermobarometry in Four-phase Lherzolites I. Experimental Resultats 10 to 60 kb // J. Petrol. 1990. V. 31. P. 6. P. 1313–1352.
5. Leake B.E., Woolley A.R., Arps C.E.S., Birch W.D. Nomenclature of amphiboles: Report of the subcommittee on amphiboles of the International mineralogical association, commission on new minerals and mineral names // Can. Mineralog. 1997. V. 35. P. 219–246.
6. Le Bas M.L. IUGS Reclassification of the high-mg and

- picritic volcanic rocks // *J. Petrol.* 2000. V. 41, № 10. P. 1467–1470.
7. *Otten M.T.* The origin of brown hornblende in the Artssjallet gabbros and dolerites // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1984. V. 86. P. 185–199.
 8. *Schmidt M.W.* Amphibole composition in tonalite as a function of pressure: An experimental calibration of the Al in hornblende barometer // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1992. V. 110. P. 304–310.
 9. *Smith D.C.* Remarques cristallographiques et petrogenetiques sur des mineraux inhabituels dans les eclogites de Liset et Rekvika, Norvege // X Reunion Annuelle des Sciences de la Terre, Bordeaux, 1984. Societe Geologique de France, Paris. P. 511.
 10. *Smith D.C., Kechid S.-A., Rossi G.* Occurrence and properties of lisetite, $\text{CaNa}_2\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{16}$, a new tectosilicate in the system Ca-Na-Al-Si-O // *Am. Mineralog.* 1986. V. 71. P. 1372–1377.