

ПЕТРОЛОГИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ ЛИТОСФЕРЫ

УДК 552.11:548.4

ГЕНЕЗИС СКАПОЛИТА ИЗ ГРАНУЛИТОВ (*нижнекоровые ксенолиты из диатрем Памира*):  
РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ РАСПЛАВНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ

И.А. Мадюков<sup>1</sup>, В.П. Чупин<sup>1,2</sup>, Д.В. Кузьмин<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,  
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия

<sup>3</sup> Max Planck Institut für Chemie, 27 Joh.-Joachim-Becher-Weg, Mainz, 55128, Germany

Приведены результаты минералогических и термобарогеохимических исследований нижнекорового ксенолита скаполитсодержащих гранулитов из трубок взрыва фергусит-порфиоров Юго-Восточного Памира (Таджикистан). Во всех минералах (в том числе гранате, клинопироксене и скаполите) этих гранулитов обнаружены первичные расплавные включения, которые изучены с применением термометрических и микрозондовых (EPMA, SIMS, Раман) методов. Установлено, что составы включений соответствуют кислым (от риодацитов до риолитов), существенно-калиевым расплавам нормальной и повышенной щелочности с содержанием H<sub>2</sub>O до 4 мас. %, Cl до 0.8 мас. % и CO<sub>2</sub> около 1 мас. %. Расплавы деплетированы в отношении HREE и имеют высокие Th/U (7.7—9.4). По расплавным включениям и минералогическим термобарометрам показано, что изученный скаполитсодержащий гранулит кристаллизовался при температуре около 1000°C и давлении примерно 15 кбар. Наиболее вероятным процессом образования этой породы являлось инконгруэнтное плавление карбонатсодержащего биотит-кварц-плаггиоклазового субстрата в нижнекоровых условиях. Плавление сопровождалось кристаллизацией граната, клинопироксена, сфена, плаггиоклаза и скаполита, которые в виде включений захватывали микропорции выплавляющихся кислых расплавов. Эти минералы образовались не из расплава, а в его присутствии. Высококальциевый скаполит (Me<sub>67-69</sub>) кристаллизовался вместо плаггиоклаза при высоких содержаниях CO<sub>2</sub> (около 1 мас. %) и Cl (до 0.8 мас. %) в выплавках в присутствии богатого CO<sub>2</sub> флюида.

*Скаполит, ксенолит гранулита, расплавные включения, инконгруэнтное плавление, нижняя кора, Памир.*

GENESIS OF SCAPOLITE FROM GRANULITES (*lower-crustal xenoliths from the Pamir diatremes*):  
RESULTS OF STUDY OF MELT INCLUSIONS

I.A. Madyukov, V.P. Chupin, and D.V. Kuz'min

The results of mineralogical and thermobarogeochemical studies of lower-crustal xenolith of scapolite-bearing granulites from the fergusonite-porphyrus diatremes in Southeastern Pamir (Tajikistan) are presented. All minerals (including garnet, clinopyroxene, and scapolite) of these granulites contain primary melt inclusions, which were studied using thermometric and microprobe methods (EPMA, SIMS, Raman spectroscopy). We have established that their compositions correspond to acid (from rhyodacites to rhyolites), essentially potassic melts of normal and high alkalinity with H<sub>2</sub>O ≤ 4 wt.%, Cl ≤ 0.8 wt.%, and CO<sub>2</sub> ~ 1 wt.%. The melts are depleted in HREE and have high Th/U ratios (7.7–9.4). Study of melt inclusions using mineralogical thermobarometers showed that the scapolite-bearing granulite crystallized at ~1000°C and ~15 kbar. This rock resulted, most likely, from the incongruent melting of carbonate-bearing biotite-quartz-plagioclase substrate in the lower crust, which was accompanied by the crystallization of garnet, clinopyroxene, sphene, plagioclase, and scapolite trapping microportions of acid melts as inclusions. The minerals crystallized not from melt but in its presence. High-Ca scapolite (Me<sub>67-69</sub>) crystallized instead of plagioclase when the melts reached high contents of CO<sub>2</sub> (~1 wt.%) and Cl (≤0.8 wt.%) in the presence of CO<sub>2</sub>-rich fluid.

*Scapolite, granulite xenolith, melt inclusions, incongruent melting, lower crust, Pamir*

## ВВЕДЕНИЕ

Скаполит представляет собой каркасный силикат, по составу образующий изоморфный ряд мариалит ( $3\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]\cdot\text{NaCl}$ ) — мейонит ( $3\text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]\cdot\text{Ca}[\text{CO}_3, \text{SO}_4]$ ). Устойчивость этого минерала в широком *PT* диапазоне делает его распространенным минералом метаморфических и метасоматических пород. Первично-магматический скаполит встречается довольно редко [Goff et al., 1982]. Высококальциевый скаполит, согласно экспериментальным данным [Millhollen, 1974; Goldsmith, Newton, 1977], образуется предпочтительно при повышенных *PT* параметрах и при высоком парциальном давлении  $\text{CO}_2$  и/или  $\text{SO}_3$  во флюиде или в расплаве. Высокое парциальное давление  $\text{CO}_2$  во флюиде, характерное при формировании пород гранулитовой фации метаморфизма [Touret, 1971; Hollister, Burruss, 1976; Newton et al., 1980; Томиленко, Чупин, 1983; Туре, 2009], является благоприятным фактором для кристаллизации высококальциевого скаполита в нижнекоровых условиях. Такой скаполит встречается в эклогитоподобных породах и гранулитах [Бобриевич, Соболев, 1957; Knorring, Kennedy, 1958]. Среди уникальных по составу глубинных ксенолитов из неогеновых трубок взрыва щелочных базальтоидов Юго-Восточного Памира (Таджикистан) также выделены скаполитсодержащие гранулиты [Дмитриев, 1976]. Эти ксенолиты являются единственным источником информации о процессах минералообразования при формировании сверхмощной (до 75—80 км) континентальной коры под Памиром. Целью данной работы являлась реконструкция этих процессов и особенностей состава флюидов, при которых становилось возможным образование скаполита.

Для выяснения генезиса и флюидных режимов кристаллизации памирских глубинных ксенолитов, в том числе скаполитсодержащих, важное значение имеют результаты изучения включений в минералах этих пород. Так, в гранате, кианите и некоторых других породообразующих и акцессорных минералах из всех петрографических разновидностей памирских ксенолитов гранулитов и эклогитов обнаружены первичные включения кислых силикатных расплавов [Чупин и др., 1993; Добрецов, Чупин, 1993; Chupin et al., 1997]. Предварительные результаты исследований этих включений позволили сделать вывод о широком участии процессов инконгруэнтного плавления при формировании этих пород [Chupin et al., 2001]. В настоящей работе приведены прямые данные о высокобарической нижнекоровой кристаллизации скаполита при участии насыщенных  $\text{CO}_2$  кислых выплавов. Эти результаты впервые получены при изучении расплавных включений в скаполите и других минералах в ксенолитах гранулитов из диатрем дункельдыкского комплекса высококальциевых щелочных пород (Юго-Восточный Памир).

### КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТРУБОК ВЗРЫВА И ГЛУБИННЫХ КСЕНОЛИТОВ В НИХ

По данным Э.А. Дмитриева [1976], дункельдыкский комплекс включает трубки взрыва, дайки и субвулканические тела, сложенные породами от ультракальциевых щелочных базальтов (фергуситы) до трахитов, сиенитов и карбонатитов. Диатремы и дайки вытянуты полосой протяженностью около 15 км и приурочены к региональному разлому, разделяющему зоны Центрального и Юго-Восточного Памира (рис. 1). Трубки имеют чаще всего изометричную форму, небольшие в поперечнике размеры (от 50 до 200 м) и крутые контакты. Все они сложены в основном фергусит-порфирами, в которых фенокристы клинопироксена и лейцита занимают до 60 % объема породы. По результатам изучения включений силикатных и карбонатных расплавов в фенокристах из этих пород показано, что фергуситовые магмы кристаллизовались в интервале температур 1200—970°C, и начало силикатно-карбонатной несмесимости совпадает с ранней кристаллизацией расплавов при температурах 1150—1100°C и давлении около 4 кбар [Соловова и др., 1996].

В тр. Эклогитовая найдены многочисленные глубинные ксенолиты, которые транспортировались щелочными базальтами из низов коры и верхней мантии [Дмитриев, 1976]. Эти ксенолиты представлены в основном различными гранулитами, эклогитами и пироксенитами, реже встречаются вебстериты

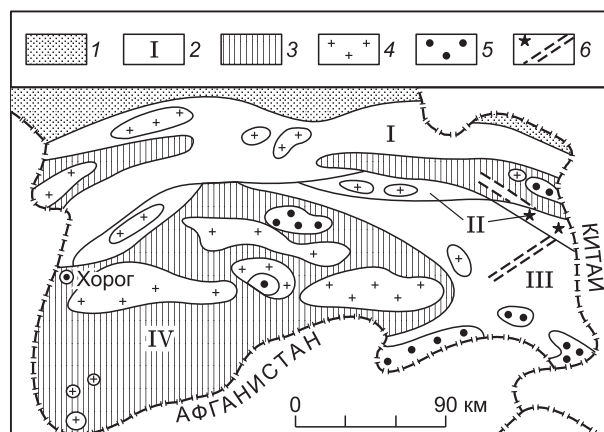


Рис. 1. Схема размещения трубок взрыва калиевых щелочных базитов (N) Юго-Восточного Памира, Таджикистан [Лутков, 2003].

1 — герциниды Северного Памира; 2 — тектонические зоны Южного Памира: I — Центральный Памир, II — Рушан-Пшартская, III — Юго-Восточный Памир, IV — Юго-Западный Памир; 3 — блоки докембрия; 4 — гранитоиды ( $\text{AR}_2\text{-N}$ ); 5 — вулканоплутонические и интрузивные серии шошонит-латит-монзонит-кварцево-сиенитового ряда (Т-Р); 6 — ксенолитсодержащие диатремы фергуситов и дайковые пояса сиенитоидов дункельдыкского комплекса (N).

и глиммериты. Некоторые ксенолиты обладают грубополосчатым строением, причем полосы эклогитов иногда чередуются с полосами пироксенитов. Характерной их чертой является высокая калиевая щелочность. Ксенолиты имеют округлую форму, их размер колеблется от 1 до 50 см. Эклогитовые и пироксенитовые включения имеют более округлую форму и значительно меньше по размеру гранулитовых ксенолитов. Среди гранулитов преобладают массивные гранат-клинопироксен-санидиновые (иногда плагиоклазовые ± скаполит) породы; реже встречаются гнейсовидные гранат-кианитовые (без пироксена), гранат-гиперстеновые и гранат-биотитовые разновидности.

Памирские ксенолиты эклогитов и пироксенитов ранее относились к мантийным породам, а ксенолиты гранулитов — к нижнекоровым [Лутц, 1974; Дмитриев, 1976; Дмитриев, Лутков, 1983]. В последнее время ксенолиты эклогитов из этого района также отнесены к нижнекоровым породам, образовавшимся при давлениях 22—28 кбар [Hacker et al., 2005].

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

При оптическом изучении шлифов определялся минеральный состав, взаимоотношения между минералами, структуры и текстуры ксенолитов. В двусторонне полированных пластинках выделялись расплавные и флюидные включения в минералах. По характеру распределения включений обосновывалась их первичность.

Химический состав породообразующих и аксессуарных минералов, а также стекол расплавных включений исследовался в основном рентгеноспектральным методом (EPMA) на микрозонде Camebax-Micro в ИГМ СО РАН (г. Новосибирск) при ускоряющем напряжении 20 кВ и токе зонда 20 нА. Стекла включений размером более 20 мкм изучались с помощью расфокусированного пучка, что позволяло минимизировать потери щелочей при анализе. Для компенсации потерь Na при анализе стекол мелких включений фокусированным пучком (диаметром 3—4 мкм) содержания Na<sub>2</sub>O, согласно рекомендациям [Chupin et al., 1998], увеличены на 30 %. Элементные карты (для Ca, Mg, Fe, Si, Al, Ti, Cr, K и Na) пяти зерен граната были получены на электронном микроанализаторе JEOL JXA 8200 Superprobe в Институте химии (г. Майнц, Германия) при ускоряющем напряжении 20 кВ, силе тока 200 нА с шагом 3—6 мкм. Определение интенсивности сигнала проводилось на позиции пика измеряемого элемента в течение 0.7 с в каждой точке. Для этих зерен находился состав граната по профилям с шагом 10 мкм при ускоряющем напряжении 20 кВ и силе тока 80 нА. Расчет концентрации производили с помощью метода ZAF-коррекции. В качестве стандартов применялись природные и синтетические оксиды и минералы (ASTIMEX Scientific Limited). Для калибровки главных элементов использовался алмадин — стандарт, наиболее близкий по составу исследуемым образцам. Зональность граната выявлялась по элементным картам и количественным определениям концентраций главных и второстепенных элементов (табл. 1) по профилям для пяти зерен граната (633 анализа), а также по анализам граната в центральной и краевой частях для 6 зерен.

Содержания элементов-примесей и H<sub>2</sub>O в стеклах расплавных включений определялись методом вторично-ионной масс-спектрометрии (SIMS) на ионном микроанализаторе IMS-4f в Институте микроэлектроники РАН (г. Ярославль) по методике А.В. Соболева [Соболев, 1996].

Таблица 1. Химический состав (мас. %) и магниальность некоторых зерен граната

Компонент	1		3			5		6		7		8	
	центр	край	край	центр	край	центр	край	центр	край	центр	край	центр	край
SiO <sub>2</sub>	38.92	38.2	39.13	39.21	39.38	38.81	39.32	39.98	39.24	39.29	39.63	38.99	38.38
TiO <sub>2</sub>	0.10	0.11	0.12	0.09	0.12	0.14	0.13	0.12	0.16	0.08	0.15	0.12	0.09
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22.65	23.01	22.76	23.10	23.22	22.90	23.05	22.70	22.83	22.37	22.67	22.09	21.77
FeO <sub>общ</sub>	21.93	19.78	20.21	21.77	21.43	20.33	19.95	20.73	20.48	21.07	20.06	21.32	20.83
MnO	0.39	0.35	0.37	0.40	0.39	0.38	0.37	Не ан.	Не ан.	Не ан.	Не ан.	0.44	0.46
MgO	10.72	8.78	9.11	10.45	10.11	9.30	9.14	9.24	9.29	9.53	7.51	9.80	8.97
CaO	4.87	8.93	8.39	5.58	6.23	7.94	8.53	7.69	8.42	7.71	10.89	7.79	8.94
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02	0.05	0.07	0.03	0.05	0.09	0.10	Не ан.	Не ан.	Не ан.	Не ан.	Не ан.	Не ан.
Сумма	99.62	99.25	100.15	100.61	100.93	99.88	100.59	100.47	100.41	100.12	100.96	100.59	99.47
Mg#	46.56	44.16	44.53	46.09	45.67	44.90	44.93	44.27	44.70	44.63	40.01	45.03	43.42

Примечание. Зерна 1 и 3 имеют поперечный размер 3 мм, их профили приведены на рис. 4; размер зерен 5 и 6 — 1 мм. Здесь и далее: Не ан. — не анализировалось. Магниальность — Mg# = mol MgO/(MgO + FeO).



Высокотемпературные исследования расплавных включений в безжелезистых минералах проводились при 1 атм в микротермокамере с силовым нагревателем в воздушной среде [Базарова и др., 1975], а в гранате и клинопироксене — в термокамере с инертной средой конструкции Соболева—Слуцкого [Соболев, Слуцкий, 1984]. Низкотемпературное изучение флюидных включений и флюидных обособлений в расплавных включениях выполнено на криокамере с точностью измерений  $\pm 0.3^\circ\text{C}$  [Базарова и др., 1975]. КР-спектроскопические микроанализы флюидных включений выполнены на одноканальном Раман-спектрометре RAMANOR U-1000 фирмы Jobin Yvon с использованием аргонового лазера в ИГМ СО РАН.

### МИНЕРАЛОГО-ПЕТРОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СКАПОЛИТСОДЕРЖАЩЕГО ГРАНУЛИТА

Ксенолит скаполитсодержащего гранулита (обр. 1324 из коллекции Э.А. Дмитриева) представляет собой мелкосреднезернистую породу пятнистой текстуры, в которой лейкократовые участки хаотически распределены среди агрегатов меланократовых минералов. Распределение лейкократовых минералов неравномерное: от 20 до 70 % в разных частях ксенолита. Порода состоит из граната, клинопироксена, К-содержащего плагиоклаза, скаполита, сфена, кварца, калиевого полевого шпата, незначительных ко-

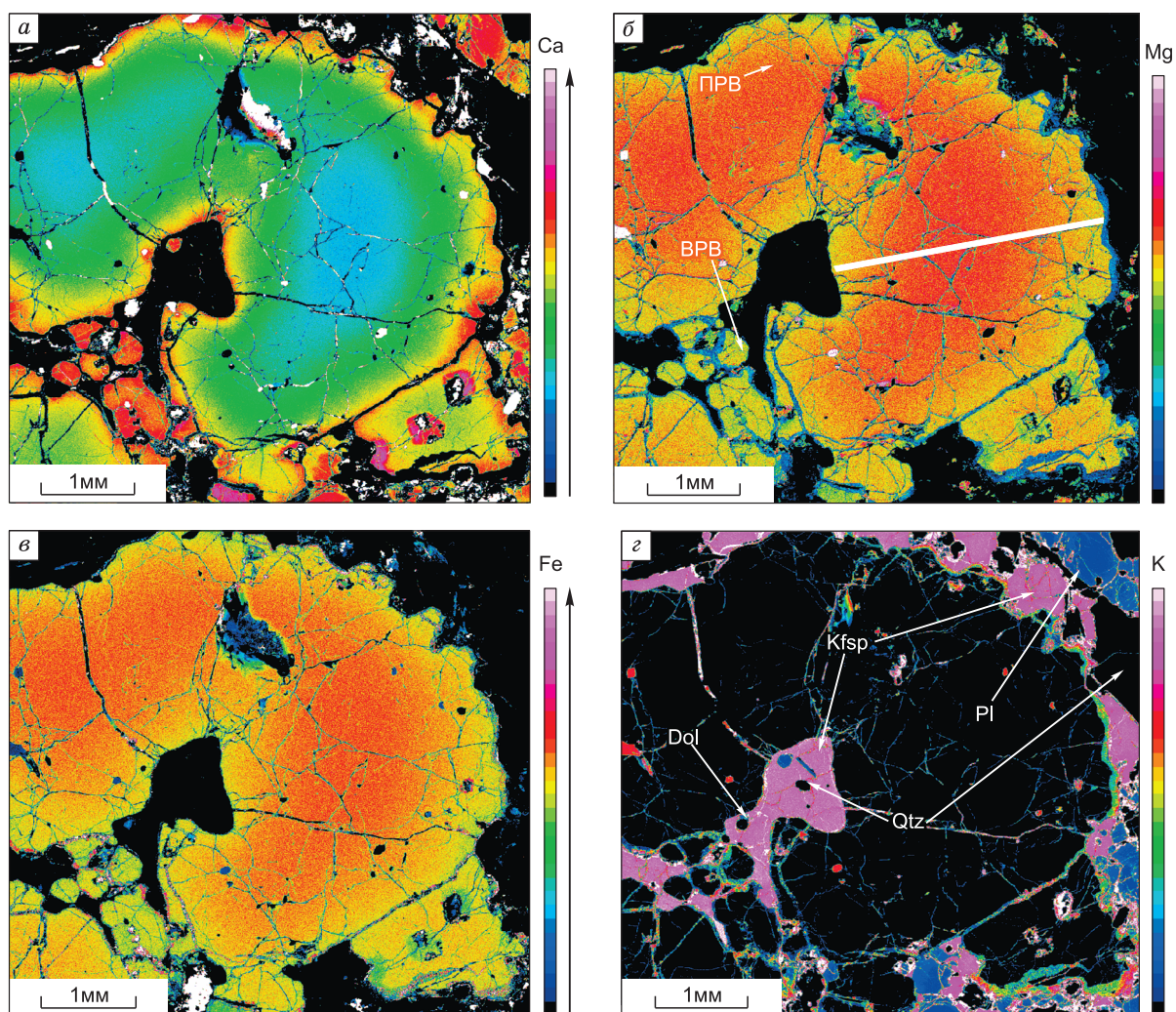


Рис. 2. Элементные карты зерна граната.

Зерно граната корродировано и растрескано. Участок коррозии в центральной части зерна сложен калишпатом (с примесью Na), внутри которого находятся мелкие зерна кварца, К-плагиоклаза и доломита. Белой линией обозначено положение линии профиля, а стрелками — положение первичных (ПРВ) и первично-вторичных (ВРВ) высокобарических расплавных включений в гранате (б). Первичные расплавные включения содержат также в калишпате и кварце из окружения зерна граната (д). Здесь и далее: Grt — гранат, Zrn — циркон, Ap — апатит, Сpx — клинопироксен, Sphen — сфен, Pl — плагиоклаз, Scap — скаполит, Qtz — кварц, Kfsp — калиевый полевой шпат, Dol — доломит.



Химический состав (мас. %) клинопироксенов

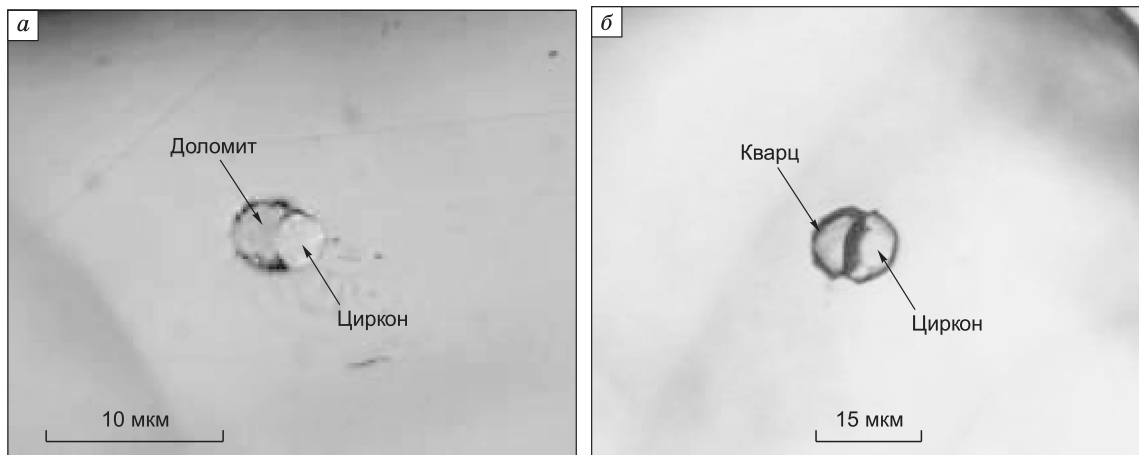
Компонент	2		3		5	7	9	10	13	14	16	17	18	19	20	21	22	23
	центр	край	центр	край	центр	центр	центр	центр	центр	край	край	центр	центр	центр	центр	центр	центр	край
SiO <sub>2</sub>	50.94	51.03	50.37	50.72	50.66	49.90	51.21	51.22	49.96	50.38	50.01	50.35	51.12	49.53	49.72	51.54	49.83	49.87
TiO <sub>2</sub>	0.47	0.54	0.45	0.56	0.45	0.55	0.48	0.43	0.34	0.46	0.58	0.49	0.55	0.38	0.40	0.39	0.53	0.42
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.67	6.02	6.18	6.16	5.70	5.75	6.08	5.55	5.43	5.73	6.07	5.58	6.23	5.32	5.25	5.71	6.28	5.56
FeO <sub>общ.</sub>	9.15	8.18	8.90	7.95	9.39	9.57	8.48	9.90	10.96	9.92	8.79	9.75	8.33	10.56	10.56	9.84	8.03	10.26
MnO	He ан.	He ан.	He ан.	He ан.	0.13	0.14	0.10	0.11	0.15	0.10	0.12	0.12	0.12	0.13	0.12	0.12	0.09	0.12
MgO	10.57	11.16	10.44	11.17	10.59	10.91	11.21	10.56	10.80	11.48	10.89	10.56	11.36	10.51	10.53	10.75	11.78	10.91
CaO	21.15	20.97	20.88	21.01	20.95	21.64	21.33	21.61	21.21	21.19	21.36	21.30	21.02	21.45	21.52	21.52	21.37	21.20
Na <sub>2</sub> O	0.85	0.99	0.90	0.99	0.88	0.87	0.89	0.88	1.04	1.00	0.92	0.95	0.97	0.93	0.94	0.95	1.00	1.00
K <sub>2</sub> O	0.01	0.03	0.00	0.03	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Сумма	98.80	98.92	98.12	98.59	98.74	99.35	99.78	100.27	99.90	100.26	98.74	99.10	99.71	98.81	99.04	100.82	98.91	99.34

личеств карбоната, графита, биотита, рудных фаз и аксессуарных минералов (апатита, рутила, циркона). Первичный высококальциевый скаполит и сфен присутствуют в породообразующих количествах (около 15 и 5 % соответственно). В меланократовых участках гранат преобладает над клинопироксеном. Участки, обогащенные лейкократовыми минералами, содержат гранат при отсутствии пироксена.

**Гранат** (состав: альмандин<sub>41—44</sub>, пироп<sub>25—39</sub>, гроссуляр<sub>17—29</sub>, спессартин<sub><1</sub>; Mg#<sub>36—47</sub>) образует изометричные зерна размером до 5 мм. Многие зерна, особенно в лейкократовых участках, сильно корродированы и растресканы (рис. 2). По краям зерен и по некоторым трещинкам развиваются реакционные келифитовые каймы. В гранате встречаются микрзерна рутила, циркона, апатита, рудного минерала, кварца ранней генерации, доломита (рис. 3) и, очень редко, биотита, что свидетельствует о присутствии этих минералов в породе при кристаллизации граната. Центральные части крупных зерен граната (размером 3.0—3.5 мм) имеют близкие составы, а составы краевых частей незначительно варьируют, особенно по содержанию CaO (см. табл. 1). Анализ элементных карт и профилей для 5 зерен граната показал, что они имеют одинаковую зональность: от центра зерна к краю увеличивается содержание CaO и Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, при этом уменьшаются концентрации FeO, MgO и MnO; также уменьшается и магнезиальность граната (см. табл. 1, рис. 2, 4). Некоторые зерна имеют четко выраженную зональность одного края и практически незональный другой край (см. табл. 1, рис. 4, б). Такая зональность может появиться как при тепловом и флюидном воздействии вмещающих щелочных базальтов на ксенолиты гранулитов в каналах трубок взрыва, так и до захвата ксенолитов фергуситовой магмой. Ранее было показано, что для первого случая процесс захвата ксенолита фергуситовой магмой и их транспорт к поверхности был скоротечным, и масштабы изменения состава граната из ксенолитов эклогитов и гранулитов могли составлять первые микрометры [Hacker et al., 2005] или достигать 0.1 от диаметра зерна [Дмитриев и др., 1985]. В изученных нами зернах состав граната изменяется иногда до центра крупных зерен (см. рис. 2). Эти данные позволяют предполагать образование такой зональности в гранате до захвата ксенолита щелочным базальтом.

**Клинопироксен** представлен субэвгдральными короткостолбчатыми и ксеноморфными зернами размером до 1 мм. Зерна пироксена (как и граната) в разной степени корродированы. По трещинкам и вокруг зерен он замещается бурым агрегатом. Пироксен содержит мелкие зерна кварца и кальцита. По составу клинопироксен можно отнести к салиту с небольшим содержанием жадеитового (6—8 %) и чермакитового миналов. В некоторых зернах клинопироксена отмечается небольшое повышение содержания Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и жадеитового минала (от 6.4 до 7.4 %) от центра к краевым частям зерен (табл. 2, зерно 2). Это можно интерпретировать как кристаллизацию пироксена в условиях повышающегося давления [Ghent, Stout, 1988].

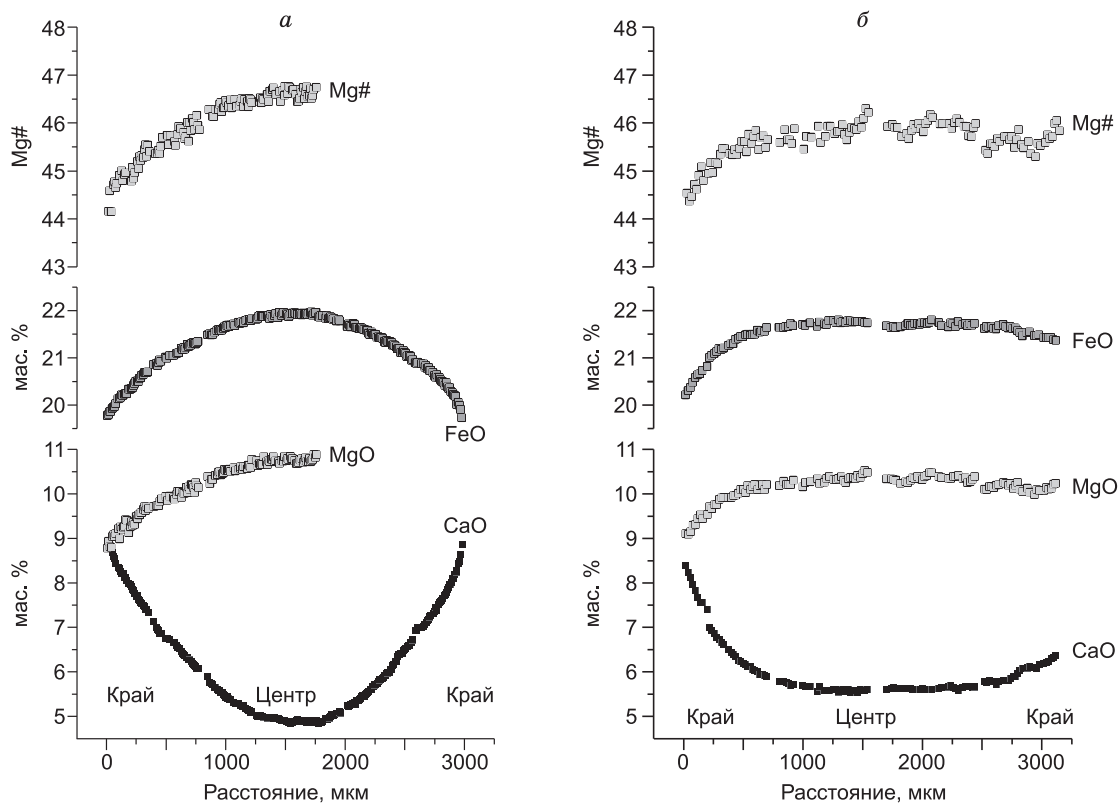
**Сфен** представлен ксеноморфными или изометричными зернами, приуроченными, как правило, к кристаллам граната и клинопироксена. Он содержит мелкие зерна рутила, кварца и плагиоклаза. Можно отметить повышенное содержание Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в сфене — до 5.2 мас. % (табл. 3).



**Рис. 3. Микрзерна доломита и циркона (а), кварца и циркона (б) в гранате.**

Фотографии сделаны в отраженном (а) и проходящем (б) свете.

**Плаггиоклаз, скаполит, калиевый полевой шпат и кварц поздней генерации** встречаются в виде мелких ксеноморфных зерен в меланократовых частях породы. В лейкократовых участках зерна этих минералов более крупные (до 2 мм), кристаллы плаггиоклаза являются субэвгдральными. Для плаггиоклаза типично полисинтетическое двойникование. Зерна скаполита и ксеноморфного кварца заполняют пространство между зернами плаггиоклаза. Иногда встречаются мелкие псевдографические вросстки кварца в скаполите. В краевых частях зерен скаполита часто присутствуют многочисленные микрзерна графита. Зерна скаполита по краям часто изменены в серый тонкокристаллический агрегат.



**Рис. 4. Элементные профили крупных зерен граната.**

а — профиль зерна 1, изображенного на рис. 2; б — профиль зерна 3.

Таблица 3. Химический состав (мас. %) сфена, биотита и аксессуарных минералов

Минерал		SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	MnO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ZrO <sub>2</sub>	Cl	Сумма
Апатит	(Scap)	0.32	0.00	0.00	0.46	0.14	He ан.	51.59	0.15	0.00	40.08	He ан.	1.37	94.11
		0.62	0.04	0.00	0.35	0.12	»	51.69	0.10	0.06	40.53	»	0.87	94.37
	(Grt)	0.14	0.01	0.00	0.53	0.27	0.03	53.37	0.08	0.00	39.98	0.06	0.48	94.95
	»	0.14	0.03	0.00	1.09	0.32	0.07	52.59	0.06	0.00	39.81	0.14	0.57	94.83
	»	0.16	0.01	0.00	0.44	0.24	0.02	51.81	0.12	0.01	39.80	He ан.	0.41	93.03
	»	0.25	0.04	0.00	0.30	0.16	0.03	52.42	0.08	0.00	40.21	»	0.43	93.93
Сфен		29.26	35.31	3.38	0.59	0.12	He ан.	26.06	0.08	0.00	0.65	He ан.	0.01	95.46
		29.10	34.16	4.31	0.60	0.13	»	26.39	0.08	0.01	0.45	»	0.01	95.24
		29.40	34.76	4.12	0.66	0.17	»	26.70	0.05	0.00	0.40	»	0.00	96.27
		30.27	33.88	4.85	0.57	0.13	»	26.61	0.05	0.00	0.36	»	0.00	96.71
		28.69	35.05	4.17	0.68	0.13	0.06	26.44	0.03	0.00	0.23	0.10	0.00	95.59
		29.51	34.35	3.86	0.55	0.11	0.04	26.12	0.03	0.00	0.28	0.20	0.00	95.05
		29.38	33.59	5.20	0.57	0.14	0.01	26.49	0.04	0.02	0.53	He ан.	0.00	95.97
Циркон	(Grt)	30.34	0.06	0.00	0.81	0.01	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	65.76	0.00	97.00
	»	30.19	0.03	0.00	0.92	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	64.50	0.00	95.67
	»	30.16	0.03	0.09	1.24	0.08	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	64.71	0.00	96.31
	»	30.11	0.02	0.00	0.96	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	64.61	0.00	95.74
Рутил	(Grt)	0.93	97.71	0.18	0.13	0.01	0.00	2.11	0.04	0.00	0.00	0.19	0.00	101.30
	»	0.02	98.81	0.03	0.48	0.03	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.46	0.00	99.84
	(Sphen)	0.93	97.71	0.18	0.13	0.01	0.00	2.11	0.04	0.00	0.00	0.19	0.00	101.30
Биотит		37.45	5.70	14.28	10.95	14.67	0.03	0.00	0.21	9.71	0.00	0.00	0.09	93.09
		37.04	5.31	13.88	12.25	15.24	0.07	0.00	0.35	9.48	0.00	0.01	0.13	93.77
Карбо- наты	(Grt)	0.60	0.01	0.37	7.03	16.85	0.22	32.91	0.10	0.00	0.04	0.00	0.00	58.13
	(Cpx)	0.11	0.00	0.00	10.50	0.81	He ан.	41.06	0.00	0.03	0.10	He ан.	0.01	52.62

Примечание. В случае, когда апатит, циркон, рутил и карбонат являются включениями, в скобках указан вмещающий минерал.

Ксеноморфные зерна калиевого полевого шпата с содержанием Na<sub>2</sub>O до 3.3 мас. % (табл. 4), как правило, приурочены к зернам граната.

Плаггиоклаз содержит до 1.5 мас. % калия и может быть отнесен к тройному полевому шпату состава Ab<sub>38-49</sub>, An<sub>43-52</sub>, Or<sub>6-9</sub> (табл. 5). В нем иногда наблюдается повышение содержания анортитового компонента от центра к краю зерен (см. табл. 5, зерно 3). Следует отметить, что состав мелких зерен плаггиоклаза в сфене близок к составу краевых частей некоторых более крупных зерен плаггиоклаза, что предполагает кристаллизацию сфена на поздней стадии кристаллизации плаггиоклаза.

Высококальциевый **скаполит** (67—69 % мейонитового минала) содержит до 0.92 мас. % Cl (табл. 6). Зерна скаполита не имеют зональности.

Высокотитанистый **биотит** (см. табл. 3) образует лейсты по трещинкам в гранате или вблизи его зерен. Микровключение биотита пластинчатой формы оптически диагностировано в центральной части одного зерна граната, окруженного мелкими зернами клинопироксена.

**Карбонаты** встречаются как в виде микровключений в гранате и клинопироксене, так и в межзерновом пространстве этих минералов. Включения в

Таблица 4. Химический состав (мас. %) калиевых полевых шпатов

Компонент	1	2	3	4	5	6
			(Pl)		(Sphen)	
SiO <sub>2</sub>	63.44	62.96	62.39	63.06	63.93	62.52
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.64	19.21	18.49	19.5	17.39	19.18
FeO	0	0.01	0.14	0.34	0.28	0.07
MgO	0	0.01	0	0.01	0.08	0.05
CaO	0.7	0.91	0.88	0.21	0.74	0.87
Na <sub>2</sub> O	2.05	2.15	3.28	0.35	0.62	2.46
K <sub>2</sub> O	12.59	12.16	11.11	15.5	14.48	12.03
BaO	He ан.	He ан.	He ан.	He ан.	0.44	He ан.
Сумма	97.42	97.41	96.29	98.97	98.4	97.18

Примечание. В скобках указан вмещающий минерал. 1—6 — № зерна.



Таблица 5. Химический состав (мас. %) плагиоклазов

Компонент	1		3		8	12
	центр	центр	край	(Sphen)	центр	
SiO <sub>2</sub>	55.81	57.61	55.63	54.29	58.22	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	28.28	26.72	27.03	26.72	26.74	
FeO	0.06	0.09	1.51	0.1	0.07	
MgO	0.02	0.01	0.58	0.01	0.02	
CaO	10.09	8.74	9.39	10.77	9.02	
Na <sub>2</sub> O	5.19	5.06	3.9	4.62	5.45	
K <sub>2</sub> O	1.11	1.29	1.49	1.21	1.42	
SrO	0.05	0.27	0.18	0.03	Не ан.	
BaO	0.03	0.12	0.23	0.11	»	
Сумма	100.64	99.91	99.94	97.86	100.94	
Ab	45.1	47.1	38.7	40.6	47.9	
An	48.5	45	51.5	52.4	43.8	
Or	6.4	7.9	9.7	7	8.2	

Примечание. В скобках указан вмещающий минерал.

включения кварца, биотита и карбонатов в гранате (см. рис. 3) и клинопироксене являются, по-видимому, минералами реакционных преобразований протолита до стадии плавления. Судя по облику некоторых микрокристалликов кварца, иногда имеющих форму гексагональных бипирамидок высокотемпературной модификации, более вероятным представляется их образование как избыточная фаза реакционных преобразований протолита.

### МИНЕРАЛОГИЧЕСКАЯ ТЕРМОБАРОМЕТРИЯ

Для оценки температур и давлений образования скаполитсодержащего гранулита использовались гранат-клинопироксеновый геотермометр [Powell, 1985] и гранат-клинопироксен-плагиоклаз-кварцевый геобарометр [Perkins, Newton, 1981; Eckert et al., 1991]. Применение минералогической термобарометрии для этой породы предполагает некоторые допущения. Обширные реакционные каймы в местах контакта различных минералов затрудняют оценку равновесности минералов. Для расчетов температур и давлений использовались анализы минералов, расположенных в образце как можно ближе друг к другу. Исходя из наблюдаемых в породе взаимоотношений между минералами, пироксен начинал кристаллизо-

в гранате представлены доломитом (с содержанием FeO до 7 мас. %), а в клинопироксене — кальцитом (с содержанием FeO до 10 мас. %, см. табл. 3).

Многочисленные чешуйки (размером до 2 мм) **графита** обычно приурочены к зернам кварца поздней генерации и отмечаются в виде мелких включений в скаполите.

**Акцессорные апатит, рутил и циркон** встречаются в интерстициях породообразующих минералов, а также в виде мелких включений в гранате и клинопироксене. В поздней генерации апатита, приуроченного к зернам скаполита, отмечается более высокое содержание Cl по сравнению с составом включений апатита в гранате (см. табл. 3).

Исходя из взаимоотношений породообразующих минералов представляется следующая последовательность их кристаллизации: гранат + кварц + К-плагиоклаз → гранат + клинопироксен + К-плагиоклаз + кварц → сфен + К-плагиоклаз → скаполит + кварц → кварц + калиевый полевой шпат. Мелкие

Таблица 6.

Химический состав (мас. %) скаполитов

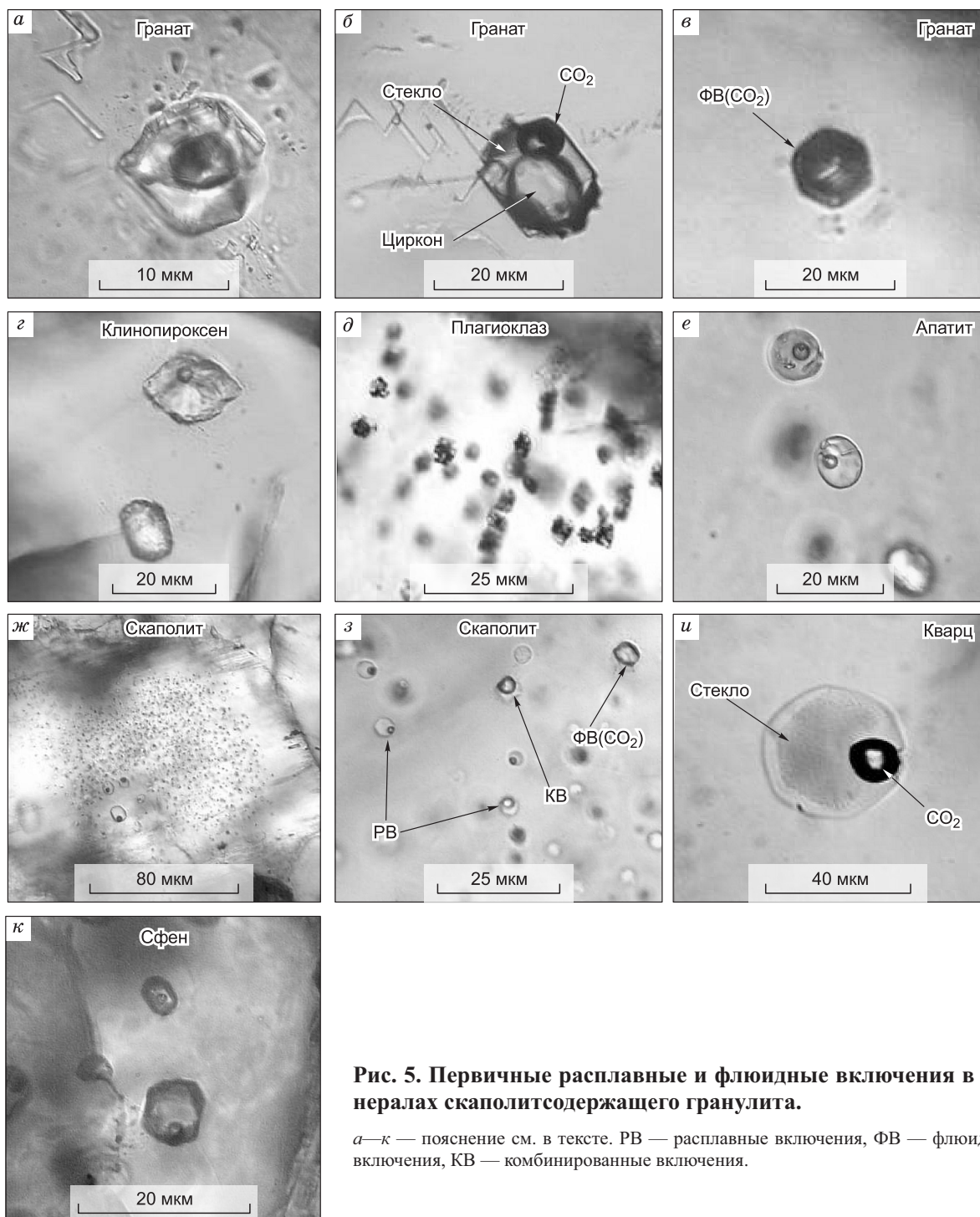
Компонент	1		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	центр	край											
SiO <sub>2</sub>	46.8	46.69	48.16	49.76	49.12	48.39	47.52	47.02	47.21	47.22	48.32	47.34	47.36
TiO <sub>2</sub>	0.00	0.05	0.03	0.04	0.02	0.01	0.04	0.05	0.02	0.02	0.03	0.00	0.03
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24.71	25.93	27.17	26.8	27.61	26.09	26.04	25.76	24.85	26.54	26.31	26.02	25.59
FeO	0.37	0.47	0.28	0.42	0.31	0.25	0.33	0.36	0.33	0.28	0.34	0.28	0.17
MgO	0.12	0.13	0.14	0.13	0.13	0.13	0.14	0.11	0.12	0.12	0.12	0.12	0.10
MnO	Не ан.	Не ан.	Не ан.	Не ан.	Не ан.	Не ан.	Не ан.	Не ан.	Не ан.	0.05	0.02	0.04	0.01
CaO	15.66	15.81	15.78	15.53	15.41	15.33	15.81	15.45	15.97	16.38	16.21	16.08	16.10
Na <sub>2</sub> O	3.20	3.25	3.46	3.13	3.28	3.2	3.07	3.05	3.19	3.03	3.04	2.98	2.76
K <sub>2</sub> O	1.10	1.03	1.28	1.48	1.20	1.09	1.07	1.16	1.15	1.05	1.02	1.05	0.95
SrO	0.14	0.27	0.18	0.16	0.15	0.23	0.22	0.31	0.22	Не ан.	Не ан.	Не ан.	Не ан.
BaO	0.11	0.10	0.05	0.04	0.07	0.15	0.11	0.11	0.06	»	»	»	»
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.09	0.10	0.08	0.05	0.09	0.08	0.05	0.10	0.09	0.07	0.07	0.06	0.06
Cl	0.85	0.89	0.91	0.92	0.92	0.85	0.83	0.83	0.86	0.71	0.74	0.73	0.77
Сумма	93.15	94.71	97.52	98.46	98.31	95.8	95.24	94.32	94.09	95.5	96.28	94.74	93.92

ваться на поздних стадиях кристаллизации граната. Поэтому в расчетах использовались анализы краевых частей неизмененного граната и центральных частей клинопироксена, а также анализы центральных частей плагиоклаза.

Для изученного скаполитсодержащего гранулита средняя расчетная температура равна  $1020 (\pm 50) ^\circ\text{C}$ , а давление —  $15 (\pm 1)$  кбар.

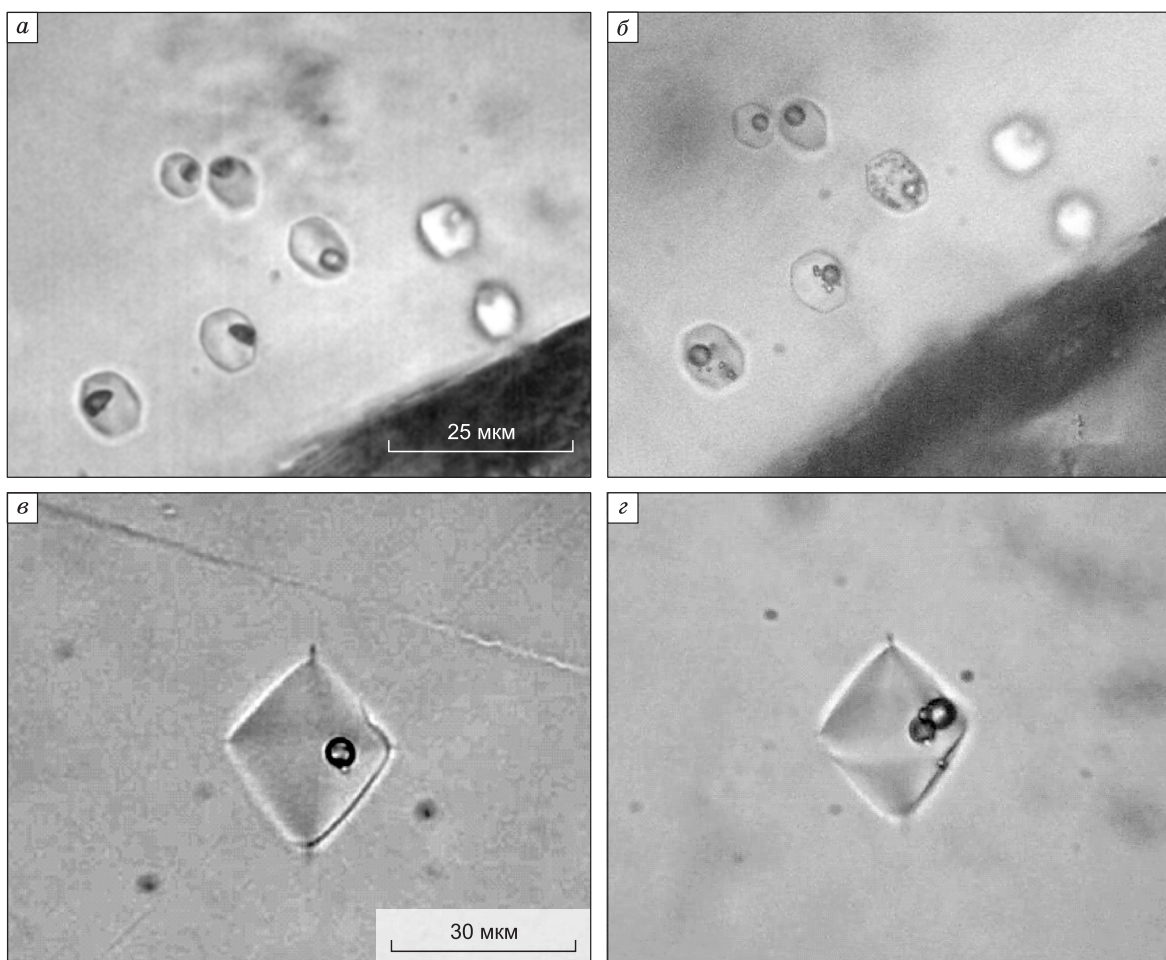
### РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ ПЕРВИЧНЫХ РАСПЛАВНЫХ И ФЛЮИДНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ

Первичные расплавные включения содержатся во всех породообразующих и акцессорных минералах из обр. 1324 (рис. 5). Такие включения впервые обнаружены в скаполите [Churin et al., 2003; Чупин и др., 2006]. Они имеют азональное распределение, что предполагает их первичный генезис [Ба-



**Рис. 5. Первичные расплавные и флюидные включения в минералах скаполитсодержащего гранулита.**

а–к — пояснение см. в тексте. РВ — расплавные включения, ФВ — флюидные включения, КВ — комбинированные включения.



**Рис. 6. Выделение дополнительных пузырьков плотной  $\text{CO}_2$  при нагреве расплавных включений в скаполите (а, б) и кварце (в, з).**

а, в — до нагрева; б, з — после нагрева до 850 °С.

зарова и др., 1975; Ермаков, Долгов, 1979; Реддер, 1987]. В центральных частях зерен скаполита содержатся группы многочисленных включений, а краевые части этих зерен обычно свободны от них (см. рис. 5, жс). В других минералах расплавные включения встречаются реже. Следует отметить, что в кварце расплавные включения выявлены только в ксеноморфных зернах поздней генерации этого минерала. Размер включений обычно 5—15 мкм, а в кварце и сфене они иногда достигают 40—60 мкм. Практически все включения в гранате частично декрепитированы с образованием мелких расплавных включений по спиралевидным трещинкам вокруг первичных крупных вакуолей (см. рис. 5, а). Включения в скаполите, клинопироксене, сфене, кварце и других минералах обычно герметичные. Включения в кварце имеют отрицательную форму его высокотемпературной модификации (см. рис. 5, и), что позволяет оценить минимальную температуру кристаллизации кварца. Высокотемпературная модификация кварца при давлении 15 кбар устойчива при температуре выше 940°С [Cohen, Klement, 1967].

Фазовый состав расплавных включений во всех минералах следующий: стекло + флюидная фаза ± один или два дочерних микрокристаллика. Флюидная фаза при 20°С состоит из жидкости и газового пузырька, который исчезает при незначительном повышении температуры. В гранате встречаются комбинированные включения расплава с микрозернами кварца и циркона (см. рис. 5, б), а в скаполите — расплава и графита.

При нагреве в обычных термокамерах (при 1 атм) в герметичных расплавных включениях при температуре около 800°С появляются дополнительные пузырьки, которые, по данным криометрических исследований, являются плотной  $\text{CO}_2$  (рис. 6), что свидетельствует о высоких давлениях при захвате включений [Churin, Tomilenko, 1995]. При температурах 1000—1020°С происходит полное плавление дочерних кристаллических фаз и незначительное уменьшение флюидных пузырьков, однако включения



Таблица 7.

**Химический состав (мас. %) стекол расплавных включений  
в минералах скаполитсодержащего гранулита**

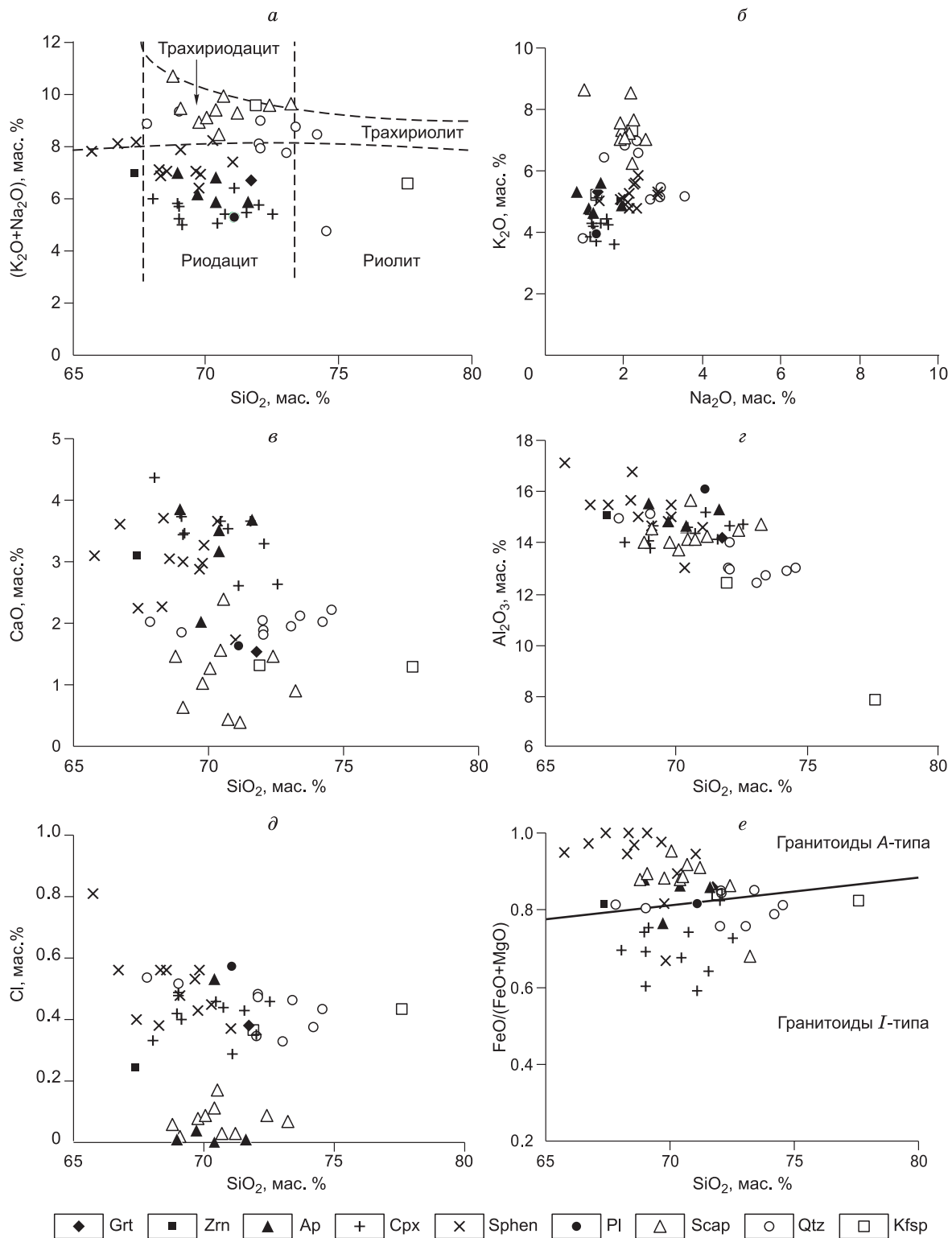
№ анализа	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	MnO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cl	Сумма	A/CNK	T, °C
<b>Гранат</b>														
1	71.75	0.09	14.17	1.35	0.22	0.05	1.53	1.34	5.34	0.00	0.38	96.22	1.32	Негетое
<b>Циркон</b>														
2***	67.41	0.36	15.02	4.53	1.05	0.05	3.07	1.94	4.98	Не ан.	0.24	98.65	1.06	»
<b>Апатит</b>														
3**	69.71	0.21	14.85	2.69	0.82	0.03	2.02	0.82	5.33	0.18	0.04	96.71	1.38	»
4	71.62	0.28	15.30	1.57	0.26	0.03	3.69	1.10	4.76	0.14	0.01	98.77	1.12	1020
5	70.38	0.28	14.63	1.75	0.28	0.02	3.51	1.24	4.64	0.14	0.00	96.88	1.09	1020
6	68.97	0.26	15.56	1.77	0.24	0.02	3.86	1.40	5.62	0.14	0.01	97.85	1.01	1020
7	70.40	0.21	14.65	1.73	0.27	0.01	3.17	1.94	4.89	0.13	0.53	97.92	1.03	Негетое
<b>Клинопироксен</b>														
8*	70.44	0.25	14.62	2.00	0.95	0.03	3.66	1.30	3.73	0.05	0.46	97.48	1.14	1020
9	68.02	0.22	14.00	2.22	0.97	0.04	4.37	1.56	4.45	0.03	0.33	96.21	0.91	1020
10*	72.03	0.24	14.68	1.92	0.41	0.02	3.29	1.15	4.59	0.03	0.35	98.69	1.14	1020
11	71.10	0.15	15.18	1.39	0.96	0.03	2.62	1.30	5.13	0.02	0.29	98.18	1.22	1020
12*	69.12	0.18	14.67	1.92	0.62	0.03	3.47	1.15	3.85	0.02	0.40	95.42	1.19	1020
13	69.04	0.16	14.49	1.72	0.77	0.04	3.44	1.27	3.98	0.04	0.48	95.44	1.15	1020
14	68.96	0.16	14.05	2.11	0.73	0.04	3.79	1.59	4.26	Не ан.	0.42	96.11	1.00	1020
15*	70.72	0.17	14.35	1.89	0.66	0.04	3.54	1.77	3.62	»	0.44	97.19	1.08	1020
16*	72.55	0.10	14.75	0.59	0.22	0.04	2.64	1.21	4.19	»	0.46	96.72	1.30	1120
17	71.58	0.14	14.13	0.81	0.45	0.03	3.66	1.19	4.28	0.03	0.43	96.73	1.07	1120
18	69.02	0.13	13.78	1.16	0.77	0.05	3.74	1.40	4.28	0.04	0.49	94.84	1.00	Негетое
<b>Сфен</b>														
19*	69.82	0.44	15.00	0.64	0.32	0.03	3.27	1.90	5.07	0.06	0.56	97.10	1.03	1020
20	69.79	0.32	15.46	1.42	0.32	0.01	2.97	1.37	5.03	0.07	0.43	97.18	1.18	1020
21 (n = 10)	68.51	0.28	15.26	0.64	0.04	0.05	2.93	2.33	5.25	0.06	0.51	95.81	1.04	Негетое
<b>Плагиоклаз</b>														
22*	71.17	0.41	16.05	1.74	0.40	0.02	1.61	1.34	3.91	0.07	0.57	97.27	1.72	1100
<b>Скаполит</b>														
23	70.42	0.25	14.14	0.80	0.11	0.01	1.56	2.15	7.24	0.02	0.11	96.81	1.00	1020
24	68.80	0.26	14.03	0.81	0.11	0.02	1.46	2.18	8.52	0.00	0.06	96.26	0.91	1020
25	73.20	0.80	14.50	0.30	0.50	0.0	0.10	1.00	8.65	0.06	0.07	99.61	1.17	1020
26	70.54	0.28	15.64	0.85	0.11	0.02	2.40	2.21	6.26	0.04	0.17	98.51	1.06	1020
27	72.39	0.28	14.47	1.14	0.18	0.03	1.46	2.55	7.03	0.02	0.09	99.63	1.00	1020
28 (n = 5)	70.15	0.29	14.15	1.10	0.11	н.а.	0.75	2.01	7.33	0.02	0.05	95.97	1.13	Негетое
<b>Кварц</b>														
29*	74.26	0.20	12.83	0.73	0.20	0.02	2.01	2.98	5.43	0.06	0.37	99.08	0.89	1020
30	73.13	0.31	12.39	0.73	0.24	0.03	1.92	2.70	5.03	0.02	0.32	96.82	0.93	1020
31*	72.06	0.35	12.97	0.71	0.23	0.04	2.02	2.96	5.09	0.05	0.34	96.82	0.92	1020
32	73.47	0.23	12.69	1.01	0.18	0.02	2.09	3.58	5.12	0.05	0.46	98.89	0.83	1080
33 (n = 4)	70.29	0.27	14.22	1.63	0.36	н.а.	1.87	2.09	6.65	0.04	0.50	97.90	1.02	Негетое
<b>Калиевый полевой шпат</b>														
34*	71.97	0.27	12.40	1.69	0.33	0.02	1.29	2.26	7.25	0.01	0.36	97.82	0.89	1080
35	77.63	0.37	7.79	1.37	0.30	0.01	1.26	1.34	5.18	0.04	0.43	95.72	0.77	1100

Примечание. В скобках указано количество включений (n), для которых рассчитаны средние значения их анализа; A/CNK = mol Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / (CaO + Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O).

\* Среднее значение из двух анализов включения.

\*\* Включение в зерне апатита, захваченном гранатом.

\*\*\* Включение в зерне циркона в апатите, захваченном гранатом.

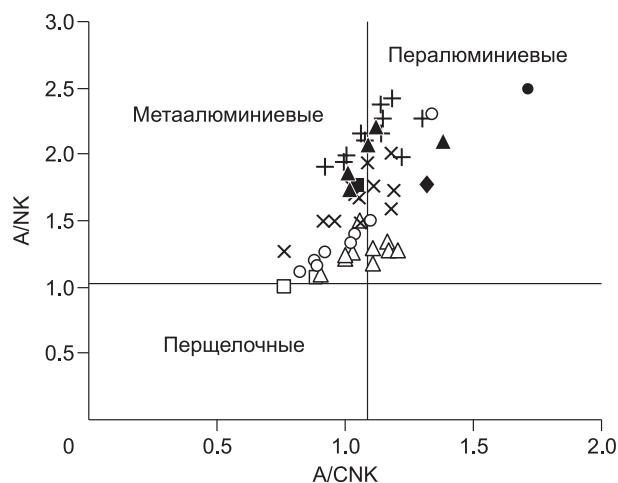


**Рис. 7. Вариации содержаний некоторых петрогенных компонентов (а, б, в, г), Cl (д) и железистости (е) в стеклах расплавных включений.**

е — линия разделяет поля гранитоидов А- и I-типов, по [Frost et al., 2001].

**Рис. 8. Диаграмма индексов A/CNK—A/NK для расплавов из включений в минералах скаполитсодержащего гранулита.**

Поля гранитоидов выделены по [Barbarin, 1999]. A/CNK — mol  $Al_2O_3/(CaO + Na_2O + K_2O)$ ; A/NK — mol  $Al_2O_3/(Na_2O + K_2O)$ . Усл. обозн. см. на рис. 7.



не гомогенизируются даже до 1200°C. Эта температура (1200°C) значительно выше температуры захвата включений из-за эластичного увеличения объема вакуолей включений при сбросе высокого внешнего давления с вмещающего минерала [Churpin, Tomilenko, 1995]. Согласно [Schiano, Clocchiatti, 1994; Szabo et al., 1996], за температуры захвата изученных нами расплавных включений приняты температуры плавления (1000—1020°C) дочерних ликвидусных кристаллических фаз, что согласуется со средними значениями температур (около 1020°C), полученных для этого гранулита по гранат-клинопироксеновому термометру.

В гранате и скаполите присутствуют первичные флюидные включения, сингенетичные расплавным включениям (см. рис. 5, в, з). Размер флюидных включений достигает 10—15 мкм. Большинство этих включений частично декрепитовано. При совместном захвате флюида и расплава в одной полости образуются комбинированные включения с аномально большими флюидными пузырьками (см. рис. 5, з).

Флюидная фаза расплавных включений и сопутствующие флюидные включения в гранате и скаполите исследованы криометрическим методом. После замораживания включений в криокамере до температур ниже тройной точки  $CO_2$ , оттаивание их содержимого происходит при  $-57.2...-57.9$  °C. Последние немного ниже температуры плавления чистой  $CO_2$ , которая равна  $-56.6$  °C [Варгафтик, 1972], что предполагает присутствие во флюидной фазе  $CO_2$  с незначительными примесями других компонентов. По данным КР-спектроскопических исследований флюидные включения содержат  $CO_2$  с примесью азота. Фаза воды оптически и криометрически в них не зафиксирована (газогидраты  $CO_2$  при охлаждении не образуются). Гомогенизация флюидных включений и флюидных обособлений в расплавных включениях происходит в жидкую фазу при 22—23 °C. Соответствующая этой температуре плотность углекислоты составляет около  $0.75$  г/см<sup>3</sup> [Варгафтик, 1972]. Учитывая частичную разгерметизацию включений, а также увеличение их объема при сбросе высокого внешнего давления, реальная плотность  $CO_2$  во включениях была значительно выше.

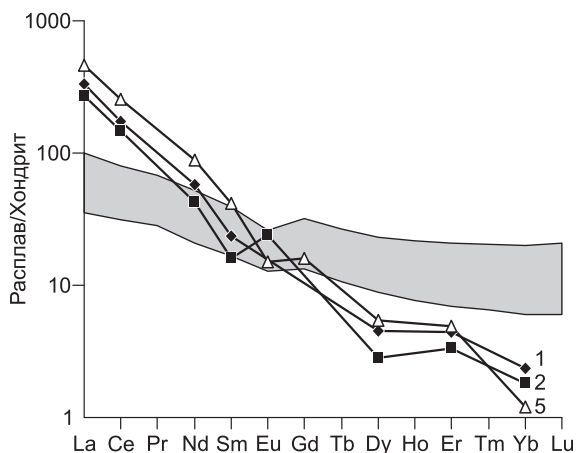
При 1000—1020°C (вероятные температуры захвата включений) давление флюида для включений  $CO_2$  с плотностью около  $0.75$  г/см<sup>3</sup> составляло около 4 кбар. Из-за вышеизложенных причин можно принять это давление как минимальное.

**Таблица 8. Содержание воды, редких и редкоземельных элементов в стеклах негретых расплавных включений в минералах скаполитсодержащего гранулита**

Компонент	1	2	3	4	5
Li, г/т	6.18	8.64	76.7	60.7	Не ан.
Be	4.80	4.71	6.33	5.74	»
B	16.1	10.8	3.78	17.1	»
F	Не ан.	Не ан.	1.25	3.27	»
Ti	1364	1065	89372	76860	1911
Cr	2.75	1.66	93.8	Не ан.	1.43
Sr	848	529	178	508	1658
Y	5.21	3.20	122	95.3	8.53
Zr	247	165	382	390	345
Nb	Не ан.	Не ан.	45.7	Не ан.	17.5
Va	»	»	134	»	2339
La	121	100	891	818	167
Ce	166	141	3457	3209	246
Nd	41	30.2	2296	2249	62.8
Sm	5.39	3.65	391	383	9.71
Eu	Не ан.	2.10	20.4	12.3	1.32
Gd	»	Не ан.	Не ан.	Не ан.	4.93
Dy	1.73	1.07	63.7	59.8	2.08
Er	1.10	0.83	15.8	15.2	1.23
Yb	0.58	0.44	19.4	18.2	0.30
Ta	Не ан.	Не ан.	Не ан.	Не ан.	0.94
Th	35	46.8	»	229	71.9
U	Не ан.	Не ан.	»	Не ан.	9.37
H <sub>2</sub> O, мас. %	1.62	0.82	4.09	1.67	Не ан.

Примечание. 1—5 — включения: 1, 2 — в кварце, 3, 4 — в сфене, 5 — в скаполите.





**Рис. 9.** Редкоземельные спектры для стекол негретых расплавных включений в кварце (1, 2) и скаполите (5) (см. табл. 8).

Серое поле — спектры распределения редкоземельных элементов для валового состава ксенолитов санидиновых эклогитов и метапелитового гранулита из тех же трубок взрыва Памира, по [Hacker et al., 2005]. Данные по хондриту взяты из работы [Sun, McDonough, 1989].

По данным микронзондовых анализов (табл. 7), составы стекол первичных расплавных включений во всех минералах изученного гранулита соответствуют кислым (от риодацитов до риолитов), существенно-калиевым расплавам нормальной и повышенной щелочности (рис. 7, а, б) [Петрографический кодекс..., 1995].

Негретые включения и включения, прогретые до температуры их захвата (около 1020°C), в пироксене, сфене и скаполите имеют очень близкие составы. Это означает, что из расплава включений практически не кристаллизовался минерал, родственный по составу вмещающему минералу. Для наиболее раннего граната не определены составы прогретых расплавных включений. Однако кислые, существенно-калиевые составы установлены для первичных расплавных включений в цирконе и апатите, которые располагались внутри зерен граната (см. табл. 7, анализы 2, 3). Это предполагает кристаллизацию граната также в присутствии подобных по составу кислых расплавов. Состав негретого расплавного включения в гранате (см. табл. 7, ан. 1) подтверждает это предположение и характеризует состав исходного расплава.

В целом можно отметить следующие тенденции изменения состава расплавов во включениях от ранних минералов (граната, пироксена, сфена и апатита) к более поздним (скаполиту, кварцу, калиевому полевоому шпату): повышается суммарное содержание щелочей и понижается содержание CaO (см. рис. 7, а, в); уменьшается глиноземистость расплавов (см. рис. 7, з) и по индексу глиноземистости A/CNK фиксируется переход от пералюминиевых к метאלюминиевым составам (рис. 8). Расплавам включений в минералах изученного гранулита свойствен высокий индекс железистости (FeO/FeO + MgO) (см. рис. 7, е). Часть включений обогащена железом, и их состав попадает в поле гранитоидов А-типа, по [Frost et al., 2001] (см. рис. 7, е, верхнее поле). Отметим также низкие содержания Cl в расплавных включениях в скаполите и в раннем апатите и повышенные содержания Cl (до 0.8 мас. %) во включениях в других минералах (см. табл. 7, рис. 7, д).

Содержание CO<sub>2</sub> в расплавных включениях в кварце рассчитывалось по методу объемного соотношения фаз [Наумов, 1979] с учетом CO<sub>2</sub>, растворенной в стекле включений, и составило 1.0 мас. %.

По данным ионно-микронзондового анализа (табл. 8), содержание воды в расплавных включениях в кварце и сфене составляет 1.6—0.8 и 4.1—1.7 мас. % соответственно. Расплавы включений в кварце и скаполите обогащены легкими РЗЭ и обеднены тяжелыми РЗЭ (рис. 9, см. табл. 8), а также имеют высокие отношения Th/U (от 7.7 до 9.4). Аномально высокие содержания редких и редкоземельных элементов во включениях в сфене обусловлены захватом вмещающего минерала при анализе. На спайдердиаграмме включение в скаполите демонстрирует небольшой Ta-Nb минимум.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Обнаруженные во всех минералах скаполитсодержащего гранулита первичные расплавные включения указывают на кристаллизацию этих минералов при участии расплавов или из расплавов. Состав включений соответствует кислым (от риодацитов до риолитов), существенно-калиевым расплавам нормальной и повышенной щелочности с высоким содержанием CO<sub>2</sub> и Cl. Причем кислые составы расплавов установлены как для включений в ранних минералах (гранате и клинопироксене), так и в позднем кварце. Включения в кварце и сфене имеют в целом низкие содержания воды (1—2 мас. %) и лишь для стекла одного включения в сфене установлено более высокое (4.1 мас. %) содержание воды. Возможно, это включение было захвачено ранней генерацией сфена. Расплавы включений в кварце и скаполите деплетированы в отношении тяжелых РЗЭ (см. рис. 9), что связано с ранней кристаллизацией граната. В целом кислые составы расплавных включений в минералах скаполитсодержащего гранулита близки к составам включений в минералах ксенолитов кианитовых гранулитов и эклогитоподобной породы (гранат-клинопироксен-плаггиоклазового гранулита) из этих же трубок взрыва [Чупин и др. 1993; Добрецов, Чупин, 1993; Chupin et al., 1997, 2001].

Температуры кристаллизации скаполитсодержащего гранулита, оцененные по расплавленным включениям и минералогическим термометрам, составляют около 1000 °С.

Давление флюида, исходя из плотности флюидных существенно углекислотных включений (сингенетичных расплавленным включениям), составляло около 4 кбар. Это значение сильно занижено в связи с частичной декрепитацией флюидных включений и/или эластичным увеличением их объема при сбросе высокого внешнего давления. Высокобарическая природа скаполитсодержащего гранулита подтверждается выделением из расплавов включений дополнительных пузырьков плотной  $\text{CO}_2$  при прогреве включений при 1 атм. Давление кристаллизации этой породы, оцененное по гранат-клинопироксен-плагиоклаз-кварцевому геобарометру, находится в интервале 14—16 кбар.

Как было показано при изучении расплавленных включений в минералах ксенолитов кианитовых гранулитов и эклогитоподобных пород из диатрем Памира, наиболее вероятным процессом образования этих пород являлось инконгруэнтное плавление в нижнекоровых условиях (при температуре около 1000 °С и давлении выше 12 кбар) [Chupin et al., 2001]. Этот вывод хорошо согласуется с результатами экспериментальных работ, моделирующих процессы минералообразования при похожих *PT* параметрах [Patiño Douce, Johnston, 1991; Wolf, Wyllie, 1993; Patiño Douce, Beard, 1995; Skjerlie, Johnston, 1996; Litvinovsky et al., 2000]. Кислые составы расплавленных включений в ранних минералах скаполитсодержащего гранулита и вышперечисленных гранулитов и эклогитоподобных пород, а также близкие *PT* параметры их кристаллизации предполагают одинаковый их генезис. Скаполитсодержащие гранулиты, вероятнее всего, также образовались в результате инконгруэнтного плавления в нижнекоровых условиях. Это плавление сопровождалось кристаллизацией в перитектике бедных Si и богатых Ca минералов (граната и клинопироксена) и кристаллизацией сфена, К-плагиоклаза и скаполита, которые в виде включений захватывали микропорции выплавляющихся кислых расплавов. Эти минералы кристаллизовались не из расплава, а в его присутствии. При повышении степени плавления расплавы приобретали некоторые черты сходства с кислыми магмами *A*-типа (повышенное содержание щелочей, легких РЗЭ, высокий индекс железистости, небольшой Ta-Nb минимум, высокие температуры генерации), что согласуется с данными [Clemens et al., 1986; Whalen et al., 1987; Litvinovsky et al., 2000] о возможном происхождении кислых магм *A*-типа в результате плавления кварц-полевошпатовых пород с Mg-Fe-содержащими минералами в условиях высокобарической гранулитовой фации.

Полученные результаты изучения расплавленных и сингенетичных флюидных включений позволяют выявить особенности флюидного режима плавления протолита и кристаллизации скаполитсодержащего гранулита. Наличие первичных существенно углекислотных и расплавленных включений в раннем гранате и скаполите указывает на кристаллизацию этих минералов в присутствии насыщенного  $\text{CO}_2$  расплава и свободного богатого  $\text{CO}_2$  флюида. Захват таких включений можно объяснить избытком флюида на ранних и промежуточных стадиях плавления. Судя по наличию воды, Cl и  $\text{CO}_2$  в расплаве включений, начиналось плавление в присутствии флюида, который первоначально имел, вероятно, сложный состав ( $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{хлориды}$ ). Из-за различия (примерно на порядок) в растворимости этих летучих в гранитном расплаве [Кадик, Луканин, 1973] все водно-солевые компоненты и часть  $\text{CO}_2$  растворились в выплавках, оставляя сосуществующий флюид  $\text{CO}_2$ . Высокие температуры (около 1000 °С) генерации этих расплавов в присутствии богатого  $\text{CO}_2$  флюида хорошо согласуются с экспериментальными данными по плавлению гранитных систем с  $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$  при давлениях 10—15 кбар [Wendlandt, 1981; Ebadí, Johannes, 1991]. При повышении общего давления или при повышении степени плавления и увеличении объема выплавки свободный флюид  $\text{CO}_2$  был полностью растворен в расплаве, о чем косвенно указывает отсутствие первичных флюидных включений в позднем кварце и калишпате. На увеличение давления указывают данные по прогрессивной метаморфической зональности некоторых зерен клинопироксена из скаполитсодержащего гранулита.

Полученные данные о флюидном режиме можно интерпретировать как отсутствие стационарного флюидного потока в зонах плавления. Появление лимитированного количества летучих в этих зонах, вероятно, связано с реакциями дегидратации гидроксилсодержащих минералов [Hacker et al., 2005] и, возможно, декарбонатизации высококальциевых пород. Часть флюида, обогащенного  $\text{CO}_2$  и Cl, могла иметь более глубокий источник. Судя по составу породообразующих минералов изученного скаполитсодержащего гранулита и наличию в гранате и пироксене микрозерен кварца, биотита и карбонатов, можно предположить, что протолитом этого гранулита являлась биотит-кварц-плагиоклазовая порода с карбонатом. Присутствие довольно значительного количества сфена в гранулите указывает на большое количество Ti-содержащих минералов в протолите.

Данные по составу расплавленных и флюидных включений в скаполите и других минералах из изученного скаполитсодержащего гранулита позволяют выяснить особенности химизма расплавов и флюидов, при которых становилось возможным образование скаполита в утолщенной нижней коре под Памиром при повышенных *PT* параметрах. Вероятно, скаполит кристаллизовался вместо плагиоклаза при высоких содержаниях  $\text{CO}_2$  (около 1 мас. %) и Cl (до 0.8 мас. %) в выплавках в присутствии богатого

CO<sub>2</sub> флюида. Низкое содержание Cl в расплаве включений в скаполите свидетельствует о перераспределении Cl из расплава в структуру этого минерала. При кристаллизации более высококальциевого скаполита вместо плагиоклаза расплав обогащался Na. Это подтверждается более высоким содержанием Na в расплавленных включениях в позднем кварце по сравнению с составом включений в скаполите (см. табл. 7).

## ВЫВОДЫ

1. Ксенолит скаполитсодержащего гранулита из диатрем Юго-Восточного Памира кристаллизовался при температуре около 1000°C и давлении примерно 15 кбар.

2. Установлено, что все минералы (в том числе гранат, клинопироксен и скаполит) этого гранулита содержат первичные включения кислых (от риодацитов до риолитов), существенно-калиевых расплавов нормальной и повышенной щелочности с содержанием H<sub>2</sub>O до 4 мас. %, Cl до 0.8 мас. % и CO<sub>2</sub> около 1 мас. %. Расплавы включений в скаполите и кварце деплетированы в отношении HREE, что связано с ранней кристаллизацией граната.

3. Наиболее вероятным процессом образования изученного скаполитсодержащего гранулита являлось инконгруэнтное плавление в нижнекоровых условиях биотит-кварц-плагиоклазовых пород с карбонатом [Чупин и др., 2006]. Это плавление сопровождалось кристаллизацией граната, клинопироксена, сфена, плагиоклаза и скаполита, которые в виде включений захватывали микропорции выплавляющихся кислых расплавов.

4. Гранат и скаполит изученного гранулита кристаллизовались в присутствии насыщенного CO<sub>2</sub> кислого расплава и свободного богатого CO<sub>2</sub> флюида, что указывает на избыток флюида на ранних и промежуточных стадиях плавления.

5. В нижнекоровых условиях высококальциевый скаполит (Me<sub>67–69</sub>) кристаллизовался вместо плагиоклаза при высоких содержаниях CO<sub>2</sub> (около 1 мас. %) и Cl (до 0.8 мас. %) в выплавках в присутствии богатого CO<sub>2</sub> флюида.

Авторы признательны рецензентам И.П. Солововой и А.В. Корсакову за ряд комментариев и конструктивных замечаний, учтенных в окончательном варианте рукописи.

## ЛИТЕРАТУРА

**Базарова Т.Ю., Бакуменко И.Т., Костюк В.П., Панина Л.И., Соболев В.С., Чепуров А.И.** Магматогенная кристаллизация по данным изучения включений расплавов. Новосибирск, Наука, 1975, 232 с. (Тр. ИГиГ СО АН СССР, № 264а).

**Бобривич А.П., Соболев В.С.** Эклогитизация пироксеновых кристаллических сланцев архейско-го комплекса // Зап. ВМО, 1957, ч. 86, № 1, с. 3—17.

**Варгафтик Н.Б.** Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М., Наука, 1972, 720 с.

**Дмитриев Э.А.** Кайнозойские калиевые щелочные породы Восточного Памира. Душанбе, Дониш, 1976, 171 с.

**Дмитриев Э.А., Лутков В.С.** О составе верхней мантии Памира и Тянь-Шаня // Докл. АН СССР, 1983, т. 272, № 2, с. 437—442.

**Дмитриев Э.А., Королук В.Н., Лепезин Г.Г.** Зональность гранатов из эклогитовых включений в фергусит-порфиновых трубках взрыва на Памире // Докл. АН ТаджССР, 1985, т. XXVIII, № 5, с. 295—298.

**Добрецов Н.Л., Чупин В.П.** Генезис гранитоидов и формирование континентальной коры // Гранитоиды складчатых областей. Вопросы региональной геологии, генезиса, методики картирования / Ред. С.А. Лесков. СПб., Изд-во ВСЕГЕИ, 1993, с. 7—26.

**Ермаков Н.П., Долгов Ю.А.** Термобарогеохимия. М., Недра, 1979, 271 с.

**Кадик А.А., Луканин О.А.** Поведение воды и углекислоты в магматических процессах, определяемых их растворимостью // Геохимия, 1973, № 2, с. 163—179.

**Лутков В.С.** Петрохимическая эволюция и генезис калиевой пироксенит-эклогит-гранулитовой ассоциации: мантийные и коровые ксенолиты в неогеновых фергуситах Южного Памира, Таджикистан // Геохимия, 2003, № 3, с. 254—265.

**Лутц Б.Г.** Петрология глубинных зон континентальной коры и верхней мантии. М., Наука, 1974, 304 с.

**Наумов В.Б.** Определение концентрации и давления летучих компонентов в магматических расплавах по включениям в минералах // Геохимия, 1979, № 7, с. 997—1007.

**Петрографический кодекс.** Магматические и метаморфические образования / Ред. Н.П. Михайлов. СПб., ВСЕГЕИ, 1995, 128 с.



- Рёддер Э.** Флюидные включения в минералах. Т. 1. М., Мир, 1987, 558 с.
- Соболев А.В.** Включения расплавов в минералах как источник принципиальной петрогенетической информации // *Петрология*, 1996, т. 4, № 3, с. 228—239.
- Соболев А.В., Слущкий А.Б.** Состав и условия кристаллизации исходного расплава сибирских меймечитов в связи с общей проблемой ультраосновных магм // *Геология и геофизика*, 1984 (12), с. 97—110.
- Соловова И.П., Гирнис А.В., Рябчиков И.Д.** Включения карбонатных и силикатных расплавов в минералах щелочных базальтоидов Восточного Памира // *Петрология*, 1996, т. 4, № 4, с. 339—363.
- Томиленко А.А., Чупин В.П.** Термобарогеохимия метаморфических комплексов. Новосибирск, Наука, 1983, 201 с.
- Туре Ж.Л.Р.** Перенос флюида/расплава из мантии в нижнюю кору при гранулитовом метаморфизме // *Геология и геофизика*, 2009, т. 50 (12), с. 1357—1370.
- Чупин В.П., Томиленко А.А., Чупин С.В.** Происхождение гранулитовых комплексов: результаты изучения расплавных и флюидных включений в цирконе и породообразующих минералах // *Геология и геофизика*, 1993, т. 34 (12), с. 116—131.
- Чупин В.П., Кузьмин Д.В., Мадюков И.А.** Расплавные включения в минералах скаполитсодержащего гранулита (нижнекоровые ксенолиты из диатрем Памира) // *Докл. РАН*, 2006, т. 407, № 6, с. 823—827.
- Barbarin B.** A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments // *Lithos*, 1999, v. 46, p. 605—626.
- Chupin V.P., Tomilenko A.A.** Melt and fluid inclusions in high pressure minerals (kyanite, garnet, quartz): features of study and interpretation // *Bouletin de la Sociedad Espanola de Mineralogia*, 1995, v. 18, № 1, p. 39—40.
- Chupin V.P., Kuzmin D.V., Touret J.L.R.** Melt and fluid inclusions in minerals from garnet granulites/eclogites (Eastern Pamir) // *Abstracts of ECROFI-XIV (European Current Research on Fluid Inclusions)*, Nancy, France, July 1—4, 1997. Nancy, France, 1997, p. 74—75.
- Chupin S.V., Chupin V.P., Barton J.M., Barton E.S.** Archean melt inclusions in zircon from quartzite and granitic orthogneiss from South Africa: magma compositions and probable sources of protoliths // *Eur. J. Miner.*, 1998, v. 10, № 6, p. 1241—1251.
- Chupin V.P., Kuzmin D.V., Touret J.L.R.** High-pressure melt and fluid inclusions in minerals of garnet granulites/eclogites (Eastern Pamir) // *Abstracts of ECROFI XVI (European Current Research On Fluid Inclusions)*, Porto, 2001 / Eds. F. Noronha, A. Doria, A. Guedes. Universidade do Porto — Faculdade de Ciencias, Departamento de Geologia, Memorias, 2001, № 7, p. 95—98.
- Chupin V.P., Kuzmin D.V., Madyukov I.A.** Melt and fluid inclusions in minerals of scapolite-bearing granulite (lower crustal xenoliths from the Pamir diatremes) // *Acta Miner. Petrogr., Abstract Ser.*, 2003, v. 2, p. 42—43.
- Clemens J.D., Holloway J.R., White A.J.R.** Origin of an *A*-type granite: experimental constraints // *Amer. Miner.*, 1986, v. 71, p. 317—324.
- Cohen L.H., Klement W. Jr.** High-low quartz inversion: determination to 35 kilobars // *J. Geoph. Res.*, 1967, v. 72, № 16, p. 4245—4251.
- Ebadi A., Johannes W.** Beginning of melting and compositions of first melts in the system Qz—Ab—Or—H<sub>2</sub>O—CO<sub>2</sub> // *Contr. Miner. Petrol.*, 1991, v. 106, p. 286—295.
- Eckert J.O., Newton R.C., Kleppa O.J.** The  $\Delta H$  of reaction and recalibration of garnet-pyroxene-plagioclase-quartz geobarometers in the CMAS system by solution calorimetry // *Amer. Miner.*, 1991, v. 76, № 1/2, p. 148—160.
- Frost B.R., Barnes C.G., Collins W.J., Richard J.A., Ellis D.J., Frost C.D.** A geochemical classification for granitic rocks // *J. Petrol.*, 2001, v. 42, № 11, p. 2033—2048.
- Ghent E.D., Stout M.Z.** Determination of metamorphic pressure-temperature-time (*P-T-t*) paths. Short course on heat, metamorphism and tectonics // *Miner. Assoc. Canada*, 1988, v. 14, p. 155—188.
- Goff F., Arney B.H., Eddy A.C.** Scapolite phenocrysts in a latite dome, northwest Arizona, U.S.A. // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1982, v. 60, p. 86—92.
- Goldsmith J.R., Newton R.C.** Scapolite-plagioclase stability relations at high pressures and temperatures in the system NaAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>—CaAl<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>8</sub>—CaCO<sub>3</sub>—CaSO<sub>4</sub> // *Amer. Miner.*, 1977, v. 62, p. 1063—1081.
- Hacker B.R., Luffi P., Lutkov V., Minaev V.T., Ratschbacher L.R., Patino-Douce A.E., Ducea M.N., McWilliams M.O., Metcalf J.** Near-ultrahigh pressure processing of continental crust: Miocene crustal xenoliths from the Pamir // *J. Petrol.*, 2005, v. 46, p. 1661—1687.
- Hollister L.A., Burruss R.C.** Phase equilibria in fluid inclusion from the Khtada Lake metamorphic complex // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1976, v. 40, p. 163—175.

- Knorring O., Kennedy W.Q.** The mineral paragenesis and metamorphic status of garnet-hornblende-pyroxene-scapolite gneisses from Ghana (Gold Coast) // *Miner. Mag.*, 1958, v. 31, № 241, p. 846—859.
- Litvinovsky B.A., Steele I.M., Wickham S.M.** Silicic magma formation in overthickened crust: melting of charnockite and leucogranite at 15, 20 and 25 kbar // *J. Petrol.*, 2000, v. 41, № 5, p. 717—737.
- Millhollen G.L.** Synthesis of scapolite under magmatic conditions // *Amer. Miner.*, 1974, v. 59, p. 618—620.
- Newton R.C., Smith J.V., Windley B.F.** Carbonic metamorphism, granulites and crustal growth // *Nature*, 1980, v. 288, p. 45—50.
- Patiño Douce A.E.P., Johnston A.D.** Phase equilibria and melt productivity in the polytic system: implications for origin of peraluminous granitoids and aluminous granulites // *Contr. Miner. Petrol.*, 1991, v. 107, p. 202—218.
- Patiño Douce A.E.P., Beard J.S.** Dehydration melting of biotite gneiss and quartz amphibolite from 3 to 15 kbar // *J. Petrol.*, 1995, v. 36, № 3, p. 707—738.
- Perkins D., Newton R.C.** Charnockite geobarometers based on coexisting garnet-pyroxene-plagioclase-quartz // *Nature*, 1981, v. 292, p. 144—146.
- Powell R.** Regression diagnostics and robust regression in geothermometer/geobarometer calibration: the garnet-clinopyroxene geothermometer revisited // *J. Metamorph. Geol.*, 1985, v. 3, p. 327—342.
- Schiano P., Clocchiatti R.** Worldwide occurrence of silica-rich melts in sub-continental and sub-oceanic mantle minerals // *Nature*, 1994, v. 368, p. 621—624.
- Skjerlie K.P., Johnston A.D.** Vapour-absent melting from 10 to 20 kbar of crustal rocks that contain multiple hydrous phases: implications for anatexis in the deep to very deep continental crust and active continental margins // *J. Petrol.*, 1996, v. 37, p. 661—691.
- Sun S.-S., McDonough W.F.** Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; implications for mantle composition and processes // *Magmatism in the Ocean Basins* / Eds. A.D. Saunders, M.J. Norry. London, Geological Society, Special Publications, 1989, v. 42, p. 313—345.
- Szabo C., Bodnar R., Sobolev A.** Metasomatism associated with subduction-related, volatile-rich silicate melt in the upper mantle beneath the Nograd-Gýmýr Volcanic Field, Northern Hungary/Southern Slovakia: evidence from silicate melt inclusions // *Eur. J. Miner.*, 1996, v. 8, p. 881—899.
- Touret J.L.R.** Le facies granulite en Norvege Meridionale. Les inclusions fluids // *Lithos*, 1971, v. 30, p. 423—436.
- Wendlandt R.F.** Influence of CO<sub>2</sub> on melting of model granulite facies assemblages: a model for the genesis of charnockites // *Amer. Miner.*, 1981, v. 66, p. 1164—1174.
- Whalen J.B., Currie K.L., Chappell B.W.** A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis // *Contr. Miner. Petrol.*, 1987, v. 95, p. 407—419.
- Wolf M.B., Wyllie P.J.** Garnet growth during amphibolite anatexis: implications of a garnetiferous restite // *J. Geol.*, 1993, v. 101, p. 357—373.

*Поступила в редакцию  
12 апреля 2011 г.*