

УДК 548.4

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ МАГМЫ (РАСПЛАВНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ) МЕЛИЛИТСОДЕРЖАЩЕГО НЕФЕЛИНИТА КАРБОНАТИТОВОГО КОМПЛЕКСА БЕЛАЯ ЗИМА, ВОСТОЧНЫЙ САЯН

© 2004 г. И. А. Андреева, академик В. И. Коваленко, Н. Н. Кононкова

Поступило 17.10.2003 г.

Зиминский рудный район – один из уникальных редкометальных районов России. Он включает ряд месторождений Nb, Ta, TR, U, Pb, Zn и P, образующих Восточно-Саянскую провинцию ультраосновных щелочных пород и карбонатитов. Белозиминский массив является одним из крупнейших ниобиевых месторождений этой провинции. По данным K–Ar- и Rb–Sr-изотопных исследований его возраст составляет 640–670 млн. лет [1, 2]. Геологическое строение массива детально изучалось в разное время Л.К. Пожарицкой, А.А. Фроловым, Ю.А. Багдасаровым и др. В целом Белозиминский массив характеризуется кольцевым строением, осложненным линейными структурами, и распространяется на большую глубину [3]. В строении массива принимают участие разнообразные силикатные, силикатно-карбонатные и карбонатные породы (породы якупирангит-мельтейгит-ийолит-уртитового ряда, нефелиновые и щелочные сиениты, мелилитолиты, пикриты, карбонатиты, включающие как ранние безрудные, так и рудоносные (Nb) карбонатиты). Оценка составов минералообразующих сред по расплавленным и флюидным включениям для силикатных и несиликатных пород Белозиминского месторождения особенно важна, поскольку до настоящего времени остается открытым вопрос об их происхождении. Многие исследователи относят их к метасоматическим образованиям (Л.К. Пожарицкая, Э.М. Эпштейн, Е.А. Чернышева, И.И. Егоров и др.). Вместе с тем существует точка зрения о магматическом генезисе этих пород (Л.И. Панина, Н.В. Владыкин). Убедительным доказательством последней гипотезы явилось обнаружение Л.И. Паниной и Н.М. Подгорных включений расплавов и расплавов–рассолов в минералах некоторых щелочных пород (в пироксене и нефелине ийолитов)

и карбонатитов (в диопсиде диопсид-авгитовых карбонатитов и в форстерите форстерит-флогопит-магнетитовых карбонатитов) [4]. Вышеназванными авторами были проведены исследования агрегатного состояния минералообразующих сред для этих пород и температур минералообразования. Однако данные о составе расплавов и рассолов, участвующих в формировании широкого спектра пород массива, до настоящего времени полностью отсутствуют. Необходимо также подчеркнуть крайне слабую изученность состава минералообразующих сред для пород щелочных карбонатитовых комплексов в целом, хотя без ответа на этот вопрос решение проблемы генезиса карбонатитов невозможно.

В настоящей работе приводятся результаты детального изучения расплавных и сингенетичных им кристаллических включений в нефелине и перовските мелилитсодержащего нефелинита, впервые позволившие на количественном уровне оценить состав минералообразующей среды для этой породы.

Изученный образец мелилитсодержащего нефелинита отобран в юго-восточной части массива в районе штольни № 5 и представляет собой жильную породу, секущую ранние ийолиты. Он характеризуется порфировой структурой и содержит до 40% вкрапленников, главным образом представленных нефелином (~40–45%), пироксеном (~20–25%), перовскитом (~10–15%) и флогопитом (не более 5%). В существенно подчиненных количествах в породе присутствуют вкрапленники апатита, карбоната, магнетита и халькопирита. Химический состав породы и слагающих ее минералов представлены в табл. 1.

Нефелин присутствует во вкрапленниках породы в виде крупных таблитчатых кристаллов, достигающих 0.8–3 мм, нередко в ассоциации с клинопироксеном и перовскитом. Кроме того, перовскит часто наблюдается в нефелине в виде включений. Клинопироксен образует удлиненно-призматические кристаллы (до 1.5 мм по удлинению) бледно-желтоватого цвета с хорошо видимой спайностью, в которых довольно часто фик-

Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской Академии наук, Москва
Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской Академии наук, Москва

Таблица 1. Химический состав (мас. %) породы, минералов и кристаллических включений в нефелине и перовските меллитосодержащего нефелинита

Компонент	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
SiO ₂	32.60	42.30	0.05	53.72	38.01	1.46	37.91	53.81	34.24	37.42	0.29	0.10	1.70	1.40	37.92	0.05	0.06
TiO ₂	2.70	0.03	57.42	0.04	1.66	–	0.03	0.00	0.00	0.02	51.04	0.00	0.02	0.00	0.32	0.00	8.80
Al ₂ O ₃	13.00	37.11	0.20	1.09	18.47	0.23	16.05	0.24	12.04	23.12	0.57	0.12	0.09	0.00	32.25	0.04	3.29
FeO	12.87	0.58	1.32	2.47	10.68	0.09	5.94	0.18	22.38	0.96	1.31	62.80	0.03	2.74	0.41	0.16	83.18
MnO	0.27	0.03	0.03	0.21	0.25	0.06	0.08	0.00	0.58	0.10	0.03	0.03	0.14	0.04	0.01	0.00	1.47
MgO	3.00	0.06	0.04	9.67	18.48	0.07	2.44	0.34	17.59	0.04	0.04	0.11	0.03	0.04	0.09	0.02	2.09
BaO	0.04	0.05	0.99	0.00	0.00	–	0.07	0.06	0.00	0.03	0.00	0.00	0.03	0.00	0.08	0.00	0.13
SrO	0.19	0.00	0.20	0.12	0.00	0.54	0.39	0.06	0.10	0.00	0.10	0.14	0.04	0.27	0.02	0.87	0.06
CaO	23.09	0.22	37.08	29.22	0.00	54.98	36.14	33.50	0.25	37.43	42.47	0.02	56.75	54.90	0.24	60.82	0.03
Na ₂ O	5.21	14.59	0.41	4.70	0.34	0.11	0.26	9.01	0.69	0.48	0.57	0.08	0.11	0.14	20.69	0.01	0.05
K ₂ O	1.23	6.38	0.01	0.04	10.23	0.02	0.04	0.01	10.78	0.34	0.15	0.00	0.04	0.00	2.58	0.00	0.00
P ₂ O ₅	1.78	0.01	0.03	0.02	0.02	38.07	0.00	0.00	0.08	0.04	0.00	0.01	38.73	38.41	0.01	0.00	0.00
Ce ₂ O ₃	–	–	1.15	–	0.10	–	–	–	0.04	–	1.24	–	0.20	0.23	0.02	0.00	–
La ₂ O ₃	–	–	0.14	–	0.02	–	–	–	0.00	–	0.17	–	0.03	0.09	0.01	0.00	–
ZrO ₂	–	–	–	–	0.21	–	–	–	0.00	–	0.00	–	0.00	0.00	0.01	–	–
Nb ₂ O ₅	–	–	1.19	–	–	–	–	–	–	–	1.65	–	–	–	–	–	–
Ta ₂ O ₅	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0.05	–	–	–	–	–	–
F	0.43	–	0.00	–	–	2.50	–	–	0.00	–	0.04	–	2.81	2.01	0.15	0.00	–
Cl	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.03	0.01	0.00	0.02	0.00	0.01	0.01	0.04	5.27	0.03	0.01
S	0.19	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00	0.13	0.01	0.00	0.01	0.02	35.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
Сумма	100.68	101.33	100.27	101.28	98.50	98.55	99.49	97.23	98.77	100.01	99.74	98.42	100.74	100.31	100.09	62.00	99.15

Примечание. FeO – здесь и в табл. 2 железо общее. 1 – порода (сумма с учетом H₂O = 1.79, CO₂ = 2.29 мас. %); 2–8 – минералы породы; 9–17 – кристаллические включения в нефелине (9–13) и перовските (14–17). 2 – нефелин; 3, 11 – перовскит; 4 – клинопироксен; 5, 9 – флогопит; 6, 13, 14 – апатит; 7, 10 – гранат; 8 – пектолит; 12 – пирротин; 15 – содалит; 16 – кальцит; 17 – титаномагнетит.

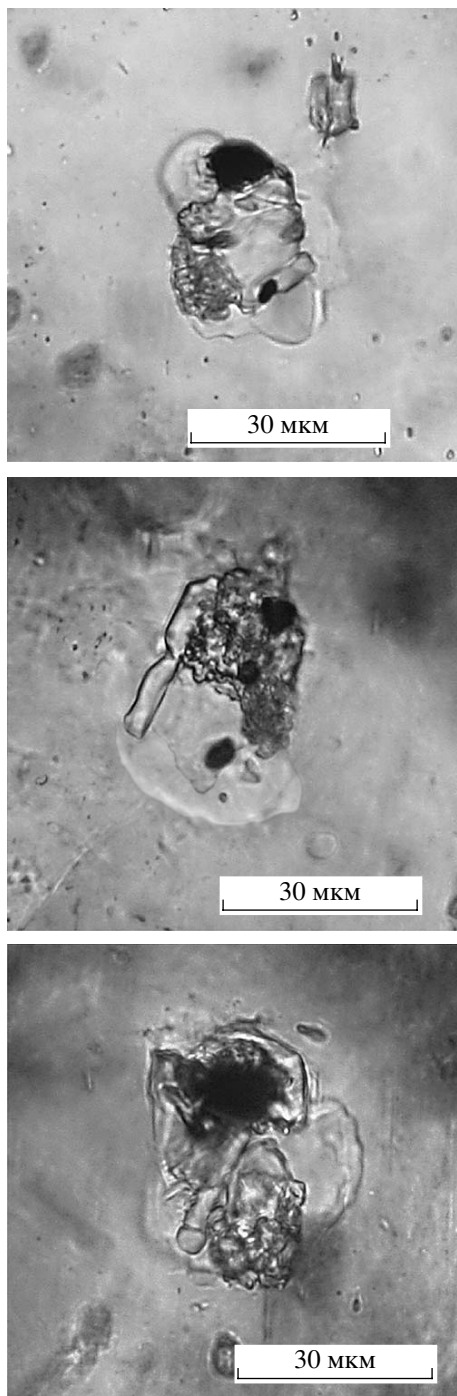


Рис. 1. Включения силикатного расплава в нефелине из мелилитсодержащего нефелинита.

сируются включения карбоната размером до 0.2 мм. По химическому составу клинопироксен близок составу диопсида, отличаясь при этом заметно повышенными концентрациями CaO (29 мас. %) и Na₂O (4.7 мас. %). Перовскит наблюдается в виде изометричных зерен размером до 1–1.5 мм. Он характеризуется высокими содержаниями Ce₂O₃ и La₂O₃, в сумме составляющих

1.3 мас. %, а также Nb₂O₅ (до 1.2 мас. %). Флогопит в породе встречается в виде пластинок бурого цвета, кристаллически плохо оформленных и корродированных основной массой. Содержания FeO в нем достигают 10.7 мас. %, MgO 18.5 мас. %. Мелкозернистая основная масса содержит микролиты нефелина, мелилита, пироксена, граната и пектолита.

Химические составы минералов породы, кристаллических включений, дочерних минеральных фаз в расплавных включениях, а также полученных в результате термометрических экспериментов гомогенных стекол в этих включениях изучены с помощью электронного микроанализатора “Camebax-Microbeam” при следующих условиях: ускоряющее напряжение 15 кВ, ток 30 нА, развертка зонда в растр 5 × 5 и 2 × 2 мкм.

Первичные расплавные включения, а также сосуществующие с ними кристаллические включения были выявлены в нефелине и перовските мелилитсодержащего нефелинита. В нефелине в числе кристаллических включений (табл. 1) установлены флогопит, перовскит, фторапатит, гранат и пирротин. Перовскит, выявленный в качестве включений, так же как и перовскит, входящий в состав породы, существенно обогащен редкоземельными элементами. Так, содержания в нем Ce₂O₃ и La₂O₃ в сумме составляют 1.2–1.4 мас. %, а концентрации Nb₂O₅ достигают 1.65 мас. %. При этом следует подчеркнуть, что в составе всех изученных кристаллических включений фторапатита содержания Ce₂O₃ и La₂O₃ не превышают 0.2–0.3 мас. %. Это свидетельствует о том, что главным концентратом редкоземельных элементов в породе является перовскит. Гранат во включениях по химическому составу отвечает гроссуляру, содержание Al₂O₃ в нем составляет 23 мас. %, FeO ~ 1 мас. %, CaO 37.4 мас. %. В перовските кристаллические включения представлены кальцитом, содалитом и титаномагнетитом (табл. 1). В составе содалита содержится 20.1 мас. % Na₂O и до 5.3 мас. % Cl. Концентрации TiO₂ в титаномагнетите достигают 9 мас. %.

Расплавные включения в нефелине и перовските располагаются неравномерно, имеют близкую к овальной форму и размеры от 5 до 40 мкм. Содержимое включений полностью раскристаллизовано (см. рис. 1). Среди кристаллических дочерних фаз расплавных включений в нефелине установлены флогопит, нефелин, апатит, гранат, волластонит, цеолит, кальцит, перовскит, магнетит, пирротин, а также необычный минерал, относящийся к группе стрональсита и содержащий до 12.6 мас. % SrO (табл. 2). Следует отметить, что стрональсит является крайне редким минералом и впервые найден в 1987 г. в жадеитовых породах месторождения Ооса-чо в Японии [5], а впоследствии обнаружен в апатит-титаномагне-

Таблица 2. Химический состав (мас. %) дочерних минералов и стекол гомогенизированных расплавных включений в минералах мелилитсодержащего нефелинита

Компонент	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
SiO ₂	30.72	0.60	38.15	41.61	37.29	40.54	37.60	50.97	1.08	1.90	30.11	32.98
TiO ₂	33.42	0.02	0.70	0.01	0.01	0.00	0.02	0.07	50.37	0.00	0.77	–
Al ₂ O ₃	3.82	0.06	18.91	34.26	23.19	34.86	33.07	1.37	1.14	0.53	12.80	16.80
FeO	1.59	0.00	6.84	0.14	0.65	0.07	0.51	0.39	2.07	0.14	8.77	6.72
MnO	0.04	0.09	0.22	0.01	0.53	0.03	0.08	0.25	0.03	0.05	0.22	0.26
MgO	0.02	0.05	20.76	0.04	0.07	0.03	0.25	0.10	0.07	0.02	1.39	0.80
BaO	1.02	0.00	0.20	0.09	0.09	0.13	0.00	0.08	0.86	0.00	0.11	–
SrO	0.15	0.23	0.07	0.00	0.00	0.00	12.64	0.06	0.33	0.36	0.25	0.22
CaO	27.54	60.49	0.18	0.12	36.39	7.38	8.14	46.00	36.79	55.58	24.34	18.63
Na ₂ O	0.26	0.03	0.57	16.32	0.42	4.79	9.34	0.43	1.01	0.31	6.59	9.88
K ₂ O	0.23	0.05	10.42	7.39	0.32	0.14	0.23	0.17	0.29	0.23	1.43	2.63
P ₂ O ₅	0.28	0.00	0.00	0.00	0.07	0.00	0.01	0.04	0.00	36.27	0.44	1.79
Ce ₂ O ₃	0.35	–	0.03	–	0.07	–	–	–	0.82	0.21	0.10	0.13
La ₂ O ₃	0.00	–	0.02	–	0.00	–	–	–	0.28	0.08	0.02	0.07
Nb ₂ O ₅	0.77	–	–	–	–	–	–	–	3.62	–	0.10	0.05
F	0.69	–	0.23	–	0.36	–	–	–	0.00	2.43	0.00	0.20
Cl	0.00	0.00	0.00	0.03	0.03	0.00	0.02	0.02	0.00	0.01	0.31	0.46
S	0.02	0.04	0.00	0.01	0.01	0.02	0.00	0.01	0.02	0.00	0.15	0.07
Сумма	100.92	61.66	97.30	100.03	99.50	87.99	101.91	99.96	98.78	98.12	88.05	91.69

Примечание. 1–10 – дочерние минералы в перовските (1, 2) и нефелине (3–10): 1 – сфен, 2 – кальцит, 3 – флогопит, 4 – нефелин, 5 – гранат, 6 – цеолит, 7 – минерал группы стрональсита, 8 – волластонит, 9 – перовскит, 10 – фторапатит. 11, 12 – стекла гомогенизированных расплавных включений в нефелине.

титовых породах Жидойского массива [6]. Дочерняя фаза перовскита в расплавных включениях, так же как и перовскит, установленный в виде кристаллических включений, значительно обогащена редкоземельными элементами, особенно Nb₂O₅, достигающим содержания 3.6 мас. %. В числе дочерних минералов расплавных включений в перовските определены флогопит, сфен, кальцит и магнетит. Химический состав сфена характеризуется повышенными концентрациями (мас. %) BaO (1), F (0.7), Nb₂O₅ (0.8).

Термометрические исследования расплавных включений в нефелине проводились в термокамере при атмосферном давлении с последующей закалкой в 1–2 с. Продолжительность эксперимента при заданной температуре составляла 15 мин. Проведенные опыты показали, что полное расплавление кристаллических фаз во включениях фиксируется при 1120°C. При этом большая часть включений при нагревании взрывается, вероятно, вследствие значительных концентраций в них CO₂ и H₂O (кальцит и цеолит во включениях занимают значительный объем, составляющий до 25–30 и 15–20 об. % соответственно).

Химический состав стекол гомогенизированных расплавных включений в нефелине (табл. 2) в целом оказался близок составу породы и характеризуется низкими содержаниями (мас. %) SiO₂ (30–33) и MgO (0.8–1.4). Концентрации TiO₂ также сравнительно невысоки и не превышают 1 мас. %. Вместе с тем расплав обогащен (мас. %) CaO (18–24), щелочами (до 12.5), с заметным преобладанием Na над K и FeO (до 8.8). В нем отмечаются также повышенные концентрации (мас. %) P₂O₅ (до 1.8), Ce₂O₃ и La₂O₃ (в сумме составляющие не более 0.13), Nb₂O₅ (0.10), Ta₂O₅ (0.32) и Cl (0.46). Обращает на себя внимание преобладание в изученных расплавах Ta над Nb, что, по-видимому, связано с фракционированием существенного количества перовскита из расплава, являющегося главным концентратором Nb. На более раннюю кристаллизацию перовскита по отношению к нефелину указывает его обнаружение в нефелине в качестве включений. Обращают на себя внимание необычно высокие содержания Cl в расплаве, подтверждающие возможность кристаллизации из него содалита, также установленного в числе кристаллических включений. Количество H₂O и CO₂ в расплавах, судя по недостающей до 100%

суммарной разнице, достигает от 8.5 до 12%. В пользу этого предположения свидетельствует и факт обнаружения среди дочерних минералов расплавных включений значительных количеств карбоната и цеолита (табл. 2).

Таким образом, проведенные исследования расплавных включений в минералах мелилитсодержащего нефелинита щелочного карбонатитового комплекса Белая Зима показали, что формирование породы происходило из недосыщенного кремнекислотой высококальциевого магматического расплава, существенно обогащенного щелочами, редкими и летучими компонентами, такими, как H_2O , CO_2 , Cl и S. Впервые установленный ниобиево-танталовый характер родоначальных для изученных пород магм однозначно подтверждает геохимическую специфику Белозиминского месторождения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 02-05-64190, 02-05-64191), проекта НШ 1145.2003.5 (Ведущие научные школы),

программы ОНЗ РАН № 2 “Генетические особенности и условия формирования крупных и суперкрупных месторождений стратегических видов минерального сырья и проблемы их комплексного освоения” и проекта 00-05-72001 (Центр коллективного пользования по изучению минералообразующих сред).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кононова В.А. Якупирангит-уртитовая серия щелочных пород. М.: Наука, 1976. 215 с.
2. Чернышева Е.А., Сандмирова Г.П., Банковская Э.В. и др. // ДАН. 1995. Т. 345. № 3. С. 388–392.
3. Фролов А.А., Белов С.В. // Геология руд. месторождений. 1999. Т. 41. № 2. С. 109–130.
4. Панина Л.И., Подгорных Н.М. // ДАН. 1975. Т. 223. № 6. С. 1447–1450.
5. Kobayashi Shoichi // Miner. J. 1987. V. 13 (6). P. 314–327.
6. Конева М.А. // Зап. ВМО. 1996. № 2. С. 103–105.