

## МЕЛИЛИТОВЫЕ И МОНТИЧЕЛЛИТСОДЕРЖАЩИЕ ПОРОДЫ КРЕСТОВСКОЙ ИНТРУЗИИ (север Сибирской платформы) И ИХ ГЕНЕЗИС

Л. И. Панина, А. М. Сазонов\*, Л. М. Усольцева

Институт минералогии и петрографии СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Коптюга, 3, Россия

\* Красноярская государственная академия цветных металлов и золота,  
660025, Красноярск, Красноярский рабочий, 95, Россия

Рассматривается геологическое строение открытой в 1996 г. Крестовской интрузии ультраосновных мелилитовых пород. Приводится петрографическая характеристика мелилитовых и монтичеллитсодержащих пород, их минералогия, состав минералов, в том числе редко встречаемых (кальсилита, комбеита, ранкинита, ларнита, джерфшерита). С помощью изучения расплавных включений было установлено, что минералы мелилитовых и монтичеллитсодержащих пород кристаллизовались на магматической стадии в следующей последовательности: перовскит (1250—1230 °С) → мелилит (1235—1160 °С) → монтичеллит (1090—990 °С). Состав расплава на стадии кристаллизации перовскита был малокремнистый (30—33 мас. % SiO<sub>2</sub>), обеднен Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (5—6 мас. %) и MgO (6—8 мас. %), обогащен CaO (17—21 мас. %) и щелочами (в сумме до 11 мас. % с преобладанием К над Na), содержал 2—3 % SO<sub>3</sub> и, вероятно, некоторые количества Cl и CO<sub>2</sub>, т. е. состав был щелочно-ультраосновной, обогащен Ca, имел К-Na или даже Na-K тип щелочности. В момент кристаллизации перовскита проявилась жидкостная силикатно-солевая несмешимость. Кристаллизация мелилита началась из того же расплава и протекала в условиях продолжавшейся двухфазовой жидкостной несмешимости при резко меняющейся фугитивности кислорода. В процессе кристаллизации и фракционирования мелилита в расплаве возросли содержания Si и Al, резко упал потенциал Fe, в сумме щелочей уменьшились количества Na и возросли — K, но количества Ca и Mg остались примерно на том же уровне. В дальнейшем высокий потенциал калия обеспечил связывание Al-Si радикалов в молекулы флогопита и кальсилита и кристаллизацию в восстановительных условиях джерфшерита. Чрезвычайно высокая активность Ca способствовала кристаллизации весьма редких кальциевых силикатов — ларнита и ранкинита и связыванию оставшихся количеств Na в комбеит и пектолит.

Пространственно обособившийся в результате жидкостной несмешимости силикатно-солевой расплав по составу был близок высококремнистым карбонатитовым щелочным расплавам Форт-Портала в Уганде. С его воздействием связаны аутометасоматические преобразования оливиновых и пироксеновых пород, приведшие к возникновению на магматической стадии монтичеллита и граната. Среди летучих в силикатно-солевых расплавах главную роль играли CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O, незначительную — CO.

*Мелилитовые и монтичеллитсодержащие породы, расплавные включения, двухфазовая жидкостная несмешимость, высококремнистые карбонатитовые расплавы, аутометасоматоз магматической стадии.*

### MELILITIC AND MONTICELLITE-BEARING ROCKS OF THE KRESTOVSKAYA INTRUSION (northern Siberian Platform) AND THEIR GENESIS

L. I. Panina, A. M. Sazonov, and L. M. Usol'tseva

The geologic structure of the Krestovskaya intrusion, discovered in 1996, is discussed. Petrographic characteristics of melilitic and monticellite-bearing rocks, their mineralogy, and composition of minerals, including rare ones (kalsilite, combeite, rankinite, larnite, and djerfisherite), are reported. Studies of melt inclusions have shown that melilitic and monticellite-bearing rocks crystallized at the magmatic stage in the following sequence: perovskite (1250—1230°C) → melilite (1235—1160°C) → monticellite (1090—990°C). The melt during crystallization of perovskite was lowly siliceous (30—33 wt. % SiO<sub>2</sub>), depleted in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (5—6 wt. %) and MgO (6—8 wt. %), enriched in CaO (17—21 wt. %) and alkalis (totalling about 11 wt. % with predominance of K over Na), and contained 2—3% SO<sub>3</sub> and, perhaps, some quantities of Cl and CO<sub>2</sub>, i. e., was alkaline-ultramafic, enriched in Ca, and had K-Na or even Na-K type of alkalinity. During crystallization of perovskite, liquid silicate-salt immiscibility manifested itself. Crystallization of melilite started from the same melt and proceeded under the conditions of ongoing two-phase liquid immiscibility with a drastically changing oxygen fugacity. During crystallization and fractionation of melilite, the contents of Si and Al in the melt strongly increased, the content of Fe sharply decreased, the amount of Na in the total of alkalis diminished and that of K grew, and the quantities of Ca and Mg remained the same. Subsequently the high content of K favored binding of Al-Si radicals into molecules of phlogopite and kalsilite and crystallization of djerfisherite under reducing conditions. The extremely high activity of Ca favored crystallization of rather rare calcium silicates, larnite and rankinite, and binding of the rest amount of Na into combeite and pectolite.

The silicate-salt melt, spatially separated as a result of liquid immiscibility, was compositionally close to highly siliceous carbonatitic alkaline melt of Fort Portal in Uganda. It was responsible for autometasomatic transformation of olivine and pyroxene rocks, which resulted in monticellite and garnet at the magmatic stage. Among volatiles, CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O were predominant in silicate-salt melts, while CO was present in minor amount.

*Melilitic and monticellite-bearing rocks, melt inclusions, two-phase liquid immiscibility, highly siliceous carbonatitic melts, autometasomatism of magmatic stage*

### ВВЕДЕНИЕ

Генезис мелилитовых и монтичеллитсодержащих пород в щелочно-ультраосновных карбонатитовых комплексах до сих пор вызывает оживленные дискуссии из-за текстурно-структурных

особенностей и форм выделения мелилита [1—6]. Считая, что главная масса вулканических и плутонических мелилитовых пород кристаллизовалась непосредственно из расплавов, исследователи обращают внимание на те факты, когда мелилит в породе распределен неравномерно, образует неправильные выделения, каймы, принакает между зернами оливина, пироксена и нефелина и включает их реликты. Даже в лапиллях карбонатowego вулкана Олдоиньо Ленгаи (Танзания) были обнаружены каймы из мелилита, ранкинита и комбеита, окружающие корродированные зерна пироксена и волластонита [7]. Монтичеллит в породах обычно присутствует также в виде неправильных выделений, образует пойкилобласты с включениями зерен нефелина и перовскита, формирует оторочки вокруг мелилита и оливина, иногда отмечается в псевдографических сростаниях с мелилитом [1, 4 и др.]. Данные структурно-текстурные особенности мелилит-монтичеллитовых пород исследователи связывают либо с метасоматозом [8, 9], либо с контактово-реакционным взаимодействием высококальциевых расплавов (исходных силикатных и карбонатитовых) с уже сформированными породами и минералами [10, 11].

Для выяснения происхождения мелилитовых и монтичеллитсодержащих пород Крестовской интрузии мы наряду с геологическими, петрографическими и минералогическими методами широко использовали комплексные методы термобарогеохимии — методы изучения включений минералообразующих сред, законсервированных в минералах. С их помощью мы попытались выяснить также роль и взаимосвязь магматизма и метасоматоза (или автометасоматоза) при образовании пород.

### ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МАССИВА

Крестовский массив расположен в 54 км к юго-западу от южного карбонатитового тела Гулинской интрузии по азимуту 240°. Он имеет в плане овальную форму и вытянут в суб-меридиональном направлении. Сведения о геологическом строении интрузии изложены в отчете Ф. Д. Лазарева (1998), информационных геологических записках В. Р. Трофимова (1998—1999), Т. Е. Зенько, В. А. Федоренко (1999), а также в работах [12—16].

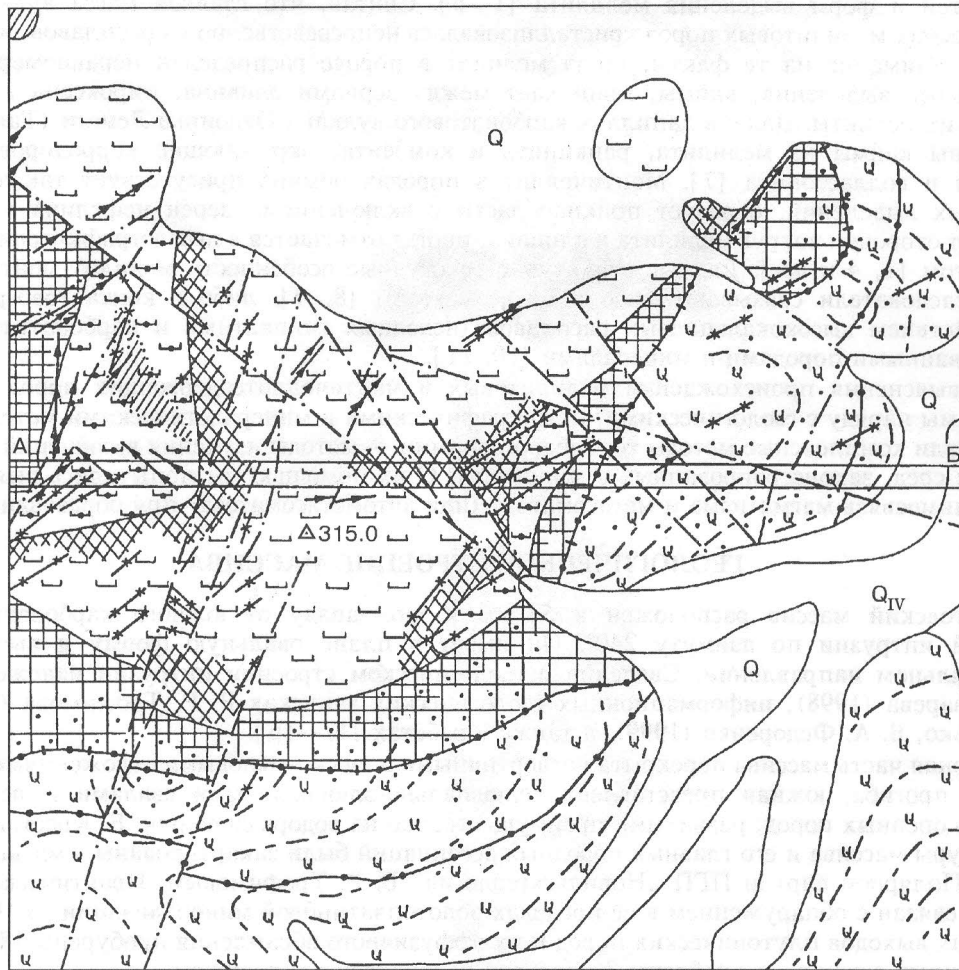
Северная часть массива перекрыта четвертичными и юрско-меловыми отложениями Енисей-Хатангского прогиба, южная представлена делювиально-элювиальными свалами и редкими обнажениями коренных пород, развитыми преимущественно на водоразделе руч. Б. Крестовый и р. Кресты. Контуры массива и его главных породных ассоциаций были закартированы в масштабе 1:25 000 геологом Полярной партии ППП „Норильскгеология“ В. Р. Трофимовым. Практический интерес к интрузии связан с обнаружением в ее пределах золотоплатиновой минерализации. В 1999—2000 гг. на участках выходов плутонических пород и их эффузивного обрамления пробурены 18 структурно-картировочных скважин и пройдены 3 поисково-картировочные траншеи.

Крестовский массив представляет собой центральную часть вулканоплутонической структуры (рис. 1). Ядро структуры сложено плутоническими породами (4,2 км<sup>2</sup>) ультраосновного состава, сформировавшимися 250—170 млн лет назад. Ультрамафиты, образующие полосчатый комплекс оливинитов, верлитов и пироксенитов, слагающие большую часть массива (3,4 км<sup>2</sup>), внедрились 250 млн лет назад. Разобценные интрузивные тела мелилитолитов и ассоциирующих с ними монтичеллитолитов общей площадью 0,8 км<sup>2</sup>, развитые в пределах ультрамафитовой интрузии, сформировались 170 млн лет назад. Среди монтичеллитолитов Т. Е. Зенько и В. А. Федоренко выделяют монтичеллит-оливиновые (крестовиты) и монтичеллит-оливин-мелилитовые породы, не имеющие аналогов, описанных в геологической литературе [15].

Вмещающие массив породы представлены щелочными ультраосновными эффузивами. Вокруг интрузивного массива развит контактово-метаморфический ореол измененных пород (7,6 км<sup>2</sup>). Мелилитолит-монтичеллитолитовые тела в поле ультрамафитов сопровождаются инъекционными мелилитизированными и рекристаллизованными породами. В мелилитолитах широко проявилась автометасоматическая гидротермально-скарновая минерализация. В пределах массива развиты дайки кальцитовых карбонатитов, нефелиновых и мелилитовых лампрофиров, трахидолеритов, щелочных микросиенитов и щелочных пикритов. Во вмещающих породах формируются преимущественно дайки трахидолеритов и субщелочных плагиоклазовых порфиритов среднего и основного составов. Структура массива охарактеризована на основании геологических наблюдений с применением петроструктурного анализа, дешифрирования аэрофотоснимков и интерпретации геофизических аномалий.

### МЕЛИЛИТОВЫЕ ПОРОДЫ И ИХ МИНЕРАЛОГИЯ

По минеральному составу среди мелилитовых пород выделяются мелилитолиты, кугдиты, пироксеновые кугдиты, ункомпагриты и оливиновые ункомпагриты, а также мелилитсодержащие ультрамафиты — оливиниты, перидотиты и пироксениты. Собственно мелилитовые породы богаты второстепенными минералами: монтичеллитом, гранатом, перовскитом, титаномagnetитом, реже кальсилитом, пектолитом, апатитом, ранкинитом, карбонатами и др. Количество титаномagnetита



0 250 500 м

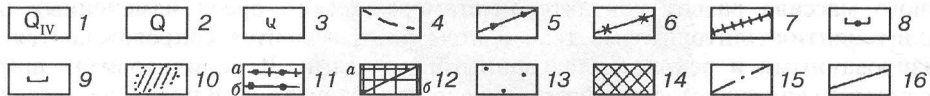
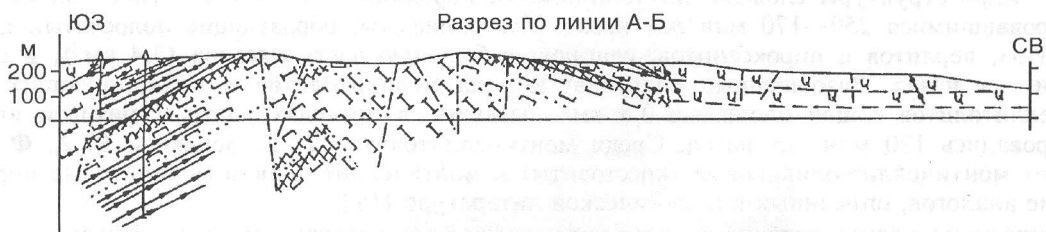


Рис. 1. Схема геологического строения Крестовского массива (составили А. М. Сазонов, М. Я. Бехтер).

1 — современные аллювиальные отложения; 2 — нерасчлененные четвертичные отложения; 3 — тыванкитская свита, меланефелиниты; 4 — кластолы меланефелинитов; 5, 6 — дайки: 5 — щелочных микросиенитов, 6 — трахибазальтов, трахидолеритов, плагиоклазовых порфиритов и пикритов; 7 — вложенные дайки (микросиениты, трахибазальты, трахидолериты, щелочные пикриты); 8 — Маймечя-Котуйский комплекс (EMJ<sub>2</sub>mk?) — мелилитолиты; 9 — Гулинский комплекс (σT<sub>1-2</sub>g) — оливиниты, верлиты и пироксениты; 10 — монтичеллитолиты; 11 — изограды (а — перовскита, б — сфена); 12 — роговики (а — мелкозернистые пироксеновые, б — бластопорфировые пироксеновые); 13 — биотитизированные меланефелиниты; 14 — инъекционные мелилитолит-ультрамафиты, скарнированные и рекристаллизованные породы контактовой зоны мелилитолитовых тел; 15 — предполагаемые разрывы; 16 — геологические границы.



Таблица 1.

Химический состав породообразующего мелилита, мас. %

Оксид	Мелилитолит									Кугдит						
	SiO <sub>2</sub>	43,66	44,05	44,18	43,69	43,54	40,13	44,95	43,98	43,58	43,75	44,11	43,67	44,13	43,81	43,86
TiO <sub>2</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,05	0,00	0,03	0,00	0,00	0,09	—	0,08	0,00	0,05	0,03
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,82	2,65	2,95	2,66	2,90	3,12	2,27	2,95	3,05	2,83	2,82	2,91	2,89	2,45	2,52	2,73
FeO	2,64	2,61	2,64	2,62	2,66	4,34	2,66	2,61	2,64	2,73	2,75	2,45	2,42	2,30	2,55	2,57
MnO	0,03	0,04	0,07	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,02	0,05	0,09
MgO	10,51	10,23	10,24	10,23	10,85	11,45	9,91	9,85	9,71	10,71	10,90	10,86	11,56	10,78	10,64	11,12
CaO	36,19	36,09	35,50	36,77	36,22	37,22	35,29	35,95	36,51	36,12	35,75	35,94	35,22	36,49	36,31	37,08
Na <sub>2</sub> O	1,85	1,82	1,87	1,64	1,80	1,78	1,78	2,06	1,91	1,76	1,70	1,83	1,88	1,75	1,62	1,27
K <sub>2</sub> O	0,18	0,16	0,19	0,18	0,15	0,19	0,16	0,20	0,18	0,16	0,17	0,12	0,12	0,14	0,16	0,00
BaO	0,10	0,14	0,12	0,09	0,09	0,15	0,08	0,11	0,08	0,11	0,11	0,12	0,12	0,10	0,00	—
SrO	0,68	0,75	0,69	0,73	0,73	0,43	0,78	0,71	0,70	0,64	0,65	0,73	0,35	0,68	0,72	—
Сумма	98,68	98,58	98,50	98,67	99,11	98,96	98,55	98,55	98,50	98,89	99,13	98,72	99,06	98,55	98,54	98,84
Количество ионов в пересчете на 14 (O)																
Si	4,043	4,083	4,092	4,025	4,011	3,781	4,159	4,071	4,051	4,043	4,057	4,040	4,046	4,050	4,059	4,086
Ti	0,000	0,000	0,000	0,000	0,006	0,006	0,000	0,000	0,000	0,000	0,006	—	0,006	0,000	0,006	—
Al	0,301	0,289	0,322	0,288	0,310	0,340	0,256	0,323	0,335	0,300	0,298	0,311	0,309	0,278	0,279	0,298
Fe	0,200	0,200	0,200	0,199	0,211	0,340	0,211	0,200	0,201	0,211	0,216	0,195	0,182	0,178	0,200	0,199
Mn	0,000	0,000	0,006	0,000	0,000	0,000	0,006	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,006	0,006
Mg	1,448	1,413	1,407	1,401	1,496	1,615	1,368	1,368	1,345	1,470	1,492	1,501	1,587	1,489	1,465	1,516
Ca	3,586	3,571	3,492	3,720	3,579	3,758	3,492	3,560	3,622	3,572	3,521	3,546	3,461	3,606	3,593	3,650
Na	0,345	0,323	0,345	0,288	0,321	0,329	0,322	0,378	0,346	0,322	0,298	0,322	0,342	0,322	0,289	0,055
K	0,022	0,022	0,022	0,022	0,022	0,023	0,022	0,022	0,022	0,022	0,022	0,011	0,011	0,011	0,022	—
Ba	0,005	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,000	—
Sr	0,039	0,045	0,040	0,039	0,039	0,023	0,044	0,039	0,039	0,033	0,033	0,039	0,022	0,039	0,039	—

\* Крупное зерно мелилита с востком магнетита, окруженным каймой из оливина.

Таблица 2.

Химический состав оливина из кугдита, мас. %

Оксид	Породообразующий минерал						Мк в Ме
	1	2	3	4	5	6	
SiO <sub>2</sub>	41,04	40,47	40,46	40,25	41,48	40,58	39,89
TiO <sub>2</sub>	0,00	0,03	0,03	0,00	0,00	0,03	0,00
FeO	11,55	11,86	11,68	11,32	10,39	9,02	10,33
MnO	0,41	—	0,28	0,31	0,26	0,28	0,32
MgO	47,32	46,39	47,36	46,45	48,07	49,8	47,13
CaO	1,02	1,67	1,57	0,81	0,47	0,66	0,72
Сумма	101,44	100,52*	101,45	99,20	100,71	100,37	98,41
Количество ионов в пересчете на 4 (O)							
Si	1,002	1,000	0,991	1,005	1,011	0,991	1,000
Fe	0,237	0,246	0,240	0,235	0,212	0,183	0,215
Mn	0,009	—	0,006	0,006	0,005	0,006	0,006
Mg	1,724	1,708	1,729	1,727	1,746	1,811	1,760
Ca	0,026	0,045	0,043	0,021	0,013	0,018	0,018

Примечание. Оливин: 1—4 — гипидиоморфные, слегка удлиненные зерна; 5, 6 — кайма вокруг зерна магнетита, пойкилито включенного в мелилит, 7 — микролиты в мелилите.

\* В сумме также учтены 0,08 мас. % NiO.

достигает иногда 40 % и более. Рудная и нерудная составляющие породы часто распределяются полосами. Структура пород неравномерно-зернистая, гипидиоморфная, сидеронитовая; текстура массивная, нередко пятнистая и прожилковая.

Детально минеральный состав был исследован в двух разновидностях мелилитовых пород — мелилитолитах и кугдитах. С помощью микросондового анализа в них проанализированы породообразующие минералы, а также микролиты и дочерние минералы из расплавных включений.

Мелилит является основным породообразующим минералом мелилитовых пород. Он представлен преимущественно крупными (2—4 до 8 мм) ксеноморфными зёрнами с очень низким дупреломлением. Во многих зёрнах мелилита присутствуют ориентированные востки магнетита или



Таблица 3.

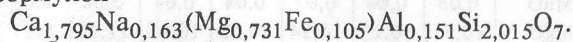
Химический состав монтichelлита, мас. %

Оксид	Породообразующий минерал из мелилитолитов																	Фаза из включений	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
SiO <sub>2</sub>	36,18	37,20	36,37	36,19	36,30	36,66	36,45	36,91	36,43	37,61	37,02	36,40	35,89	36,98	35,45	36,93	37,59	37,19	
FeO	11,99	10,82	11,27	10,12	13,49	9,68	10,53	11,56	11,11	4,36	1,98	6,70	14,85	9,28	14,13	11,24	4,46	10,19	
MnO	—	—	—	0,37	—	—	—	—	—	—	0,11	0,40	—	—	—	0,42	—	0,33	
MgO	17,48	17,95	18,28	18,14	16,57	18,47	18,74	17,67	18,28	22,94	24,52	20,61	15,13	19,69	17,73	18,55	22,23	19,85	
CaO	33,53	31,10	33,40	34,18	33,60	34,17	33,38	33,66	33,41	35,24	35,40	34,46	33,08	34,06	32,76	31,64	35,49	31,57	
Сумма	99,20	100,11	99,35	99,00	99,98	99,01	99,17	99,79	99,25	100,15	99,04	98,57	99,98	100,05	100,07	98,82	99,82	99,14	
Si	1,000	1,036	1,001	1,000	1,002	1,006	1,002	1,010	1,001	0,996	0,986	0,995	1,008	1,001	0,983	1,015	1,000	1,013	
Fe	0,278	0,251	0,259	0,234	0,312	0,222	0,241	0,265	0,254	0,097	0,045	0,153	0,350	0,210	0,326	0,258	0,101	0,232	
Mn	—	—	—	0,010	—	—	—	—	—	—	0,002	0,010	—	—	—	0,010	—	0,007	
Mg	0,721	0,743	0,748	0,746	0,684	0,756	0,766	0,722	0,750	0,904	0,973	0,839	0,633	0,795	0,730	0,762	0,881	0,808	
Ca	0,995	0,929	0,981	1,014	0,994	1,004	0,981	0,988	0,988	1,002	1,010	1,001	0,996	0,988	0,973	0,934	1,012	0,922	

Количество ионов в пересчете на 4 (O)

Примечание. Микролиты и включения: 13—15, 17 — из граната мелилитолитов, 16, 18 — из оливина кудритов. Фазовый состав включений: 17 — Монт + Джер + Клц, 18 — Монт + Фл + Со, Со — остаточное стекло. Минералы из включений здесь и далее в таблицах 4, 6, 7, 9—11: Монт-монтichelлит, Джер — джершиерит, Клц — кальцит, Фл — флогопит, Ап — апатит, Комб — комбеит, Кс — кальсилит, Крф. — неидентифицированная кристаллическая фаза, Лар — ларинг(?), Мгн — магнетит, Пир — пироксен, Прг — пирротин, Ранк — ранкинит(?), Р.ф. — неидентифицированная рудная фаза.

гематита. В составе мелилита содержатся (табл. 1) небольшие количества Na и Fe (1,6—1,8 Na<sub>2</sub>O и 2,3—2,6 FeO), до 0,7 % SrO и 0,1 % BaO, в серии твердых растворов значительно преобладает окерманитовый минал. Состав мелилита может быть представлен усредненной формулой



Оливин присутствует в кудритах как один из главных породообразующих минералов, также отмечен в виде микролитов в мелилите, иногда образует каймы вокруг выделений магнетита в мелилите, причем каймы обычно в виде монозерен.

Породообразующий оливин представлен гипидоморфными, слегка удлинёнными зёрнами размером от десятых долей до 1,5 мм. Контуры его на границе с мелилитом ровные, с магнетитом — извилистые: последний как будто резербирует оливин. Все формы выделения оливина маложелезистые (табл. 2), их магнизиальность не опускается ниже 80 %, а самая высокая (90 %) характерна для оливина из каймы (там же, ан. 5, 6). Минерал относится к форстериту и может быть представлен формулой  $\text{Fo}_{87,8-90,8}\text{Fa}_{12,2-9,2}$ , содержит примеси: довольно значительные (0,8—1,67 мас.%) CaO и небольшие (0,28—0,41 мас.%) MnO, которые замещают, по-видимому, Mg и Fe. Отмечена также несущественная (0,08 мас.%) примесь NiO.

Монтichelлит относится к второстепенным породообразующим минералам мелилитовых пород, в которых представлен разного размера ксеноморфными зёрнами с извилистыми краями. Отмечается он также в виде микролитов и кристаллических фаз во включениях, содержащихся в гранате и оливине. Во включениях монтichelлит ассоциирует: в гранате-матрице — с джершиеритом и кальцитом, в оливине — с флогопитом и остаточным стеклом. Состав его (табл. 3) в основном высокожелезистый: замещение магния железом составляет от 23 до 31 %. Лишь в некоторых зёрнах монтichelлита, находящихся в зонах развития Са-силиката (пектолита, ранкинита), хлорита и свинцового оруденения (табл. 3, ан. 10—12), а также содержащихся в раскристаллизованных включениях в гранате (ан. 17), количество железа опускается до 2—6 мас.%. Для монтichelлита характерна также несущественная примесь MnO — 0,3—0,4 мас.%.

Перовскит относится к широко распространенным породообразующим минералам мелилитовых пород. Он отмечен также в составе включений, присутствующих в оливине, где ассоциирует с кальсилитом и рудной фазой. В породе перовскит отмечается в виде округлых изометрических зёрен размером от сотых до десятых долей миллиметра. Большая часть зёрен окрашена в светло-коричневый цвет, полисинтетически сдвойникова, находится в сра-

станциях с рудным, с которым либо образует цепочечные и гроздевидные агрегаты, либо оконтуривает в виде каймы. Кроме вышеописанных отмечаются зерна перовскита интенсивно-красного до бордового цвета. Они обычно хорошо огранены, встречаются поодиночке, не сдвойникованы, не образуют сростков с рудным минералом и не содержат включений. Состав разноокрашенных перовскитов (табл. 4) довольно близкий: в нем присутствует железо (1—1,8 мас.% FeO), щелочи (преимущественно Na<sub>2</sub>O — до 0,44 мас.%), а также SrO (0,4—0,6 мас.%). При этом перовскит из включений обогащен до 1,24 мас.% SrO и наиболее железистый. Фиксируемая на данном этапе исследования разница в составе заключается лишь в обнаружении существенного дефицита в сумме оксидов у красноокрашенных перовскитов (см. табл. 4, ан. 3—6), что может свидетельствовать о возможном обогащении данной разновидности Nb или элементами Се-группы.

Гранат в мелилитовых породах присутствует как второстепенный породообразующий минерал, а также в виде микролитов в монтichelлите. Породообразующий гранат имеет темно-бурую окраску, нередко зонален, представлен округлыми изометричными зернами, обычно находящимися в сростках с перовскитом и магнетитом. Микролиты окрашены в зеленые цвета, имеют неправильную форму. По составу (табл. 5) гранаты относятся к группе андрадита. Породообразующие гранаты неравно-

Таблица 4. Химический состав перовскита, мас. %

Оксид	Породообразующий минерал								Фаза из включения
	1	2	3	4	5	6	7	8	
SiO <sub>2</sub>	0,00	0,03	0,00	0,20	0,00	0,00	0,01	0,00	0,41
TiO <sub>2</sub>	58,09	58,96	56,50	57,10	55,28	56,46	58,73	58,25	56,24
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,09	0,07	0,00	0,04	0,12	0,11	0,07	0,06	0,00
FeO	1,31	1,07	1,54	0,25	1,36	1,14	1,07	1,47	1,83
MgO	0,03	0,00	0,03	0,06	0,03	0,04	0,04	0,05	0,20
CaO	38,90	39,58	37,64	38,67	37,18	36,78	40,19	37,72	36,67
Na <sub>2</sub> O	0,23	0,18	0,15	0,26	0,22	0,22	0,15	0,44	0,31
K <sub>2</sub> O	0,00	0,00	0,02	0,03	0,00	0,00	0,02	0,00	0,11
SrO	0,48	0,42	—	—	—	—	0,45	0,63	1,24
Сумма	99,09	100,36	95,93	96,61	94,27	94,75	100,75	98,65	98,10
Количество ионов в пересчете на 24 (O)									
Si	0,000	0,000	0,000	0,034	0,000	0,000	0,000	0,000	0,079
Ti	8,018	8,022	8,053	8,030	8,016	8,115	7,971	8,070	7,917
Al	0,022	0,022	0,000	0,000	0,070	0,069	0,022	0,022	0,000
Fe	0,198	0,163	0,239	0,034	0,220	0,172	0,162	0,232	0,281
Mg	0,000	0,000	0,000	0,034	0,000	0,000	0,000	0,033	0,058
Ca	7,654	7,674	7,632	7,749	7,680	7,529	7,776	7,429	7,365
Na	0,066	0,066	0,046	0,112	0,070	0,069	0,043	0,133	0,113
Sr	0,043	0,054	—	—	—	—	0,054	0,066	0,135

Примечание. 1—5 — из мелилитолитов, 6—9 — из кугдитов. Окраска перовскита: 3—6 — интенсивно-красная до бордового, остальных — светло-коричневая. Минерал-хозяин включения — оливин. Фазовый состав включения: Пер + Кс + Р.ф.

Таблица 5. Химический состав гранатов из мелилитолитов, мас. %

Оксид	Породообразующий минерал								Мк в Монт
	1	2	3	4	5	6	7	8	
SiO <sub>2</sub>	27,28	30,77	30,42	33,41	33,80	33,67	34,15	34,86	
TiO <sub>2</sub>	15,86	9,08	6,33	4,40	4,16	2,65	0,48	0,03	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,48	1,50	1,14	1,20	1,10	1,68	0,06	0,19	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22,43	26,46	27,21	26,97	27,00	27,77	31,44	30,22	
MgO	1,43	0,84	0,75	0,67	0,63	0,47	0,13	0,64	
CaO	31,93	31,32	32,41	32,98	32,98	32,66	32,12	32,56	
Сумма	99,41	100,00	98,41	99,62	99,70	98,90	98,35	98,24	
Количество ионов в пересчете на 24 (O)									
Si	4,646	5,574	5,259	5,630	5,691	5,715	5,884	5,961	
Ti	2,037	1,239	0,821	0,558	0,537	0,336	0,062	0,000	
Al <sup>+4</sup>	0,102	0,326	0,229	0,243	0,223	0,285	0,021	0,039	
Al <sup>+3</sup>	—	—	—	—	—	0,061	—	0,064	
Fe <sup>+3</sup>	2,866	2,405	3,534	3,427	3,423	3,545	4,081	3,878	
Mg	0,358	0,217	0,187	0,172	0,152	0,122	0,031	0,154	
Ca	5,823	6,063	6,008	5,932	5,924	5,939	5,925	5,951	

мерно (от 0,5 до 15,9 мас.%) обогащены титаном, по содержанию которого можно выделить меланиты (~4 %  $TiO_2$ ) и шорломиты (выше 9 %  $TiO_2$ ). С уменьшением содержания Ti в составе граната возрастает количество Fe. По-видимому, в условиях дефицита Si титан, так же как и Fe, выступает в качестве его заместителя. Микролиты граната в монтichelлите совсем не содержат титана и являются типичными андрадитами. Все гранаты содержат небольшую примесь  $Al_2O_3$ : от 0,2 мас.% в микролитах до 1,7 мас.% в породообразующих гранатах. Причем практически весь Al находится в тетраэдрической позиции и его количество в основном напрямую зависит от количества Ti.

Флогопит в мелилитовых породах как породообразующий минерал встречается редко. Представлен тремя морфологическими разновидностями: а) бурыми единичными лейстами, содержащими (табл. 6, ан. 1, 2) 1,6—2,1 мас.%  $TiO_2$ , около 14 мас.%  $Al_2O_3$ , и с железистостью 16—18 %; б) бурым мелкочешуйчатым агрегатом, в котором (там же, ан. 3, 4) несколько меньше титана и несколько выше железистость; в) бесцветными поздними высокомагнезиальными ( $f = 5$  %) выделениями в виде неправильной формы пластин, радиально-лучистых и древовидных агрегатов, в составе которых (см. табл. 6, ан. 5—8) совсем отсутствует титан, а количество  $Al_2O_3$  составляет 12 мас.%.

Чаще флогопит отмечается в виде микролитов и кристаллических фаз во включениях, содержащихся в монтichelлите, оливине и мелилите. Во включениях он ассоциирует с разнообразными кристаллическими фазами: в оливине-матрице — с комбеитом и рудной фазой, а в мелилите-матрице — с пироксеном, рудными фазами, ларнитом(?), остаточным стеклом и неидентифицированными прозрачными фазами. В виде микролитов флогопит представлен либо мономинеральными выделениями, либо поликристаллическим агрегатом, представляя собой матрицу для скелетных („ежистых“) выделений магнетита. В целом флогопиты из включений и микролиты имеют сравнительно высокую железистость (от 14 до 30 %), причем наибольшие ее значения присущи микролитам из монтichelлита, а наименьшее — фазам из включений в мелилите. Состав минерала (см. табл. 6) везде характеризуется пониженным количеством (10—12 мас.%)  $Al_2O_3$ , содержит заметную примесь CaO (от 0,2 до 1—2,15 мас.%) и BaO (0,17—0,4 мас.%) и немного (0,04—0,07 мас.%) MnO. Небольшая примесь  $TiO_2$  (0,2—0,3 мас.%) характерна преимущественно для флогопитов-микролитов.

Пироксен в рассматриваемых породах очень редок. Он присутствует главным образом в виде микролитов и кристаллических фаз из включений, содержащихся преимущественно в перовските, реже в мелилите. Как породообразующий пироксен изредка отмечается совместно с крупнозернистым гранат-магнетитовым агрегатом, или пространственно ассоциирует с монтichelлитом. Микролиты пироксена обычно имеют близкую к изометричной форму, нередко с некоторыми элементами кристаллографической огранки. Иногда они являются матрицей для скелетных „ежистых“ выделений магнетита и имеют ксеноморфные очертания. Во включениях из перовскита-хозяина пироксен ассоциирует с кальсилитом и рудными фазами, к которым иногда прибавляются апатит, ранкинит(?), комбеит и остаточное стекло. Среди рудных минералов отмечен магнетит и джерфишерит. В мелилите фазовый состав включений иной: совместно с пироксеном отмечаются ларнит(?), флогопит и остаточное стекло.

По составу (табл. 7) породообразующий пироксен и преимущественное большинство микролитов и микрофаз из включений являются маложелезистыми ( $f = 12—37$  %) и относятся, согласно классификации [17], к диопсидам. Небольшую часть пироксена с повышенной железистостью ( $f = 51—61$  %, ан. 2, 11, 12) можно отнести к салитам или салит-авгитам. Характерной особенностью химизма всех пироксенов является небольшой недостаток Si, который компенсируется вхождением в его позицию  $Al^{IV}$  или даже  $Ti^{IV}$ . Все пироксены содержат в своем составе небольшие количества MnO (0,1—0,4 мас.%) и  $Na_2O$  (0,2—1, редко 3,4 мас.%), которые возрастают с увеличением в минерале Fe, а также  $Al^{VI}$ . За исключением породообразующего пироксена и содержащихся в мелилите микролитов и кристаллических фаз из включений (см. табл. 7, ан. 1, 4, 5, 19), все остальные пироксены обогащены  $TiO_2$  — от 0,5 до 1,5 мас.%. Причем вышеупомянутые пироксены являются самыми высокомагнезиальными.

Кальсилит для пород рассматриваемого комплекса не характерен и как породообразующий минерал еще никем не обнаружен. В мелилитовых породах Крестовской интрузии он присутствует в виде ксеноморфных микролитов и кристаллических фаз во включениях, содержащихся в оливине и перовските кугдитов. Состав его (табл. 8) преимущественно предельно калиевый, но в оливине он существенно обогащен нефелиновым миналом, количество которого в микролитах достигает 33 %, а во включениях ~25 %. В последних, содержащихся в перовските-матрице, кальсилит ассоциирует с пироксеном, магнетитом и джерфишеритом, реже с комбеитом. А во включениях из оливина он отмечается совместно с перовскитом, рудной фазой и остаточным стеклом. В состав кальсилита входит около 3—5 % FeO, который, вероятно всего, компенсирует недостаток Al в структуре минерала. В его составе отмечаются также изоморфные примеси CaO (0,1—0,5 мас.%) и BaO (0,1—0,5 мас.%).



Таблица 6.

Химический состав флогопита, мас. %

Оксид	Породообразующий минерал																	Микролит							Фаза из включений													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17				
SiO <sub>2</sub>	40,42	41,05	39,96	39,59	41,95	41,89	41,36	42,78	40,99	40,57	41,85	41,35	41,93	42,93	42,16	42,07	40,83	41,85	41,35	41,93	42,93	42,16	42,07	40,83	41,85	41,35	41,93	42,93	42,16	42,07	40,83	41,85	41,35	41,93	42,93	42,16	42,07	40,83
TiO <sub>2</sub>	2,14	1,58	0,82	0,81	0,00	0,00	0,00	0,00	0,22	0,21	0,27	0,29	0,00	0,00	0,00	0,00	1,05	0,27	0,29	0,00	0,00	0,00	0,00	1,05	0,27	0,29	0,00	0,00	0,00	0,00	1,05	0,27	0,29	0,00	0,00	0,00	1,05	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,83	13,73	13,96	14,22	12,45	12,62	12,71	12,57	11,89	12,18	11,19	10,89	10,31	9,86	10,85	9,78	10,90	11,19	10,89	10,31	9,86	10,85	9,78	10,90	11,19	10,89	10,31	9,86	10,85	9,78	10,90	11,19	10,89	10,31	9,86	10,85	9,78	10,90
FeO	4,28	3,73	5,11	5,23	1,35	1,13	1,16	1,32	5,15	4,64	6,32	9,88	3,80	5,53	3,61	4,13	5,79	6,32	9,88	3,80	5,53	3,61	4,13	5,79	6,32	9,88	3,80	5,53	3,61	4,13	5,79	6,32	9,88	3,80	5,53	3,61	4,13	5,79
MnO	0,00	0,03	0,03	0,04	0,00	0,00	0,00	0,06	0,04	0,03	—	—	0,08	0,09	0,08	0,07	0,04	—	—	0,08	0,09	0,08	0,07	0,04	—	—	0,08	0,09	0,08	0,07	0,04	—	—	0,08	0,09	0,08	0,07	0,04
MgO	24,90	24,98	25,35	25,30	28,65	28,44	29,06	28,29	24,92	24,76	24,07	22,17	27,67	24,41	28,37	27,02	25,52	24,07	22,17	27,67	24,41	28,37	27,02	25,52	24,07	22,17	27,67	24,41	28,37	27,02	25,52	24,07	22,17	27,67	24,41	28,37	27,02	25,52
CaO	0,00	0,00	0,19	0,10	0,07	0,02	0,05	0,05	1,05	2,15	0,24	0,27	0,28	0,71	0,20	0,70	—	0,24	0,27	0,28	0,71	0,20	0,70	—	0,24	0,27	0,28	0,71	0,20	0,70	—	0,24	0,27	0,28	0,71	0,20	0,70	—
Na <sub>2</sub> O	0,07	0,00	0,19	0,26	1,05	0,90	0,82	0,81	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00
K <sub>2</sub> O	10,15	9,88	9,59	9,56	9,19	9,23	9,16	9,71	9,97	9,86	10,37	10,23	10,76	9,80	10,61	9,74	10,47	10,37	10,23	10,76	9,80	10,61	9,74	10,47	10,37	10,23	10,76	9,80	10,61	9,74	10,47	10,37	10,23	10,76	9,80	10,61	9,74	10,47
BaO	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,27	0,17	0,40	0,32	0,17	—	—	0,27	0,17	0,40	0,32	0,17	—	—	0,27	0,17	0,40	0,32	0,17	—	—	0,27	0,17	0,40	0,32	0,17
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,00	0,14	0,06	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,84	0,00	0,00	0,29	0,00	0,00	0,00	0,84	0,00	0,00	0,29	0,00	0,00	0,00	0,84	0,00	0,00	0,29	0,00	0,00	0,00	0,84	0,00	0,00	0,29
Сумма	95,79	94,98	95,34	95,17	94,71	94,26	94,32	95,59	94,23	94,40	94,41	95,02	95,09	94,46	96,36	95,91	95,11	94,41	95,02	95,09	94,46	96,36	95,91	95,11	94,41	95,02	95,09	94,46	96,36	95,91	95,11	94,41	95,02	95,09	94,46	96,36	95,91	95,11
f	18,15	16,14	20,61	21,06	5,73	4,88	4,88	5,69	21,02	19,47	25,27	36,48	15,02	22,61	14,11	16,46	22,62	25,27	36,48	15,02	22,61	14,11	16,46	22,62	25,27	36,48	15,02	22,61	14,11	16,46	22,62	25,27	36,48	15,02	22,61	14,11	16,46	22,62
Количество ионов в пересчете на 11 (O)																																						
Si	2,856	2,906	2,845	2,757	2,929	2,951	2,911	2,973	2,959	2,948	3,026	3,015	2,995	3,061	2,970	3,042	2,943	3,026	3,015	2,995	3,061	2,970	3,042	2,943	3,026	3,015	2,995	3,061	2,970	3,042	2,943	3,026	3,015	2,995	3,061	2,970	3,042	2,943
Ti	0,111	0,085	0,085	0,042	0,000	0,000	0,000	0,000	0,013	0,013	0,018	0,018	0,000	0,000	0,000	0,000	0,061	0,018	0,018	0,000	0,000	0,000	0,000	0,061	0,018	0,018	0,000	0,000	0,000	0,000	0,061	0,018	0,018	0,000	0,000	0,000	0,000	0,061
Al	1,148	1,140	1,170	1,163	1,024	1,050	1,056	1,036	1,015	1,047	1,055	0,940	0,868	0,852	0,905	0,833	0,927	1,055	0,940	0,868	0,852	0,905	0,833	0,927	1,055	0,940	0,868	0,852	0,905	0,833	0,927	1,055	0,940	0,868	0,852	0,905	0,833	0,927
Fe	0,255	0,221	0,303	0,301	0,134	0,064	0,072	0,075	0,308	0,279	0,382	0,606	0,228	0,338	0,212	0,247	0,351	0,382	0,606	0,228	0,338	0,212	0,247	0,351	0,382	0,606	0,228	0,338	0,212	0,247	0,351	0,382	0,606	0,228	0,338	0,212	0,247	0,351
Mn	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,004	0,000	0,000	—	—	0,004	0,004	0,004	0,004	0,000	—	—	0,004	0,004	0,004	0,004	0,000	—	—	0,004	0,004	0,004	0,004	0,000	—	—	0,004	0,004	0,004	0,004	0,000
Mg	2,627	2,638	2,687	2,628	2,980	2,981	3,050	2,932	2,582	2,682	2,596	2,421	2,952	2,258	2,979	2,907	2,739	2,596	2,421	2,952	2,258	2,979	2,907	2,739	2,596	2,421	2,952	2,258	2,979	2,907	2,739	2,596	2,421	2,952	2,258	2,979	2,907	2,739
Ca	0,000	0,000	0,017	0,008	0,008	0,000	0,004	0,004	0,082	0,087	0,018	0,022	0,021	0,053	0,017	0,052	—	0,018	0,022	0,021	0,053	0,017	0,052	—	0,018	0,022	0,021	0,053	0,017	0,052	—	0,018	0,022	0,021	0,053	0,017	0,052	—
Na	0,017	0,000	0,026	0,042	0,143	0,127	0,110	0,109	0,000	0,000	0,018	0,000	0,000	0,018	0,000	0,000	0,000	0,018	0,000	0,000	0,018	0,000	0,000	0,000	0,018	0,000	0,000	0,018	0,000	0,000	0,000	0,018	0,000	0,000	0,018	0,000	0,000	0,000
K	0,910	0,894	0,871	0,854	0,823	0,830	0,828	0,860	0,920	0,916	0,955	0,948	0,988	0,913	0,956	0,894	0,962	0,955	0,948	0,988	0,913	0,956	0,894	0,962	0,955	0,948	0,988	0,913	0,956	0,894	0,962	0,955	0,948	0,988	0,913	0,956	0,894	0,962
Ba	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Cr	0,000	0,000	0,026	0,025	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,044	0,000	0,000	0,026	0,000	0,000	0,000	0,044	0,000	0,000	0,026	0,000	0,000	0,000	0,044	0,000	0,000	0,026	0,000	0,000	0,000	0,044	0,000	0,000	0,026

Примечание. Образцы: 5, 6, 17 — из кудритов, остальные — из меллилолитов. Флогопиты: 1, 2 — единичные крупные лейсты с вросками ильменита и джерфиллерита, 3, 4 — мелкочешуйчатый агрегат, 5—8 — крупные, возможно, перекристаллизованные лейсты совместно со стронцианитом из зоны замещения меллилита; 9, 10 — матрица для скелетных („ежистых“) выделений магнетита. Минерал-хозяин микролитов и включений: 9, 10, 13—16 — меллилит, 11, 12 — монтичеллит, 17 — оливин. Фазовый состав включений: 14 — Фл + Пир + Лар + С<sub>0</sub>, 15, 16 — Фл + Мгн + Р.ф. + Кр.ф. неопр. состава, 17 — Фл + Комб + Р.ф.; f = 100Fe/(Fe + Mg).

Таблица 7.

Химический состав пироксена, мас. %

Оксид	ПРД					Микролит					Фаза из включений											
	1	2	3	4*	5*	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19			
SiO <sub>2</sub>	53,28	50,13	51,26	53,30	54,48	51,45	53,15	49,82	53,78	53,61	51,17	50,33	52,46	49,53	53,67	52,93	51,69	53,06	54,13			
TiO <sub>2</sub>	0,00	1,85	1,52	0,02	0,00	1,23	0,62	1,50	0,41	0,99	0,54	0,70	0,56	1,09	0,61	0,73	0,93	1,09	0,00			
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,16	1,37	1,17	0,80	0,60	0,55	0,24	2,44	0,09	0,69	2,18	2,36	0,52	0,35	0,25	0,19	0,95	0,56	0,47			
FeO	1,99	9,51	4,93	2,32	2,15	4,13	2,74	6,42	4,26	3,37	10,36	11,04	3,53	6,24	2,59	5,72	4,35	3,49	1,77			
MnO	0,07	0,23	0,12	0,00	0,00	0,20	0,11	0,14	0,29	0,12	0,40	0,24	0,09	0,16	0,16	0,27	0,21	0,11	0,04			
MgO	17,69	11,59	14,90	16,87	17,69	15,23	17,68	13,95	14,86	16,29	9,92	8,90	16,20	16,58	15,10	14,91	14,79	15,24	16,79			
CaO	25,29	23,40	24,94	25,89	24,97	25,47	26,15	24,49	24,49	25,32	22,53	21,58	26,59	25,52	25,51	25,80	25,22	26,39	25,47			
Na <sub>2</sub> O	0,06	0,85	0,46	0,07	0,07	0,48	0,29	0,52	0,57	0,34	1,08	3,36	0,33	0,24	0,23	0,65	1,00	0,32	0,23			
K <sub>2</sub> O	0,00	0,81	0,04	0,02	0,20	0,04	—	0,07	0,06	0,05	0,05	0,07	0,16	0,07	0,33	0,00	1,06	0,09	0,03			
Сумма	98,58	99,32	99,35	99,32	100,16	98,83	101,01	99,37	98,84	100,82	98,28	98,58	100,38	99,84	98,48	101,25	100,19	100,38	98,99			
f	12,68	51,35	29,87	15,02	13,53	25,89	16,69	37,21	26,37	20,96	57,34	61,50	21,90	32,66	18,07	33,11	27,48	22,77	11,92			
							Количество ионов в пересчете на 6 (O)															
Si	1,983	1,915	1,917	1,980	1,950	1,932	1,937	1,877	2,001	1,954	1,967	1,948	1,935	1,868	1,998	1,950	1,934	1,952	1,989			
Ti	0,000	0,055	0,043	0,000	0,000	0,034	0,018	0,043	0,022	0,028	0,014	0,021	0,018	0,032	0,019	0,020	0,025	0,031	—			
Al <sup>IV</sup>	0,009	0,064	0,054	0,020	0,035	0,027	0,009	0,109	—	0,031	0,033	0,052	0,022	0,018	0,002	0,009	0,045	0,027	0,011			
Al <sup>VI</sup>	—	—	—	0,006	—	—	—	—	0,004	—	0,069	0,055	—	—	0,009	—	—	—	0,011			
Fe	0,057	0,303	0,153	0,064	0,101	0,128	0,083	0,202	0,134	0,103	0,335	0,356	0,108	0,195	0,080	0,175	0,137	0,108	0,055			
Mn	0,002	0,007	0,002	0,000	0,000	0,007	0,002	0,002	0,009	0,002	0,014	0,007	0,002	0,006	0,007	0,009	0,007	0,002	—			
Mg	0,963	0,661	0,830	0,958	0,921	0,850	0,961	0,786	0,827	0,885	0,568	0,514	0,890	0,934	0,838	0,820	0,825	0,833	0,922			
Ca	0,989	0,957	0,997	0,973	1,016	1,026	1,022	0,989	0,977	0,988	0,926	0,896	1,049	1,031	1,016	1,020	1,010	1,040	1,005			
Na	0,009	0,069	0,036	0,009	0,009	0,036	0,022	0,036	0,045	0,022	0,083	0,256	0,011	0,012	0,013	0,044	0,072	0,011	0,013			

Примечание. Образцы: 1, 19 — из мелилитов, остальные — из кудитов; ПРД — порообразующий пироксен. Минерал-хозяин микролитов и включений: 2, 3, 6—18 — перовскит, 4, 5, 19 — меллит. Фазовый состав включений: 6 — Пир + Р.ф. + щелочной сульфид, 7, 9, 13 — Пир + Кс ± Р.ф., 8 — Пир + Кс + Мгн + Со, 18 — Пир + Кс + Мгн + Ал, 10, 14, 15, 17 — Пир + Р.ф. + Со, 11 — Пир + Р.ф. + Джер, 12, 16 — Пир + Ал + Со, 19 — Пир + Фл + Лар + Со.

\* Двуминеральные агрегаты со скелетными („ежистыми“) выделениями магнетита.

**Комбеит** — редкий минерал щелочных пород. В кудитах он обнаружен в составе включений, присутствующих в оливине и перовските. Минерал бесцветный, в срезе имеет округло-призматическую форму. Во включениях в оливине он ассоциирует с флогопитом и рудной фазой, а в перовските — с рудной фазой и остаточным стеклом. Минерал содержит (см. табл. 8) 17—20 % Na<sub>2</sub>O. В оливине комбеит имеет примесь Mg и Fe, возможно, за счет минерала-матрицы. Расчетная его формула — Na<sub>4,378</sub>Ca<sub>3,518</sub>[Si<sub>6,008</sub>O<sub>16</sub>](OH,F)<sub>2</sub> — несколько отличается от стандартной, возможно, вследствие того, что не определялся F.

Пектолит обнаружен в мелилитолитах совместно с кальциевыми силикатами, с которыми образует буроватые радиально-лучистые шестоватые агрегаты. Отмечен также во включениях в перовските кудитов, где ассоциирует с кальцитом и магнетитом. Усредненный состав его (см. табл. 8) отвечает формуле Na<sub>0,986</sub>Ca<sub>2,042</sub>[Si<sub>2,914</sub>O<sub>8</sub>](OH).

Кальциевые силикаты присутствуют в виде шестоватых буроватых агрегатов в мелилитолитах, а также в составе раскристаллизованных включений в монтичеллите, меллите и перовските мелилитолитов и кудитов. Состав их (см. табл. 8) имеет небольшую сумму и плохо рассчитывается на формульные коэффициенты, возможно, из-за отсутствия определений F и OH. Преобладающая масса кальциевых силикатов предположительно представлена *ранкинитом* — Ca<sub>2,823</sub>[Si<sub>2,087</sub>O<sub>7</sub>], меньшая часть *ларнитом* — Ca<sub>1,908</sub>[Si<sub>1,044</sub>O<sub>4</sub>]. Подобные кальциевые минералы, близкие к составу ранкинита и ларнита, были обнаружены [7] в лапиллях карбонатитового вулкана Олдоиньо Ленгаи (Танзания). Во включениях ранкинит(?) и ларнит(?) ассоциируют с разными минералами: первый — с доломитом, джерфишеритом, апатитом, остаточным стеклом, последний — с флогопитом, пироксенном и остаточным стеклом.

Таблица 8. Химический состав кальсилита, комбеита, пектолита, кальциевых силикатов, апатита и магнетита, мас. %

Компонент	Кальсилит			Комбеит		Пектолит		Ранкинит(?)			Ларнит(?)		Апатит			Магнетит					
	Фаза из вкл.	2(6)	2(2)	1(1)	Фаза из вкл.	2(2)	Вкл.	ПРД	Фаза из включений	3(1)	4(2)	ПРД	Вкл.	Фаза из вкл.	2(2)	МК	Фаза из вкл.	2(1)	4(1)	МК	МК-СК
SiO <sub>2</sub>	38,47	37,47	37,31	40,70	49,44	50,60	53,81	52,29	39,38	42,83	42,49	42,51	34,27	1,32	1,09	1,20	0,22	0,03	0,03	0,02	0,43
TiO <sub>2</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,26	0,28	0,00	0,32	0,04	0,02	0,03	0,00	0,00	0,14	0,04	0,29	1,87	0,98	0,14	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	30,22	28,08	27,48	29,57	0,00	0,05	0,00	0,94	1,64	0,00	0,00	0,00	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,27	
FeO	3,05	3,66	4,49	4,68	2,30	0,02	0,11	0,70	0,60	0,28	0,20	0,03	0,75	0,70	0,10	0,04	87,44	80,95	85,86	87,13	
MnO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,02	—	—	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	—	0,58	1,01	0,32	0,25	
MgO	0,23	0,29	0,21	0,94	3,46	0,01	0,06	0,11	0,17	0,09	0,02	0,00	0,20	0,26	0,07	0,23	1,29	0,82	1,99	1,88	
CaO	0,11	0,55	0,42	0,02	25,24	28,66	34,71	36,59	45,13	53,90	53,46	54,52	58,59	51,40	54,77	53,51	0,85	2,11	0,71	0,95	
Na <sub>2</sub> O	4,41	0,75	0,11	12,50	17,18	19,74	9,24	7,75	0,03	0,03	0,01	0,00	0,62	0,39	0,15	0,06	0,03	0,00	0,00	0,00	
K <sub>2</sub> O	23,59	27,61	29,35	11,10	0,14	0,20	0,05	0,00	0,08	0,07	0,03	0,00	0,07	0,23	0,00	0,03	0,09	0,00	0,00	0,00	
BaO	0,13	0,27	0,11	—	0,08	0,07	0,10	0,00	0,14	—	0,06	—	0,07	—	0,07	—	0,07	0,02	0,00	0,00	
SrO	—	—	—	—	0,09	0,00	—	—	0,23	0,00	0,11	0,05	0,11	2,48	0,98	1,13	0,03	0,03	0,00	0,00	
Cl	—	—	—	—	0,04	—	—	—	—	0,03	0,00	0,02	—	0,00	—	0,03	—	—	—	—	
SO <sub>3</sub>	—	—	—	—	0,00	0,10	—	—	—	0,00	0,00	0,00	0,05	0,07	0,02	0,04	0,08	0,06	—	—	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	—	—	—	—	0,04	0,07	—	—	—	0,00	0,00	0,00	—	39,72	39,71	38,99	—	—	—	—	
Сумма	100,26	98,68	99,48	99,51	98,84	99,78	98,36	98,38	87,96	97,28	96,40	95,15	94,94	96,60	97,10	95,65	90,97	86,91	90,15	91,20	

Примечание. Вкл. — фазы из включений, ПРД — породообразующий, МК — микролиты, МК-СК — микровыделения скелетные.  
1 — 4 — минерал-хозяин включений и микролитов: 1 — оливин, 2 — перовскит, 3 — монтичеллит, 4 — меллит; в скобках — число анализов.

Апатит присутствует в меллитовых породах как аксессуарный минерал, в виде микролитов в монтичеллите и в виде дочерних фаз во включениях, содержащихся в оливине, монтичеллите и перовските. Во включениях из первых двух минералов он ассоциирует с рудной фазой, флогопитом и остаточным стеклом, а в перовските присутствует совместно с пироксеном, ранкинитом(?) и остаточным стеклом. Состав апатита (см. табл. 8) содержит заметную примесь SrO (1—2,5 мас. %), FeO (до 0,7 %), MgO (0,1—0,2 %) и очень незначительные количества Cl и SO<sub>3</sub>. Фтор не определялся.

Магнетит является довольно распространенным породообразующим минералом меллитовых пород, образует ориентированные вроски и скелетные („ежистые“) микровыделения в меллите, а также часто присутствует в составе включений в минералах, причем иногда совместно с сульфидами. Как породообразующий минерал он либо присутствует в виде небольших округлых и полигональных зерен, либо совместно с перовскитом образует причудливые агрегаты. Интересны скелетные микровыделения или железистые розы магнетита в меллите, представленные сросшимися по определенным плоскостям пластинчатыми кристаллами, заключенными в микролиты монозерен флогопита или пироксена. Во включениях магнетит встречается: в перовските-хозяине — с кальсилитом, пироксеном, комбеитом, ранкинитом(?), джерфшеритом и апатитом; в меллите — с флогопитом и неидентифицированной рудной фазой; в оливине — с перовскитом и остаточным стеклом.

Все магнетиты в разной мере обогащены Ti, Mn, Mg, Ca (см. табл. 8). Следует отметить, что часть магнетитов (ориентированные вроски и скелетные микровыделения в меллите), по-видимому, правильнее относить к гематиту. Дело в том, что анализ рудного проводился по силикатной схеме. В качестве стандартов использовался гранат с 10,1 % FeO и ильменит с 37,98 мас. % FeO и 50,04 мас. % TiO<sub>2</sub>. Вследствие этого анализы получены с пониженными содержаниями Fe, что затруднило разграничение между магнетитами и гематитами.

Джерфшерит присутствует в породе в виде аксессуарного минерала и относится к характерным кристаллическим фазам расплавных включений, обнаруженных в монтичеллите и гранате, реже в перовските. Форма его обычно округлая, неправильная. Во включениях он образует



следующие ассоциации: в мелилите и монтичеллите — с ранкинитом(?) и остаточным стеклом, в перовските — с пироксеном, кальсилитом, комбеитом и магнетитом, в гранате — с монтичеллитом и кальцитом. Усредненный состав джерфшерита может быть представлен формулой  $K_{6,00}(Co_{0,45}Cu_{0,70})(Fe_{18,58}Ni_{4,91})S_{26,00}Cl_{1,00}$ , т. е. в отличие от стандартного в нем совершенно отсутствует Na, но отмечаются заметные количества Co и Cl.

Джерфшерит относится к редким минералам [18—20]. В щелочных породах он отмечен в карбонатных обособлениях фергусит-порфиров Восточного Памира [18] и мелилитолитах Кугдинского массива, где присутствует в виде дочерней фазы во включениях в мелилите [20]. В последнем случае, наиболее близком к рассматриваемому нами объекту, джерфшерит ассоциирует с пирротинитом, пентландитом, форстеритом, диопсидом, монтичеллитом, флогопитом, волластонитом, нефелином, содалитом, комбеитом, кальцитом, Na-K-Ca карбонатами и гидратированными Са-силикатами. Полагают [20], что джерфшеритсодержащая ассоциация формировалась из первичных мелилититовых расплавов, обогащенных карбонатами и щелочами, которые в условиях сверхзакрытой системы включений претерпели фракционирование от магматических до постмагматических этапов в температурном интервале от >1000 до 500 °С.

Пирротин отмечен в мелилите в составе расплавного включения, где образует ассоциацию с неидентифицированными бесцветными и рудными кристаллическими фазами и остаточным стеклом. Минерал имеет округлую, слегка ограниченную форму. В его составе отмечаются небольшие количества Ni (до 0,7 мас.%), Co (около 1,3 мас.%) и Cu (до 2 мас.%). Усредненный состав пирротина отвечает формуле  $Fe_{1,00}Co_{0,010}Ni_{0,021}Cu_{0,025}S_{1,027}$ .

Карбонатные минералы в рассматриваемых породах представлены кальцитом, доломитом и стронцианитом. Все они присутствуют в монтичеллите-хозяине: часто в виде микролитов, реже являются дочерними фазами расплавных включений. Кальцит обычно до 0,1—0,5 % обогащен SrO, нередко —  $SO_3$ , а также содержит до 0,6 % FeO и 1—6,5 % MgO. Стронцианит в отличие от широко распространенных своих аналогов содержит очень высокие количества Са и соотношения Са к Sr у него пониженные — до 1:2,6.

## МЕТОДЫ ТЕРМОБАРОГЕОХИМИИ

Среди многочисленных методов изучения включений нами использовались методы минералотермометрии, микрозондовый и хроматографический анализы.

*Метод минералотермометрии* был применен для выяснения агрегатного состояния минералообразующей среды и определения температуры ее консервации минералом-хозяином, а также гомогенизации и закалки содержимого включений с целью последующего определения его состава под микроскопом. Для нагревания включений использовалась совмещенная с микроскопом микротермокамера с силитовым нагревателем, позволяющая нагревать включения до 1400—1450 °С с точностью до  $\pm 15$  °С. Эталонировка камеры осуществлялась по отчетливо фиксируемым точкам плавления химически чистых солей и металлов, помещенных в ее рабочую точку. Наблюдения под микроскопом позволяли проследить все фазовые переходы внутри включений, установить начало и конец плавления кристаллических фаз, определить температуру исчезновения газового пузыря, т. е. температуру гомогенизации содержимого включений.

С помощью *микрозондового анализа* был выяснен химический состав содержимого расплавных включений. Анализ производился с помощью рентгеноспектрального микроанализатора „Самебах-Місго“. При съемке диаметр зондового пучка не превышал 2—3 мкм, ускоряющее напряжение составляло 20 кВ, ток 40 нА. В качестве стандартов использовались искусственные гомогенные стекла и минералы со строго установленными содержаниями отдельных элементов и составом, близким к составу анализируемых образцов. Точность анализов составляла 1,5—2 %. Определения повторялись не менее 2 раз для каждой точки.

*Хроматографический метод* использовался для анализа валового состава флюидной фазы включений. Извлечение газов осуществлялось с помощью взрывания включений при их перегреве в вакуумных системах (оператор Л. Н. Фомина).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕРМОБАРОГЕОХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Включения расплава были обнаружены как в мелилитолитах, так и в кугдитах. В одноименных минералах обеих пород форма, размер, фазовый состав включений оказались тождественными. Наибольшее количество включений присутствовало в перовските: до 20—30 включений в одном небольшом зерне; наименьшее — единичные включения были отмечены в оливине и гранате. В мелилите и монтичеллите включения располагаются неравномерно: стерильные от включений зоны чередуются с насыщенными включениями.

В перовските отмечаются только первичные расплавные включения. Они имеют изометричную, округлую, удлинено-округлую, редко неправильную форму; размер их колеблется от первых

Таблица 9. Химический состав стекол включений из перовскита меллилолитов и кудритов, мас. %

№ п/п	Фазовый состав включений	Объект исследования	n	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	BaO	SrO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	Сумма
1	C <sub>r</sub> + P.ф.	C <sub>r</sub>	2	32,87	5,26	5,29	13,99	0,21	8,33	21,35	1,43	3,90	0,10	0,03	0,96	0,24	93,96
2	C <sub>r</sub>	C <sub>r</sub>	1	32,01	3,96	6,11	10,76	0,23	5,66	16,84	6,14	6,36	0,40	0,28	1,77	2,25	92,74
3	C <sub>r</sub>	C <sub>r</sub>	1	30,69	4,56	5,58	13,14	0,24	6,14	16,90	6,22	5,89	0,37	0,34	1,76	3,37	93,19
4	C <sub>r</sub>	C <sub>r</sub>	1	33,20	10,69	6,13	9,06	0,25	5,77	20,39	5,81	3,68	0,26	0,40	1,50	0,34	97,49
5	C <sub>1</sub> + C <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>	1	31,00	4,12	6,04	14,99	0,28	7,00	14,32	3,79	6,32	0,28	0,21	1,87	0,47	91,69
	То же	C <sub>2</sub>	1	17,40	3,73	6,51	14,84	0,28	6,52	19,25	4,03	6,55	0,41	0,55	1,93	1,45	83,45
6	C <sub>1</sub> + C <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>	1	36,78	4,37	6,38	8,51	0,26	6,57	20,77	3,47	6,02	0,46	0,27	2,32	0,47	96,63
	То же	C <sub>2</sub>	1	16,73	5,12	2,77	5,32	0,09	2,57	21,60	4,15	6,72	0,52	0,17	0,89	4,05	70,63
7	C <sub>1</sub> + C <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>	1	35,46	6,74	6,14	9,15	0,24	6,38	22,20	2,42	5,83	0,51	0,28	2,20	0,52	98,07
	То же	C <sub>2</sub>	1	2,97	4,83	0,33	0,72	0,00	0,70	24,01	4,00	17,50	0,00	0,22	0,07	4,56	59,96
8	C <sub>и</sub>	C <sub>и</sub>	2	36,47	0,52	4,40	6,72	0,44	9,52	23,35	4,93	9,14	0,00	0,38	0,53	0,08	96,48
9	Kc + C <sub>о</sub>	C <sub>о</sub>	2	38,82	1,36	4,00	8,76	0,19	4,67	22,53	1,88	3,75	0,93	1,02	0,70	0,78	89,39
10	Пир + Ап + C <sub>о</sub>	C <sub>о</sub>	2	38,03	1,39	2,77	7,77	0,18	2,97	27,90	0,18	0,15	0,00	0,09	0,04	0,22	81,69
11	Лар + Ап + C <sub>о</sub>	C <sub>о</sub>	2	39,92	0,42	2,75	2,97	0,03	13,12	26,79	0,09	0,17	0,18	0,18	0,08	0,40	87,11

Примечание. Стекла включений: C<sub>1</sub> + C<sub>2</sub> — закаленные после прогрева расслоенные; C<sub>и</sub> — исходные непрогретые стекловатые включения; C<sub>о</sub> — остаточное стекло в частично раскристаллизованных включениях. Породы: 1—7 — меллилолиты, 8—11 — кудриты. n — число анализов.

единиц до 20—50 мкм. Содержимое включений частично или полностью раскристаллизовано. Включения черные, иногда с небольшими более светлоокрашенными участками. Фазовый состав непрогретых включений в проходящем свете микроскопа плохо просматривается, но в отраженном свете во вскрытых включениях отчетливо выделяются индивидуальные фазы. Среди них при зондовом анализе диагностированы (см. табл. 7, 8) пироксен, кальсилит, рудные минералы, а также апатит, комбеит, ранкинит(?). Среди рудных чаще отмечается магнетит, реже — джерфшерит. Большинство дочерних минералов во включениях имеют ксеноморфные очертания. В редких случаях пироксен и комбеит обнаруживают некоторые элементы огранки. Магнетит и джерфшерит иногда имеют округлую форму. Присутствующее во включениях остаточное стекло выполняет либо межзерновое пространство, либо занимает обособленный объем, позволяющий анализировать его на микрозонде.

При нагревании в микротермокамере содержимое включений постепенно начинает просветляться, около 1000—1050 °С становится серовато-бурым. Создается впечатление, что стенки вакуолей включений покрыты непрозрачным веществом, которое при нагревании либо становится более прозрачным, либо исчезает. Около или несколько ниже этой температуры происходит отчетливое обособление круглого газового пузыря. При 1120—1160 °С отмечается полное плавление кристаллических фаз. При 1230—1250 °С часть включений гомогенизируется, другая — остается гетерогенной. После закалки в некоторых включениях фиксируется расслоение (несмесимость) расплава на две составляющие — силикатную с небольшим содержанием солей и солевую, обогащенную кремнеземом (табл. 9, ан. 5—7). Соотношение несмесимых фаз преимущественно 1:10, но иногда отмечаются отклонения до 1:5. Можно допустить, что захватываемый включениями расплав был не полностью гомогенным и частичное обособление солевой фазы от силикатного расплава началось при несколько более высоких температурах. Возможно поэтому гомогенизировать содержимое некоторых включений не удалось, но, исходя из проведенных экспериментов, можно однозначно утверждать, что перовскит кристаллизовался из расплава при температурах не ниже 1230 °С.

Состав гомогенизированных при 1230 °С нерасслоенных включений оказался (см. табл. 9, ан. 1—4) малокремнистым (30—33 мас. % SiO<sub>2</sub>), обогащен CaO (17—21 мас. %), щелочами (в среднем до 11 мас. %, часто с преобладанием K над Na), содержал до 5—6 мас. % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 6—8 мас. % MgO, а также

до 2—3 мас. %  $\text{SO}_3$  и, по-видимому, какое-то количество (ориентировочно не ниже 5—6 мас. %)  $\text{CO}_2$ . В остаточных стеклах (см. табл. 9, ан. 9—11) из частично раскристаллизованных включений существенно возрастают количества  $\text{SiO}_2$  (до 38—39 мас. %),  $\text{CaO}$  (до 26—27) и понижаются количества  $\text{Ti}$ ,  $\text{Al}$ ,  $\text{Fe}$ , щелочей, отчасти  $\text{Mg}$ , что объясняется выпадением из законсервированного расплава дочерних минералов. Промежуточный состав между гомогенизированными и остаточными стеклами отмечен у исходных непрогретых стекол в непрозрачных включениях (там же, ан. 8). Состав силикатной части расслоенных включений (см. табл. 9, ан. 5—7  $\text{C}_1$ ) отличается от гомогенных стекол неотчетливо выраженными вариациями основных петрогенных компонентов. В целом, если не учитывать значительную сумму щелочей и высокую роль в ней калия, то состав прогретых и непрогретых стекол из включений близок составу мелилититовых расплавов, обнаруженных [10] во включениях из мелилита и перовскита мелилитолитов Гардинер-комплекса (Гренландия). Он близок также к составу мелилититовых кольцевых даек того же комплекса, а также мелилититам поля Олдоиньо Ленгаи в Танзании [21]. С другой стороны, если принять во внимание преобладающую роль калия в сумме щелочей в стеклах включений, а также присутствие модалного кальсилита в виде микролитов и кристаллических фаз из включений в оливине и перовските кугдитов, то с определенными допущениями можно провести петрохимические параллели между полученными результатами и породами камафугитового ряда, например, катунгитами и угандитами Западной рифтовой зоны Восточной Африки [22] или мелилитолитами из камафугитовой провинции Пиан ди Целли в Италии [23].

Совершенно иной состав отмечается в обособившихся порциях расплава, обогащенных солями. Они содержат (см. табл. 9, ан. 5—7  $\text{C}_2$ ) в несколько раз меньше (3—17,5 мас. %)  $\text{SiO}_2$ , но гораздо больше  $\text{Ca}$ , щелочей (при абсолютном преобладании  $\text{K}$  над  $\text{Na}$ ), серы и  $\text{CO}_2$ . Количество последнего, по-видимому, может достигать 30—40 мас. %, если ориентироваться на разницу определенной во включениях суммы от 100 %. Этот состав довольно близок составу некоторых карбонатитов, например, Форт-Портала в Уганде [22, 24], от которого отличается лишь более низкими содержаниями извести и значительными — щелочей, особенно  $\text{K}$ .

**Включения в мелилите** также имеют округлую и неправильную форму, размер их достигает 10—30 мкм, содержание частично и полностью раскристаллизовано. Газовый пузырь обычно просматривается не отчетливо. Среди кристаллических дочерних фаз установлены: пироксен, флогопит, ранкинит(?), ларнит(?), магнетит, джерфишерит и пирротин (см. табл. 6—8). Пироксен светло-зеленого цвета, гипидиоморфен; флогопит бесцветен или имеет слабый зеленоватый оттенок; ларнит(?) и ранкинит(?) бесцветны, ксеноморфны; рудные минералы непрозрачны, окрашены в черные цвета. Джерфишерит в срезе имеет неправильную треугольную форму, пирротин — близкую к квадратной, магнетит — округло-неправильную. Следует также отметить присутствие в составе некоторых включений солевых агрегатов бурого и зеленоватого цвета.

При нагревании плавление солевых фаз начинается около 640—680 °С и заканчивается при 760—780 °С. При этих температурах четко обособляется один или несколько газовых пузырей. При 800—845 °С в некоторых включениях просматриваются две жидкие фазы — зеленоватая солевая в центре и бурая силикатная, образующая вокруг нее кайму. Их соотношения непостоянны и колеблются от 1:1 до 1:10, что свидетельствует о консервации включениями изначально гетерогенного расплава. Сгомогенизировать расслоенные включения не удалось из-за их повсеместной разгерметизации при высоких температурах. Там, где несмесимость расплавов четко не проявилась, включения гомогенизировались при 1235—1160 °С.

Химический состав прогретых расслоенных включений (табл. 10), очень близок составу аналогичных включений в перовските (см. табл. 9), отличаясь от него лишь малыми количествами  $\text{TiO}_2$ . Здесь также силикатная составляющая малокремнистая, обогащена  $\text{Ca}$ , щелочами, содержит 7—12 мас. %  $\text{MgO}$ . Кроме того, здесь отмечено повышенное количество (до 3 мас. %)  $\text{Cl}$ . Солевая часть включений отвечает также щелочным карбонатитовым расплавам, в которых явно преобладает калий над  $\text{Na}$ , содержатся высокие количества  $\text{Cl}$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{BaO}$ . Состав же гомогенизированных при 1210 °С нерасслоенных включений (см. табл. 10, ан. 7) более высококремнистый (44,4 мас. %  $\text{SiO}_2$ ), содержит более значительные количества (до 16,7 мас. %)  $\text{MgO}$  и более низкие — щелочей, хотя здесь также отмечается явное преобладание  $\text{K}$  над  $\text{Na}$ . По-видимому, этот расплав был захвачен на более поздней стадии кристаллизации мелилита, когда солевой расплав уже успел пространственно обособиться от силикатного.

В химическом составе мало раскристаллизованных непрогретых включений, в которых помимо стекла присутствует только рудная фаза (см. табл. 10, ан. 8—10), содержится также много (16—19 %)  $\text{MgO}$ , 6—8 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 20—25 %  $\text{CaO}$ , из щелочей присутствует преимущественно  $\text{K}_2\text{O}$  (до 4,5—5,5 %). По мере кристаллизации законсервированного расплава и выделения из него дочерних минералов, его состав (остаточный) (там же, ан. 11—14) становится менее магниезиальным и менее глиноземистым.

В **монтчеллите** обнаружены первичные силикатно-солевые и вторичные солевые расплавные включения.



Химический состав стекол включений в мелилите меллилолитов, мас. %

Таблица 10.

№ п/п	Фазовый состав включений	Объект исследования	n	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	BaO	SrO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	Cl	Сумма
1	C <sub>1</sub> + C <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>	2	37,62	0,04	6,71	1,36	0,02	9,50	30,98	2,49	3,23	0,19	0,33	0,10	0,57	3,65	96,79
2	То же	C <sub>2</sub>	1	7,59	0,03	0,48	0,78	0,05	7,79	22,15	5,01	13,69	0,75	0,38	0,02	1,02	6,62	66,36
3	C <sub>1</sub> + C <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>	2	33,29	0,00	1,90	2,85	0,05	10,35	30,73	1,15	1,15	0,24	0,59	0,09	1,29	0,03	82,71
4	»	C <sub>2</sub>	2	6,27	0,04	0,27	0,92	0,01	1,42	23,52	8,69	11,59	1,30	0,25	0,71	6,40	2,20	63,59
5	C <sub>1</sub> + C <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>	2	31,66	0,00	0,90	1,82	0,02	12,02	30,58	2,51	0,34	0,07	0,75	0,07	0,00	0,04	80,78
6	»	C <sub>2</sub>	1	18,23	0,07	3,73	0,40	0,00	7,60	17,42	2,01	9,04	0,33	0,00	0,07	0,17	4,61	63,68
7	C <sub>r</sub>	C <sub>r</sub>	2	44,37	0,05	3,18	7,65	0,08	16,69	20,53	0,31	1,75	0,15	0,00	0,05	0,00	0,0	94,81
8	P.ф. + C <sub>o</sub>	C <sub>i</sub>	1	42,96	0,00	7,87	2,17	0,08	19,6	20,34	1,11	5,49	0,34	0,00	0,02	0,00	—	98,03
9	Прт + C <sub>o</sub>	C <sub>ii</sub>	1	43,74	0,00	6,12	3,22	0,03	19,14	20,50	0,62	4,51	0,16	0,50	0,03	0,06	—	98,63
10	P.ф. + C <sub>o</sub>	C <sub>ii</sub>	2	40,74	0,00	7,03	2,37	0,05	16,26	25,81	0,03	5,53	0,45	0,00	0,06	0,09	—	98,42
11	Пир + Фл + Лар + C <sub>o</sub>	C <sub>o</sub>	1	36,79	0,00	2,65	2,10	0,00	7,84	37,57	0,81	4,54	0,08	0,08	0,14	0,11	—	92,81
12	Ранк + Джер + C <sub>o</sub>	C <sub>o</sub>	1	40,76	0,00	3,85	1,99	0,06	8,82	12,39	0,17	4,46	0,24	0,35	0,06	0,21	—	73,39
13	Фл + P.ф. + C <sub>o</sub>	C <sub>o</sub>	1	39,71	0,00	2,34	0,98	0,03	5,22	37,88	0,00	1,61	0,20	0,07	0,04	0,19	—	88,30
14	Фл + Мгн + C <sub>o</sub>	C <sub>o</sub>	1	42,93	0,00	4,29	1,66	0,04	13,77	28,10	0,00	4,22	1,13	0,00	0,06	0,02	—	96,25

Первичные силикатно-солевые включения располагаются в зернах монтичеллита бессистемно, имеют призматическую, частично ограниченную, реже неправильную форму. Они грубо и тонко раскристаллизованы, неравномерно окрашены из-за беспорядочного сочетания бесцветных и темноокрашенных участков. В наиболее грубо раскристаллизованных включениях диагностированы джерфишерит, ранкинит(?), доломит (см. табл. 8). Ранкинит(?) бесцветный с некоторыми элементами огранки. Джерфишерит отмечается в виде округлых зерен черного цвета, непрозрачный. Доломит бесцветен, ксеноморфен.

Солевой агрегат, присутствующий во включениях, обычно темно-, буроокрашенный, тонко раскристаллизованный. Газовый пузырь, как правило, зажат между соевыми фазами, деформирован. Плавление солей начинается около 400 °С. Полное расплавление кристаллических фаз происходит при 740 °С. Гомогенизация содержимого включений, по видимому, осуществляется при 990—1090 °С. Точно зафиксировать момент полной гомогенизации не удалось из-за почти повсеместной разгерметизации включений.

Микронзондовый анализ показал, что тонко раскристаллизованные силикатно-солевые включения (табл. 11, ан. 1—3) содержат заметные количества Si, Mg, Fe, Ca, несколько обогащены Al, щелочами и S. Количество CO<sub>2</sub>, судя по недостающей до 100 % суммарной разнице, достигает 13—20 %. Близкие результаты получены при анализе (там же, ан. 4) более грубо раскристаллизованных включений, содержащих в своем составе ранкинит и джерфишерит.

Вторичные солевые включения приурочены к трещинам в минерале, имеют округлую и неправильную форму. Они всегда раскристаллизованы, пятнисто окрашены. Наиболее крупной и различимой под микроскопом фазой является магнетит. В одном включении обнаружен бесцветный кристаллик галита, в срезе имеющий квадратную форму. Плавление солей начинается около 370 °С и заканчивается при 530 °С. Гомогенизация включений осуществляется в расплав при температуре 680—860 °С.

Состав солевых включений, несмотря на сравнительно близкие температуры гомогенизации, существенно отличается друг от друга. Среди них отмечаются щелочные хлоридные, щелочные карбонатные, карбонатные и смешанные щелочные сульфатно-карбонатные разности (см. табл. 11, ан. 5—10). Общей характерной особенностью состава этих включений является: 1) незначительные количества в них SiO<sub>2</sub> (преимущественно ниже 3, реже до 16—18 мас. %); 2) практически полное отсутствие Al и Ti; 3) существенные количества Ca, которые заметно преобладают над суммой Mg и Fe; 4) резкие (от 45 до 1 %) колебания щелочей, количества которых находятся в прямой зависимости от содержания Cl во включениях; 5) заметные количества Sr и высокие (до 30—40 %) CO<sub>2</sub>, если исходить из недостающей до 100 % суммарной разницы. В целом усредненный состав солевых включений отвечает составу щелочных карбонатитовых расплавов. Можно полагать, что солевые распла-

Таблица 11. Химический состав силикатно-солевых и солевых включений в монтичеллите и гранате кудитов, мас. %

№ п/п	Минерал-хозяин	Тип включения	Анализируемый объект	n	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SrO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	Cl	Сумма
1	Монт	ССол	ССол	2	29,09	0,00	2,47	12,67	2,89	31,18	3,11	0,00	0,24	0,03	1,89	—	84,63*
2	»	»	»	1	27,10	0,03	2,18	7,89	11,89	33,81	0,00	0,04	0,00	0,06	1,44	0,14	87,09
3	»	»	»	1	24,20	0,00	0,09	4,76	11,07	19,70	7,40	3,86	0,00	0,07	2,26	5,87	79,32
4	»	»	С <sub>0</sub>	1	22,09	0,03	0,00	10,59	11,84	28,18	2,89	2,57	0,12	0,03	5,36	0,33	84,14
5	»	Сол	Сол <sub>Г</sub>	1	18,36	0,00	0,00	2,50	4,81	15,83	0,49	0,10	21,02	0,10	0,36	0,62	64,20
6	»	»	»	1	16,35	0,00	0,16	7,83	6,16	23,34	0,56	0,58	0,00	0,03	1,35	0,69	57,05
7	»	»	»	1	3,74	0,05	0,00	2,42	2,12	27,48	18,49	4,64	1,26	0,27	2,39	3,02	65,90
8	»	»	»	1	2,17	0,00	0,02	0,81	0,94	2,75	44,57	1,21	0,04	0,00	0,43	45,76	98,72
9	»	»	»	1	2,87	0,00	0,03	0,63	0,99	47,18	0,83	0,15	0,12	0,09	0,35	0,94	54,14
10	»	»	»	1	1,65	0,00	0,05	0,85	0,99	17,23	6,15	11,13	0,62	0,12	3,71	9,20	51,72
11	Гранат	ССол	ССол	1	29,42	0,14	0,23	10,97	10,52	27,49	0,08	0,20	0,00	0,08	6,14	0,15	87,90
12	»	»	С <sub>0</sub>	1	9,49	0,00	0,00	1,19	0,80	54,65	0,03	0,01	0,10	0,10	0,60	0,03	67,02

Примечание. Тип включений: ССол — силикатно-солевой, Сол — солевой, Сол — после прогрева и гомогенизации солевых включения ( $T_{\text{гом}} = 680-860^\circ\text{C}$ ), С<sub>0</sub> — остаточный агрегат в непрогретых ССол включениях. Фазовый состав включений: 1—3, 5—10 — тонкокристаллический с неидентифицированными фазами, 4 — Грант + Джер + С<sub>0</sub>, 11 — Монт + С<sub>0</sub>, 12 — Монт + Джер + С<sub>0</sub>.

\* В сумме учтено также 0,27 МпО и 0,51 мас. % ВаО.

вы являются производными силикатно-солевых расплавов, но механизм отделения их друг от друга пока не ясен.

В гранате *включений* немного. Они достаточно крупные — до нескольких десятков микрон, форма их неправильная — удлиненно-сглаженная. Содержимое включений состоит из нескольких дочерних фаз и тонко раскристаллизованного агрегата. Среди дочерних фаз отмечаются монтичеллит и джерфишерит (см. табл. 3, 8). Монтичеллит бесцветный, гипидиоморфный; джерфишерит имеет округлую форму, непрозрачный. Состав тонко раскристаллизованных агрегатов отвечает составу вторичных солевых карбонатных включений в монтичеллите, в разной степени обогащенных Si (см. табл. 11, ан. 11, 12). В целом, исходя из фазового состава (силикатной дочерней фазы и остаточного карбонатного агрегата), включения в гранате следует отнести к силикатно-солевым, аналогичным первичным включениям в монтичеллите. Эксперименты по гомогенизации включений не проводились.

В оливине *включения* неправильной формы, полностью раскристаллизованы. Среди дочерних минералов в их составе выявлены монтичеллит, флогопит, комбеит, магнетит, перовскит и кальсилит (см. табл. 3, 6, 8). Монтичеллит бесцветный, гипидиоморфный; флогопит образует слабоокрашенные чешуйчатые пластины; комбеит бесцветен, частично огранен; перовскит представлен изометричными бурыми кристаллами, кальсилит — бесцветными ксеноморфными зернами; магнетит также ксеноморфный. Эксперименты по гомогенизации включений не проводились.

Флюидный режим. Результаты хроматографического исследования показали, что на температурном отрезке от 900 до 300 °С, т. е. на стадии кристаллизации солевых расплавов и гидротермальных растворов, основными составляющими флюидов были H<sub>2</sub>O и CO<sub>2</sub> (табл. 12). При кристаллизации солевых расплавов (около 900 °С) количества CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O были равными и самыми высокими — 3100 и 3200 мг/кг соответственно. В небольшом количестве (110 мг/кг) во флюиде присутствовала также СО. При понижении температуры количество флюидов резко сократилось, причем CO<sub>2</sub> более значительно, чем H<sub>2</sub>O. По-видимому, на этой температурной стадии осуществлялся процесс связывания CO<sub>2</sub> в карбонатные минералы, сопровождавшийся формированием карбонатитов.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ И ВЫВОДЫ

1. Исходя из термобарогеохимических исследований, формирование мелилитовых пород Крестовской интрузии происходило из магматических расплавов. Кристаллизация минера-

Таблица 12

Состав флюидной фазы включений в минералах мелилитовых пород

Порода	T, °C (нагревания)	Содержание, мг/кг						
		CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> —C <sub>6</sub>	Сумма
Мелили- толит	300	50	640	—	—	—	—	690
	600	460	1800	9	6	4	8	2287
	900	3100	3200	6	110	1	2	6419
	Сумма	3610	5640	15	116	5	10	9396
Кугдит	300	30	1100	—	—	—	—	1130
	600	150	1600	2	2	3	3	1760
	900	320	1400	—	7	0,8	1	1728,8
	Сумма	500	4100	2	9	3,8	4	4618,8

лов осуществлялась в следующей последовательности: перовскит (1250—1230 °C) → мелилит (1235—1160 °C) → монтичеллит (1090—990 °C).

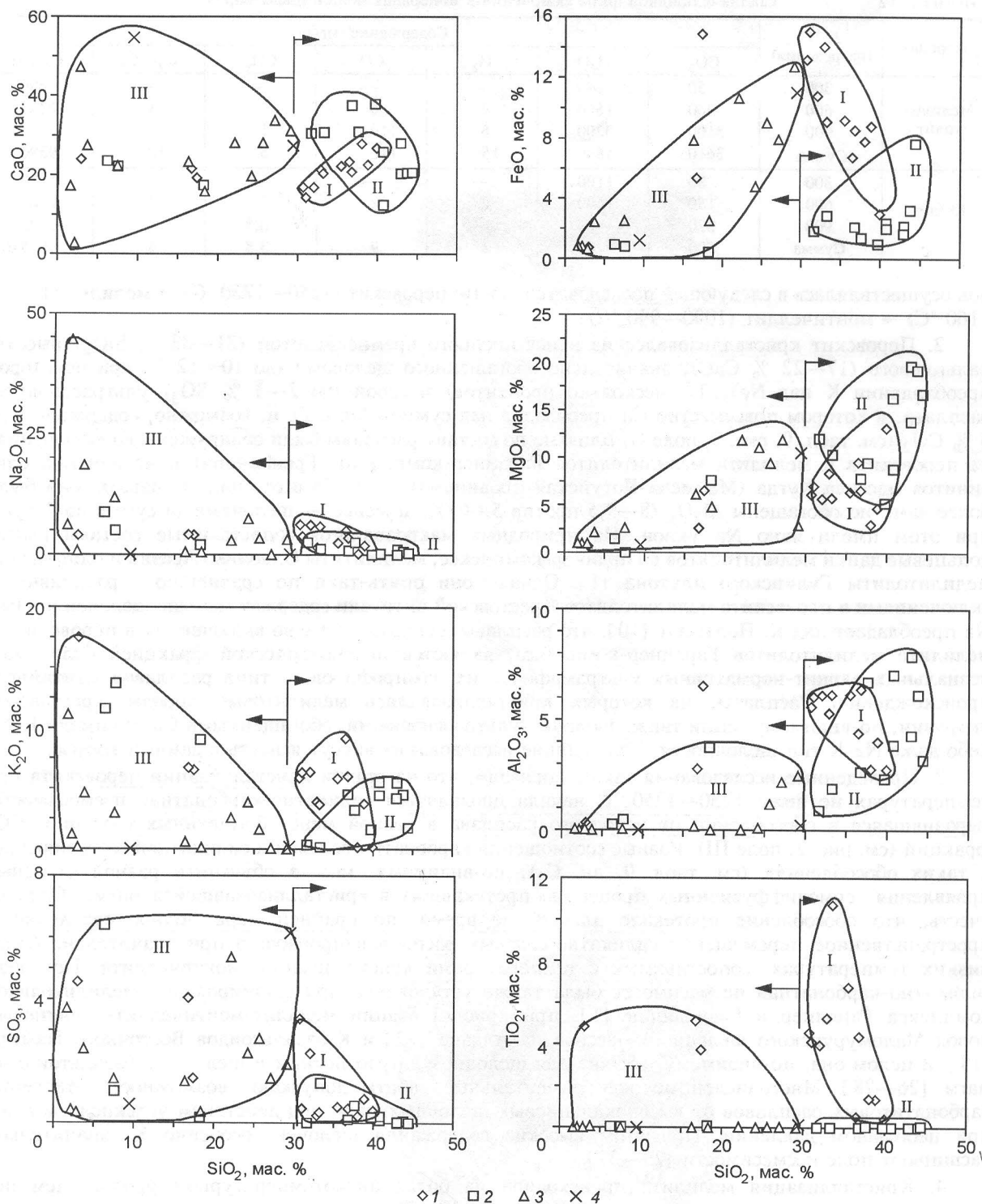
2. Перовскит кристаллизовался из ненасыщенного кремнекислотой (31—33 % SiO<sub>2</sub>) высококальциевого (17—22 % CaO), значительно обогащенного щелочами (до 10—12 % при некотором преобладании К над Na), Ti (несколько процентов) и серой (до 2—3 % SO<sub>3</sub>) ультраосновного расплава, в котором повсеместно Ca преобладал над суммой Mg и Fe и, возможно, содержалось до 5 % CO<sub>2</sub> (см. табл. 9, рис. 2, поле I). Близкие по составу расплавы были обнаружены во включениях из перовскита и мелилита мелилитолитов Гардинер-комплекса (Гренландия) и из оливина оливинитов массива Кугда (Маймеча-Котуйская провинция) [10]. Но в отличие от наших, они были более заметно обогащены Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (8—9,5 против 5—6 %) и менее — щелочами (в сумме до 7 %) и при этом имели явно Na уклон. Из природных макроаналогов сопоставимые составы имеют кольцевые дайки мелилитолитов в Гардинер-комплексе, мелилититы Олдоиньо Ленгай и оливиновые мелилитолиты Гулинского плутона [1]. Однако они опять-таки по сравнению с расплавленными включениями в перовските мелилитолитов Крестовской интрузии содержат меньше щелочей и в них Na преобладает над К. Полагают [10], что расплавы, обнаруженные во включениях в перовските и мелилите мелилитолитов Гардинер-комплекса, являются низкобарической фракцией более магнезиальных ларнит-нормативных ультрамафических лампрофирового типа расплавов мантийного происхождения. Расплавы, из которых кристаллизовались мелилитовые породы Крестовской интрузии, по-видимому, были также щелочно-ультраосновными, обогащенными Ca, но имели К-Na либо даже Na-K тип щелочности. Дальнейшие исследования внесут ясность в данный вопрос.

3. Проведенные исследования также показали, что на стадии кристаллизации перовскита при температурах не ниже 1230—1250 °C начала проявляться силикатно-карбонатная несмесимость, выразившаяся в обособлении от исходного расплава в разной мере обогащенных солями и CO<sub>2</sub> фракций (см. рис. 2, поле III). Разные соотношения карбонатно-солевой и силикатной составляющих в таких обособлениях (см. табл. 9, ан. С<sub>2</sub>), по-видимому, можно объяснить разной степенью проявления термодиффузионных процессов, протекавших в кристаллизовавшейся магме. Следует учесть, что обособление протекало длительное время: по крайней мере полное отделение и пространственное перемещение силикатно-солевых расплавов произошло при значительно более низких температурах, сопоставимых с температурами кристаллизации монтичеллита. Подобная силикатно-карбонатная несмесимость была также установлена при формировании мелилитолитов комплекса Гардинер в Гренландии [10], при кристаллизации мелилит-монтичеллит-оливиновых пород Маломурунского щелочного массива на Алдане [25] и К-базальтоидов Восточного Памира [18]. В целом она, по-видимому, обычна для щелочно-ультраосновных и щелочных базальтоидных магм [26—28]. Многочисленные экспериментальные работы допускают возможность отделения карбонатитовых расплавов от высококальциевых щелочных магм под действием углекислоты даже при небольшом давлении. При этом высокие содержания щелочей, особенно К, значительно расширяют поле несмесимости [29—31].

4. Кристаллизация мелилита происходила на более низкотемпературном уровне, чем перовскита, но из расплава близкого состава (см. табл. 10). По-видимому, выделение перовскита лишь незначительно повлияло на состав магмы и соотношение в ней основных петрогенных компонентов. В процессе кристаллизации и фракционирования мелилита (см. рис. 2, поле II) потенциал Fe заметно упал, а Si и Al, наоборот, несколько возрос, количества Ca и Mg остались примерно на том же уровне, из щелочей — несколько уменьшились количества Na и увеличились — К. На стадии кристаллизации мелилита продолжалось разделение силикатной и солевой составляющих магмы. Кристаллизация мелилита протекала в условиях резко меняющейся фугитивности кислорода, о чем свидетельствует одновременное присутствие в составе включений сульфидов и оксидов железа — джерфшерита и магнетита.

5. После кристаллизации и фракционирования мелилита дальнейшая эволюция оставшегося силикатного расплава протекала весьма своеобразно. Высокий потенциал К в расплаве обеспечивал





**Рис. 2.** Распределение в законсервированных расплавах петрогенных компонентов относительно  $\text{SiO}_2$ .

Включения расплавов: 1 — в перовските, 2 — в мелилите, 3 — в монтчеллите, 4 — в гранате. Поля кристаллизации: I — перовскита; II — мелилита; III — силикатно-солевых карбонатитовых расплавов. Стрелками показано направление эволюции обособившихся в результате жидкостной несмесимости силикатных и силикатно-солевых карбонатитовых расплавов.

связывание присутствующих Al-Si радикалов в молекулы кальсилита и флогопита, а также обеспечивал кристаллизацию в условиях восстановительной среды джерфшерита, содержащего до 2 % Co, 8 % Cu и 15 % Ni. На этом этапе эволюции из расплава в закрытых условиях включений выпадал также пироксен. Сохранявшая исключительно высокий потенциал известь связывала оставшиеся количества Na в комбеит и пектолит, а также обеспечивала кристаллизацию весьма редких кальциевых силикатов, предположительно относящихся к ларниту и ранкиниту.

Выявленные нами особенности эволюции исходных силикатных расплавов в момент выделения мелилита и последующих за ним этапов магматической кристаллизации заметно отличаются от предполагаемых для других массивов Маймеча-Котуйской провинции. Так, Л. С. Егоров [1], принимавший турьяиты за состав исходной магмы, считал, что кристаллизация мелилита влечет за собой резкое падение количества извести и скачкообразное возрастание кремнекислоты при почти неизменном содержании алюмощелочных компонентов и магния в расплаве, что обеспечивает на более поздних магматических этапах появление щелочных пород Na-ряда.

Обнаруженные нами отличия, по-видимому, связаны с высоким потенциалом K в этих расплавах, сочетающимся с низкими количествами Al и чрезвычайно высокой активностью Ca, а также заметной ролью в них S, Cl и CO<sub>2</sub>.

6. Силикатно-солевые карбонатные расплавы, обособившиеся от исходной магмы в результате жидкостной несмесимости, первоначально (см. табл. 11, ан. 1—6) содержали довольно высокие количества SiO<sub>2</sub> (до 22—29 мас.%) и CaO (~30 %), заметные — глинозема (до 2 %) при существенных, хотя и варьирующих значениях щелочей, SO<sub>3</sub> и Cl (см. рис. 2, поле III). Количество CO<sub>2</sub> в них могло достигать 13—20 мас.%. Среди природных аналогов высокремнистый состав (12—17 мас.% SiO<sub>2</sub>) характерен для карбонатитов Форт-Портала в Уганде [22, 24]. Надо полагать, что воздействие этих высокоактивных и, по-видимому, легкоподвижных силикатно-солевых расплавов на ранние оливиновые и пироксеновые породы приводило к масштабным автотомасоматическим замещениям и возникновению на магматической стадии (около 1000 °C) монтичеллита и, вероятно, граната.

7. Состав силикатно-солевых расплавов по мере инфильтрации через окружающие породы заметно менялся, подвижность и активность ряда компонентов, прежде всего кремния, понижалась, а некоторых компонентов, наоборот, увеличивалась. Вероятно, на одном из этапов эволюции от силикатно-солевых обособились истощенные по кремнию солевые карбонатитовые расплавы, обогащенные щелочами, Cl и S (см. табл. 10, ан. 2, 4; табл. 11, ан. 7—10, 12, 14). Механизм и особенности их обособления требуют дальнейшей проработки. В Маймеча-Котуйской провинции включения карбонатитовых расплавов, практически лишенные силикатной составляющей, были также обнаружены в минералах Гулинского плутона: в апатите флогопит-пироксеновых пород [32], в перовските и кальциртите карбонатитов [33].

8. При кристаллизации солевых расплавов (~900 °C) основными составляющими флюидов были CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O, находящиеся в равных соотношениях друг с другом (3100 и 3200 мг/кг соответственно). В небольшом количестве во флюидах присутствовала также СО. При понижении температуры количество флюидов уменьшилось, причем доля CO<sub>2</sub> в них сократилась, а H<sub>2</sub>O — увеличилась.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Егоров Л. С. Мелилитовые породы Маймеча-Котуйской провинции. Л., Недра, 1969, 247 с.
2. Егоров Л. С. Щелочно-ультраосновной магматизм и его минералогия // Геология рудных месторождений, 1985, № 4, с. 24—40.
3. Егоров Л. С. Форма, структура и эволюция Гулинского массива ультраосновных—щелочных пород и карбонатитов // Изв. АН СССР, Сер. геол., 1989, № 7, с. 41—56.
4. Кухаренко А. А., Орлова М. П., Булах А. Г. и др. Каледонский комплекс ультраосновных—щелочных пород и карбонатитов Кольского полуострова и Северной Карелии. М., Недра, 1965, 768 с.
5. Орлова М. П. Особенности формирования щелочных магматических комплексов // Зап. ВМО, 1983, вып. 3, ч. 112, с. 288—299.
6. Nielsen T. F. D. The petrology of a melilitolite, melteigite, carbonatite and syenite ring dike system, in the Gardiner Complex, East Greenland // Lithos, 1980, v. 13, № 2, p. 181—197.
7. Dawson J. B., Smith J. V., Steele I. M. 1966 ash eruption of the carbonatite volcano Oldoinyo Lengai: mineralogy of lapilli and mixing of silicate and carbonate magmas // Miner. Mag., 1992, v. 56, № 382, p. 1—16.
8. Эпштейн Е. М., Аникеева Л. И., Михайлова А. Ф. Метасоматические породы и флогопитоносность Гулинской интрузии // Тр. НИИГА, 1961, т. 122, с. 116—272.
9. Ланда Э. А. О генезисе мелилитовых пород в щелочно-ультраосновных массивах // Зап. ВМО, 1966, № 3, с. 288—299.

10. Nielsen T. F. D., Solovova I. P., Veksler I. V. Parental melts of melilitolite and origin of alkaline carbonatite: evidence from crystallised melt inclusions, Gardiner complex // *Contr. Miner. Petrol.*, 1997, v. 126, p. 331—344.
11. Veksler I. V., Nielsen T. F., Sokolov S. V. Mineralogy of crystallized melt inclusions from Gardiner and Kovdor ultramafic alkaline complexes: implications for carbonatite genesis // *J. Petrol.*, 1998, v. 39, № 11—12, p. 2015—2031.
12. Ильин С. С., Приданников А. В., Краснова Т. С. и др. Методика геохимических поисков локализованного благороднометалльного оруденения на участке Крестовской интрузии // *Физикохимия и технология неорганических материалов*. Красноярск, Красноярское краевое отделение Фонда НТИ и ТДМ, ГАЦМиЗ, 1999, с. 33—36.
13. Краснова Т. С., Ежелый Ю. В., Сазонов А. М. Геологическое строение и рудоносность Крестовской интрузии Маймеча-Котуйской провинции севера Сибирской платформы // *Там же*, с. 20—25.
14. Легезина О. Г. Породы Крестовской интрузии (север Сибирской платформы) // *Геология и полезные ископаемые Красноярского края*. Красноярск, КНИИГиМС, 1999, с. 189—190.
15. Приданников А. В., Ильин С. С., Бетхер М. Я. Химический состав Крестовской интрузии // *Физикохимия и технология неорганических материалов*. Красноярск, Красноярское краевое отделение Фонда НТИ и ТДМ, ГАЦМиЗ, 1999, с. 25—28.
16. Трофимов В. Р. Первая находка золота и платиноидов в коренных породах Крестовской интрузии (север Сибирской платформы) // *Минералы и руды Красноярского края*. Красноярск, РИУ КНИИГиМС, 1999, с. 66.
17. Добрецов Н. Л., Кочкин Ю. Н., Кривенко А. П., Кутюлин В. А. Породообразующие пироксены. М., Наука, 1971, 451 с.
18. 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.
19. Специус З. В., Буланова Г. П., Лескова Н. В. Джерфишерит и его генезис в кимберлитовых породах // *Докл. АН СССР*, 1987, т. 293, № 1, с. 199.
20. Henderson C. M. B., Kogarko L. N., Plant D. A. Extreme closed system fractionation of volatile-rich, ultrabasic peralkaline melt inclusions and the occurrence of djerfisherite in the Kugda alkaline complex, Siberia // *Miner. Mag.*, 1999, v. 63, № 3, p. 433—438.
21. Dawson J. B., Smith J. V., Jones A. P. A comparative study of bulk rock and mineral chemistry of olivine melilitites and associated rocks from East and South Africa // *Neues Jahrb. Miner., Abh.* 152, p. 143—175.
22. Белоусов В. В., Герасимовский В. И., Горячев А. В. и др. Восточно-Африканская рифтовая система, Т. III. М., Наука, 1974, с. 287.
23. Gallo F., Giammetti F., Venturelli G., Vernia L. The kamafugitic rocks of San Venanzo and Cupaello, Central Italy // *N. Jahrb. Mineral Monatsch.*, 1984, № 5, p. 198—210.
24. Knorring O., Dubois C. G. V. Carbonatitic lava from Fort Portal Area in Western Uganda // *Nature*, 1961, v. 192, № 4807, p. 1064—1065.
25. Панина Л. И., Усольцева Л. М. Щелочные высококальциевые расплавные включения в мелилит-монтichelлит-оливиновых породах Маломурунского щелочного массива (Алдан) // *Петрология*, 1999, т. 7, № 6, с. 653—669.
26. Kjarsgaard B. A., Hamilton D. L. The genesis of carbonatites by immiscibility // *Carbonatites: genesis and evolution*. London: Unwin Hyman, 1989, p. 388—409.
27. Macdonald R., Kjarsgaard B. A., Skilling I. P. et al. Liquid immiscibility between trachyte and carbonate in ash flow tuffs from Kenya // *Contr. Miner. Petrol.*, 1993, v. 114, p. 276—286.
28. Shastry A., Kumar S. Petrogenesis of carbonatite veins and associated melanephelinite from Sarnu-Dandali Igneous Complex, Barmer, Rajasthan // *Nat. Acad. Sci. Lett.*, 1995, v. 18, № 7—8, p. 139—143.
29. Brooker R. A., Hamilton D. L. Three-liquid immiscibility and the origin of carbonatites // *Nature*, 1990, v. 346, p. 459—462.
30. Kjarsgaard B. A., Hamilton D. L. Liquid immiscibility and the origin of alkali-poor carbonatites // *Miner. Mag.*, 1988, v. 52, p. 43—55.
31. Freeston I. C., Hamilton D. L. The role of liquid immiscibility in the genesis of carbonatites: an experimental study // *Contr. Miner. Petrol.*, 1980, v. 73, p. 105—117.
32. Панина Л. И. Физико-химические условия формирования пород в интрузивах щелочно-ультраосновной формации // *Геология и геофизика*, 1985, № 1, с. 39—51.
33. Kogarko L. N., Plant D. A., Henderson C. M. B., Kjarsgaard B. A. Na-rich carbonate inclusions in perovskite and calzirtite from the Guli intrusive Ca-carbonatite, Polar Siberia // *Contr. Miner. Petrol.*, 1991, № 1, p. 124—129.