

УДК 552.33:552.121

СОСТАВЫ МИНЕРАЛОВ ЛОПАРИТСОДЕРЖАЩИХ ПОРОД ЛОВОЗЕРСКОГО ЩЕЛОЧНОГО МАССИВА И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ ПАРАГЕНЕЗИСОВ

© 2012 Н.И. Сук, А.Р. Котельников, А.М. Ковальский

*Институт экспериментальной минералогии РАН, Черноголовка,
Московская обл., 142432; e-mail: sukni@iem.ac.ru*

Исследован ряд образцов лопаритсодержащих пород (луявритов, ювитов, фойяит-ювитов и т.п.) Ловозерского щелочного массива, отобранных из дифференцированного комплекса и частично из комплекса эвдиалитовых луювритов. С помощью микронзондового анализа изучены составы, как породообразующих, так и акцессорных минералов.

Тренд составов клинопироксенов из этих пород соответствует низкотемпературной ветви тренда для клинопироксенов всех щелочных пород (в том числе и содалитовых сиенитов) Ловозерского массива. Это, по-видимому, связано с повышенной щелочностью (о чем свидетельствует также состав амфиболов), а также с повышенным содержанием флюидных компонентов при их образовании.

Показано, что щелочность амфиболов возрастает в ряду содалитовый сиенит – луюврит – эвдиалитовый луюврит – ювитовые породы. В этом же ряду пород возрастает средняя мольная доля калия в нефелине. На основе нефелинового геотермометра, предложенного Гамильтоном, делается вывод о более высокотемпературных условиях образования нефелинов из луювритов.

Ключевые слова: клинопироксен, амфибол, нефелин, лопарит, минералогенез, Ловозерский щелочной массив.

ВВЕДЕНИЕ

Ловозерский щелочной массив на Кольском полуострове является одним из крупнейших расчлененных интрузивов, с которым связаны гигантские месторождения лопарита. В строении массива различными исследователями выделяются (рис. 1): комплекс эвдиалитовых луювритов, который слагает верхнюю часть массива и состоит из чередующихся горизонтов лейкократовых, мезократовых и меланократовых разновидностей, а также эвдиалитовых луювритов, фойяитов и уртитов; мощный дифференцированный комплекс, залегающий ниже, сложенный многократно повторяющимися трехчленными пачками фойяит-уртит-луйвритов; комплекс нефелиновых, нефелин-гидросодалитовых и пойкилитовых сиенитов, сосредоточенных главным образом в краевых частях массива и, возможно, подстилающих породы дифференцированного комплекса, а также комплекс жильных щелочных пород (Буссен, Сахаров, 1967; Власов и др., 1959; Герасимовский и др., 1966; Елисеев, Федо-

ров, 1953). Лопаритовое оруденение приурочено главным образом к горизонтам уртитов, малинбитов, реже луювритов дифференцированного комплекса. В масштабе всего массива различными исследователями отмечается закономерное изменение состава лопаритов (Власов и др., 1959; Ифантопуло, Осокин, 1979; Когарко и др., 1996 и др.): в вертикальном разрезе интрузива снизу вверх возрастает содержание SrO, Nb₂O₅, Ta₂O₅, ThO₂, Na₂O и падают концентрации CaO, FeO, TiO₂, Ce₂O₃, La₂O₃, Nd₂O₃, суммы редкоземельных элементов. По данным Л.Н. Когарко с соавторами (1996) в лопарите эвдиалитовых луювритов и некоторых пегматитов по сравнению с лопаритами дифференцированного комплекса отмечается увеличение луешитового (NaNbO₃) и таусонитового (SrTiO₃) компонентов.

Несмотря на большое количество опубликованного материала, для оценок параметров минералогенеза Ловозерского массива, на наш взгляд, не хватает точных физико-химических данных, которые можно получить, изучая парагенезисы минералов. Поэтому основной целью данной ра-

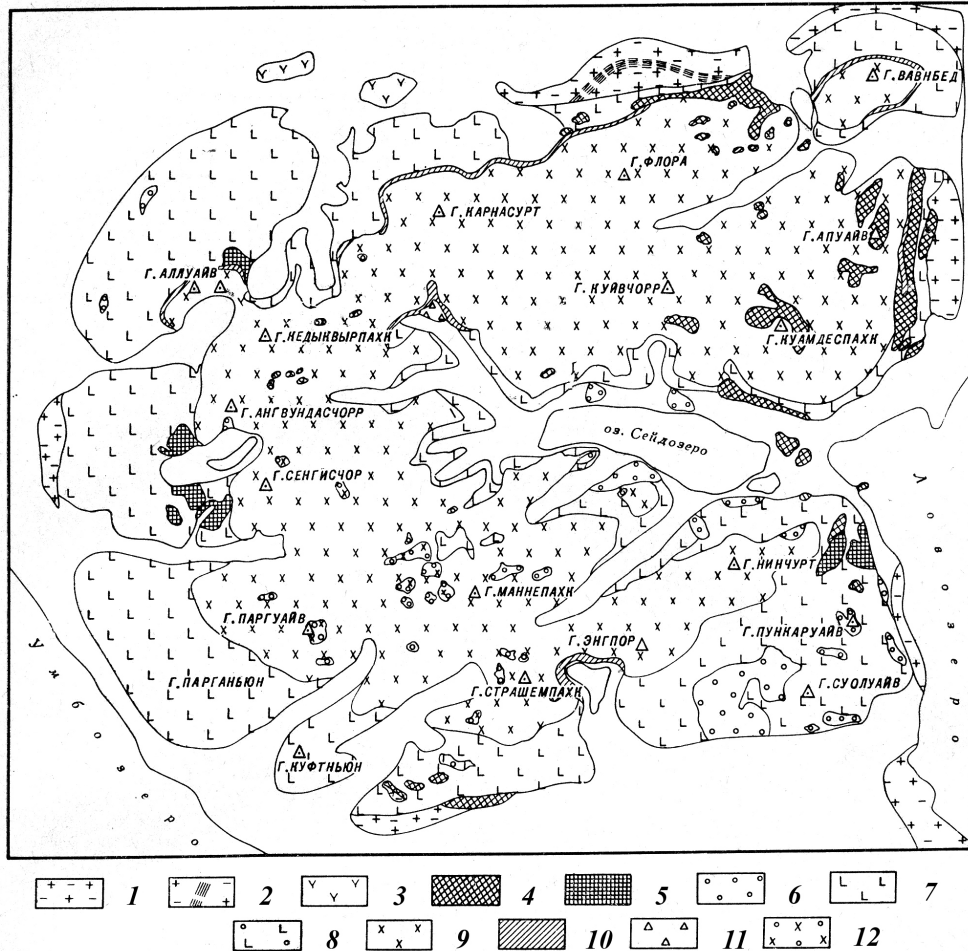


Рис. 1. Схема геологического строения Ловозерского щелочного массива (по материалам Я.М. Фейгина, Н.А. Елисеева и др.) (Герасимовский и др., 1966). Нижний архей: 1 – гранитогнейсы. Протерозой: 2 – силлиманит-андалузитовые сланцы; 3 – ультраосновные породы. Палеозойский магматический комплекс: 4 – эффузивно-осадочные породы ловозерской свиты. Интрузивные породы Ловозерского массива: 5 – метаморфизованные нефелиновые сиениты; 6 – пойкилитовые гидросодалитовые сиениты, нефелин-гидросодалитовые сиениты и равномернозернистые нефелиновые сиениты; 7 – уртиты, фойяиты, луавриты; 8 – пойкилитовые содалитовые сиениты; 9 – эвдиалитовые луавриты; 10 – порфириовидные луавриты; 11 – порфириовидные ловозерит-мурманитовые луавриты; 12 – пойкилитовые содалитовые сиениты и тавиты. Изученные скважины расположены: скв. 904 – между г. Суолуайв и г. Пункаруайв; 447 – на сев. склоне г. Карнасурт; 448 – на западном склоне г. Ангвундасчорр.

боты была оценка температур образования пород массива с использованием различных минеральных геотермометров.

Мы исследовали лопаритсодержащие породы (луавриты, ювиты, фойяит-ювиты, уртиты и т.п.), включая рудные горизонты, образцы которых были отобраны из скважин № 447, 904 и 448, пересекающих породы дифференцированного комплекса и располагающихся соответственно в северной и южной и западной частях массива, и из скважины 178, проходящей через породы комплекса эвдиалитовых луавритов (табл. 1, рис. 1). Породообразующие минералы изученных разновидностей пород представлены нефелином, полевым шпатом (альбитом, калиевым полевым шпатом), клинопироксенами (эгирином, эгирин-авгитом), щелочным амфиболом. Среди акцессорных минералов выделяются: эвдиалит, рамзаит, сфен,

апатит, содалит, карбонаты, сульфиды железа (пирит и пирротин), марганец-ильменит. Лопарит в зависимости от количества, содержащегося в породе, может быть как породообразующим (в рудных горизонтах), так и акцессорным минералом. В качестве вторичных минералов присутствуют натролит и анальцит.

Составы минералов определялись на рентгеновском микроанализаторе Camebax (Франция) с энергодисперсионной приставкой Link AN10000 (Англия, Оксфорд), на цифровом электронном сканирующем микроскопе Tescan Vega TS5130MM (Чехия), оснащенный YAG детекторами вторичных и отраженных электронов и энергодисперсионным рентгеновским микроанализатором с полупроводниковым Si(Li) детектором Link INCA Energy (Англия, Оксфорд) с пересчетом результатов по

СОСТАВЫ МИНЕРАЛОВ

Таблица 1. Изученные образцы пород Ловозерского щелочного массива.

Порода	№ образца	№ скважины	Глубина, м
лопаритсодержащий луаврит	С-79	447	1048
лопаритсодержащий луаврит	С-102	448	1021
лопаритсодержащий луаврит	ВК-54	178	450
лопаритовый луаврит	447-7	447	955
лопаритовый луаврит	904-46	904	739.5
лопаритсодержащий лейкократовый луаврит	904-50	904	822.6
лопаритовый трахитоидный луаврит	447-31	447	1208
лопаритсодержащий трахитоидный эвдиалитовый луаврит	ВК-23	178	284
лопаритсодержащий луаврит-ювит	С-74	447	885
лопаритсодержащий ювит	С-103	448	788
лопаритсодержащий ювит	447-8	447	959
лопаритсодержащий ювит	904-26	904	465
лопаритовый ювит	904-42	904	711
лопаритсодержащий уртит	904-31	904	537
лопаритовый уртит-ювит	447-16	447	981
лопаритовый фойяит-ювит	904-34	904	580.5
лопаритовый фойяит-ювит	904-49	904	815

программе INCA Energy 200, а также на сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega II ХМУ (Чехия), оснащенный энергодисперсионным (INCAx-sight) и кристалл-дифракционным (INCA wave) рентгеновскими спектрометрами (Англия, Оксфорд). Использовалась программа качественного и количественного анализа INCA Energy 450.

СОСТАВЫ МИНЕРАЛОВ И УСЛОВИЯ МИНЕРАЛОГЕНЕЗА

При изучении процессов минерало- и петрогенеза одной из главных задач является реконструкция физико-химических параметров этих процессов. Поскольку составы минералов, слагающих породы массива, и их парагенезисы отражают как условия минералогенеза, так и условия образования породы в целом, в решении этой задачи важную роль играет изучение минеральных парагенезисов, слагающих породы. Для этого нами изучались минеральные парагенезисы щелочных пород Ловозерского массива, которые позволили оценить как температурный режим образования ряда минералов, так и флюидный режим в ходе их формирования.

Для количественных оценок РТ-параметров за последние полвека были разработаны различные методы, базирующиеся на экспериментальном исследовании фазовых равновесий в различных системах. Среди них такой метод, как минеральная термобарометрия, основанная на рас-

пределении элементов (и изотопов) между сосуществующими фазами.

Для оценки температур образования исследуемых пород мы применяли ряд минеральных геотермометров, основанных на фазовых равновесиях, как темноцветных, так и лейкократовых минералов переменного состава (Bt-Cpx, Amph-Cpx, Amph-Bt, Fsp-Ne, Fsp₁-Fsp₂). Используемые термометры основаны на данных Перчука (1970), Перчука и Рябчикова (1976) и Зырянова (1981). В случае двуполевошпатового геотермометра (Nekvasil, 1994) температуры определялись для давления $P_s=3$ кбар, что, по-видимому, является верхним пределом давления летучих компонентов в условиях высоких температур при образовании интрузивных комплексов подобного типа. Температуры образования нефелина оценивали по содержанию избыточного кремнезема в нефелине (Дир и др., 1966; Hamilton, McKenzie, 1960).

В нашей работе проводится исследование главных породообразующих и некоторых акцессорных минералов, слагающих изученные нами лопаритсодержащие породы Ловозерского щелочного массива, составы которых представлены в табл. 2-8. Подробно изученные породообразующие минералы (пироксены, амфиболы, нефелин, полевые шпаты, лопарит) рассматриваются далее.

Клинопироксены. В лопаритсодержащих породах клинопироксены в основном представляют собой твердые растворы эгирина-диопсидового состава с преобладанием эгириновой состав-

Таблица 2. Химические составы пироксенов и щелочных амфиболов из лопаритсодержащих пород Ловозерского щелочного массива

Компоненты, мас.%	С-79*			С-102			ВК-54			
	Срх1	Срх2	Amph	Срх1	Срх2	Amph	Срх1	Срх2	Срх3	Amph
	(n=8)	(n=4)	(n=6)	(n=1)	(n=8)	(n=2)	(n=2)	(n=2)	(n=2)	(n=2)
SiO ₂	52.64	52.41	53.24	52.48	52.97	52.56	53.19	52.64	52.35	53.87
TiO ₂	1.71	2.15	1.30	1.84	2.63	1.39	2.46	2.16	1.99	0.91
Al ₂ O ₃	1.01	1.03	1.72	0.90	0.96	1.45	0.90	0.95	0.96	0.91
MgO	2.72	1.92	12.29	2.19	0.82	9.45	2.79	2.57	2.62	9.86
FeO	24.03	25.40	15.06	24.82	25.99	18.66	22.16	23.62	24.64	17.88
Na ₂ O	11.85	12.85	10.30	11.72	13.48	8.96	12.19	11.79	11.52	10.05
K ₂ O	-	-	1.44	-	-	2.06	-	-	-	1.54
CaO	4.78	2.91	1.17	4.63	1.50	1.38	4.75	4.83	4.78	1.04
MnO	0.52	0.55	2.28	0.34	0.61	2.78	0.69	0.49	0.51	1.45
ZrO ₂	0.74	0.78	He опр.	1.08	1.04	He опр.	0.87	0.95	0.63	-
F	-	-	He опр.	-	-	He опр.	-	-	-	He опр.
X _{Mg}	0.165	0.117	0.558	0.135	0.052	0.439	0.178	0.160	0.157	0.476
X' _{Mg}	-	-	0.600	-	-	0.477	-	-	-	0.476

Таблица 2. Продолжение

Компоненты, мас.%	447-7				904-46			904-50			447-31	
	Срх1	Срх2	Срх3	Amph	Срх1	Срх2	Срх3	Срх1	Срх2	Amph	Срх	Amph
	(n=1)	(n=4)	(n=3)	(n=3)	(n=2)	(n=4)	(n=1)	(n=4)	(n=4)	(n=4)	(n=1)	(n=5)
SiO ₂	52.36	51.96	52.78	52.53	52.26	52.76	53.10	52.23	52.62	50.52	51.94	49.70
TiO ₂	1.79	1.91	2.44	1.28	1.75	1.66	3.02	1.70	2.80	2.33	3.56	2.29
Al ₂ O ₃	1.01	1.01	1.04	1.62	0.72	0.77	0.85	0.85	0.95	1.86	1.20	2.36
MgO	4.83	3.15	2.20	10.62	3.07	2.55	1.53	3.53	1.59	7.54	1.74	8.24
FeO	21.77	23.35	24.02	18.42	23.68	24.64	25.23	23.26	24.99	22.25	24.17	22.87
Na ₂ O	9.86	10.42	11.53	8.98	9.68	10.72	12.66	9.58	11.93	8.86	11.86	8.41
K ₂ O	0.27	-	-	1.51	-	-	-	-	-	1.65	-	1.57
CaO	6.50	6.75	4.83	2.30	7.41	6.34	2.98	8.20	3.74	1.77	3.52	2.46
MnO	0.86	0.54	0.50	1.35	0.53	0.56	0.63	0.65	0.55	1.75	0.45	1.39
ZrO ₂	0.75	0.91	0.66	-	0.90	-	-	-	0.83	-	1.56	-
F	-	-	-	He опр.	-	-	-	-	-	0.58	-	He опр.
X _{Mg}	0.276	0.190	0.138	0.489	0.184	0.153	0.095	0.208	0.100	0.359	0.112	0.377
X' _{Mg}	-	-	-	0.519	0.758	-	-	0.784	-	0.386	-	0.434

СОСТАВЫ МИНЕРАЛОВ

Таблица 2. Продолжение

Компоненты, мас.%	BK-23				C-74			C-103		
	Cpx1	Cpx2	Cpx3	Amph	Cpx1	Cpx2	Amph	Cpx1	Cpx2	Amph
	(n=2)	(n=5)	(n=2)	(n=3)	(n=5)	(n=4)	(n=5)	(n=3)	(n=1)	(n=1)
SiO ₂	53.20	52.69	53.29	53.42	53.14	53.50	53.18	52.48	53.31	54.83
TiO ₂	2.10	3.39	2.47	1.32	2.78	0.43	0.96	1.85	3.05	0.41
Al ₂ O ₃	0.82	0.87	1.05	1.09	0.98	2.12	1.27	0.94	0.98	0.65
MgO	1.92	1.64	1.05	10.41	1.12	0.21	9.94	2.77	1.09	10.89
FeO	24.94	24.87	26.59	18.53	25.58	28.80	18.10	23.86	24.98	16.32
Na ₂ O	12.62	13.26	14.29	10.11	13.83	14.59	9.51	11.21	13.03	9.44
K ₂ O	-	-	-	1.53	-	-	2.12	-	-	2.28
CaO	2.91	2.20	1.13	0.69	1.25	0.21	0.86	5.57	1.99	0.35
MnO	0.34	0.44	0.13	1.34	0.70	0.14	2.26	0.41	0.57	2.84
ZrO ₂	1.15	0.64	-	-	0.62	-	He опр.	0.91	1.00	-
F	-	-	-	-	-	-	He опр.	-	-	He опр.
X _{Mg}	0.119	0.103	0.065	0.483	0.071	0.012	0.465	0.169	0.070	0.503
X' _{Mg}	-	-	-	0.514	-	-	0.496	-	-	0.548

Таблица 2. Продолжение

Компоненты, мас.%	447-8			904-26			904-42			
	Cpx1	Cpx2	Cpx3	Cpx1	Cpx2	Amph	Cpx1	Cpx2	Amph1	Amph2
	(n=9)	(n=7)	(n=4)	(n=2)	(n=2)	(n=3)	(n=6)	(n=6)	(n=2)	(n=4)
SiO ₂	52.31	52.45	53.59	53.80	53.58	52.62	53.24	54.19	55.59	53.25
TiO ₂	1.71	2.11	0.80	3.07	0.63	1.67	3.02	0.27	0.26	1.44
Al ₂ O ₃	0.92	0.87	1.94	0.84	1.45	1.10	0.96	2.91	0.52	1.20
MgO	2.78	1.70	0.73	0.85	0.18	7.59	1.08	0.29	10.41	7.99
FeO	24.12	25.70	28.02	26.21	29.48	21.00	26.17	27.81	16.22	20.06
Na ₂ O	11.10	13.06	14.47	13.28	14.21	9.41	12.91	14.19	9.15	9.20
K ₂ O	-	-	-	-	-	1.68	-	-	2.50	2.16
CaO	5.72	2.83	0.34	0.93	0.18	0.57	2.05	0.18	0.49	0.53
MnO	0.51	0.51	0.11	1.02	0.29	2.98	0.57	0.16	3.91	3.23
ZrO ₂	0.83	0.77	-	-	-	-	-	-	-	-
F	-	-	-	-	-	1.49	-	-	0.95	0.91
X _{Mg}	0.167	0.104	0.044	0.054	0.011	0.360	0.067	0.018	0.479	0.379
X' _{Mg}	-	-	-	-	-	0.392	-	-	0.518	0.409

Таблица 2. Окончание

Компоненты, мас.%	904-31		447-16		904-34				904-49		
	Cpx1	Cpx2	Cpx1	Cpx2	Cpx1	Cpx2	Cpx3	Amph	Cpx1	Cpx2	Amph
	(n=2)	(n=2)	(n=4)	(n=5)	(n=1)	(n=2)	(n=3)	(n=3)	(n=2)	(n=6)	(n=3)
SiO ₂	53.77	53.83	51.50	52.68	52.89	53.14	53.92	53.77	51.88	52.74	52.35
TiO ₂	2.78	-	1.81	2.11	2.04	3.60	2.68	0.77	1.90	3.17	1.45
Al ₂ O ₃	0.93	1.75	0.92	1.39	0.94	0.93	1.16	0.79	0.89	1.04	1.16
MgO	0.83	-	1.93	0.69	2.49	0.94	0.86	9.43	2.55	1.33	9.18
FeO	26.86	30.27	27.15	28.35	24.92	24.68	26.24	17.31	25.40	26.21	18.95
Na ₂ O	13.75	14.15	11.58	13.89	11.01	12.95	13.63	9.09	10.57	12.74	9.39
K ₂ O	-	-	-	-	-	-	-	2.12	-	-	1.65
CaO	0.50	-	3.90	0.32	5.11	1.93	0.94	0.99	5.50	2.30	1.09
MnO	0.58	-	0.39	0.57	0.60	0.62	0.57	3.45	0.46	0.47	2.10
ZrO ₂	-	-	0.82	-	-	1.21	-	-	0.85	-	-
F	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.66
X _{Mg}	0.052	-	0.111	0.041	0.148	0.062	0.054	0.447	0.150	0.082	0.437
X' _{Mg}	-	-	0.831	-	-	-	-	0.467	0.769	-	0.460

Примечание: X_{Mg} – мольная доля магния в пироксене или амфиболе: $X_{Mg} = Mg/(Mg+Fe+Mn)$; X'_{Mg} – мольная доля магния в пироксене или амфиболе: $X'_{Mg} = Mg/(Mg+Fe^{2+}+Mn)$. Прочерки здесь и в следующих таблицах означают отсутствие компонента в образце или его содержание в количестве, меньшем предела обнаружения микросондом. Анализы пироксенов нормированы на сумму 100%.

* Номер образца здесь и в следующих таблицах; n – количество замеров.

Таблица 3. Химические составы нефелина из лопаритсодержащих пород Ловозерского щелочного массива

Компоненты, мас.%	C-79	C-102	БК-54	447-7	904-46	904-50	447-31	БК-23
	(n=6)	(n=4)	(n=2)	(n=3)	(n=3)	(n=4)	(n=2)	(n=5)
SiO ₂	44.63	45.26	43.92	44.88	44.65	44.76	45.12	44.97
Al ₂ O ₃	31.64	30.82	32.28	31.60	31.63	31.98	31.28	31.23
FeO	1.11	1.76	0.49	1.18	1.48	1.12	1.48	1.26
Na ₂ O	17.05	16.66	17.67	16.85	16.37	16.38	16.46	16.97
K ₂ O	5.57	5.50	5.64	5.49	5.87	5.76	5.66	5.57
X _K	0.177	0.178	0.174	0.176	0.191	0.188	0.185	0.178

Таблица 3. Окончание

Компоненты, мас.%	C-74	C-103	447-8	904-42	904-31	447-16	904-34	904-49
	(n=5)	(n=4)	(n=8)	(n=4)	(n=1)	(n=5)	(n=2)	(n=1)
SiO ₂	43.60	42.92	42.69	42.48	42.66	42.90	42.65	42.41
Al ₂ O ₃	32.18	33.42	33.52	33.66	33.68	33.44	33.75	34.09
FeO	1.05	0.16	-	0.67	-	0.25	0.33	-
Na ₂ O	17.13	17.00	17.01	16.28	17.31	16.32	16.26	16.22
K ₂ O	6.04	6.50	6.78	6.91	6.35	7.09	7.01	7.28
X _K	0.188	0.201	0.208	0.218	0.195	0.222	0.221	0.228

Примечание: X_K – мольная доля калия в нефелине: $X_K = K/(Na+K)$. Анализы нормированы на сумму 100%.

СОСТАВЫ МИНЕРАЛОВ

Таблица 4. Химические составы полевых шпатов из лопаритсодержащих пород Ловозерского щелочного массива

Компоненты, мас.%	C-79		C-102		БК-54	447-7		904-46	
	Ab (n=2)	Kfs (n=3)	Ab (n=4)	Kfs (n=8)	Ab (n=1)	Ab (n=3)	Kfs (n=1)	Ab (n=3)	Kfs (n=3)
SiO ₂	68.71	65.86	69.06	65.80	68.78	68.89	65.40	68.90	64.99
Al ₂ O ₃	18.72	17.88	18.86	18.06	18.86	18.96	18.27	19.22	18.11
Na ₂ O	12.47	0.50	12.00	0.35	12.36	12.02	0.37	11.71	0.55
K ₂ O	0.10	15.76	0.08	15.79	-	0.13	15.96	0.17	16.35
X _к	0.006	0.954	0.004	0.968	-	0.007	0.966	0.009	0.952

Таблица 4. Продолжение

Компоненты, мас.%	904-50		447-31		БК-23		C-74		C-103	
	Ab (n=5)	Kfs (n=3)	Ab (n=2)	Kfs (n=1)	Ab (n=3)	Kfs (n=5)	Ab (n=4)	Kfs (n=4)	Ab (n=2)	Kfs (n=1)
SiO ₂	68.82	65.03	69.20	65.48	68.65	65.80	68.70	65.74	68.61	65.96
Al ₂ O ₃	19.23	18.20	18.97	17.77	19.00	18.06	18.99	18.06	18.90	18.10
Na ₂ O	11.85	0.36	11.67	0.39	12.17	0.39	12.16	0.43	12.41	0.20
K ₂ O	0.10	16.41	0.16	16.36	0.18	15.75	0.15	15.77	0.08	15.74
X _к	0.006	0.968	0.009	0.965	0.010	0.964	0.008	0.961	0.004	0.98

Таблица 4. Окончание

Компоненты, мас.%	447-8		904-42		447-16		904-34		904-49	
	Ab (n=4)	Kfs (n=2)	Ab (n=3)	Kfs (n=3)	Ab (n=4)	Kfs (n=2)	Ab (n=4)	Kfs (n=3)	Ab (n=5)	Kfs (n=3)
SiO ₂	68.67	65.58	68.79	65.00	69.37	65.38	68.90	65.45	68.77	64.79
Al ₂ O ₃	18.91	18.12	19.32	18.14	18.88	18.18	19.28	18.10	19.14	18.21
Na ₂ O	12.34	0.35	11.77	0.46	11.62	0.40	11.73	0.36	11.95	0.31
K ₂ O	0.08	15.95	0.12	16.40	0.13	16.04	0.09	16.09	0.14	16.69
X _к	0.004	0.968	0.007	0.959	0.007	0.963	0.005	0.967	0.008	0.972

Примечание: X_к - мольная доля калия в полевом шпате; X_к = K/(Na+K). Анализы нормированы на сумму 100%.

ляющей и с небольшим содержанием геденбергитового компонента (табл. 2). В пределах каждого образца изученных пород выделяются несколько генераций. Это позволяет построить тренд изменения составов клинопироксенов, как в пределах каждого образца, так и в целом для изученных пород (Сук и др., 2005, 2007a; Suk et al., 2009), который хорошо иллюстрируется треугольной диаграммой Aeg-Di-Hd¹ (рис. 2a).

¹ Используемые в работе символы минералов: Ab – альбит, Aeg – эгирин, Arf – арфведсонит, Amph – амфибол, Bt – биотит, Cpx – клинопироксен, Di – диопсид, Ed – эденит, Fsp – полевой шпат, Glc – глаукофан, Hd – геденбергит, Kfs – калиевый полевой шпат, Lpx – лопарит, Ne – нефелин, Rbk – рибекит, Rich – рихтерит.

На диаграмме тренд составов клинопироксенов изученных лопаритсодержащих пород соответствует низкотемпературной части тренда для клинопироксенов щелочных пород (Перчук, Рябчиков, 1976), а также низкотемпературной ветви тренда для клинопироксенов содалитовых сиенитов Ловозерского массива (Сук и др., 2002, 2003, 2007b). Это, по-видимому, связано с повышенной щелочностью, а также с повышенным содержанием флюидных компонентов (в том числе солевых) при их образовании. Аналогичные тренды составов были получены А.Н. Коробейниковым и К. Лаайоки (1993) и Л.Н. Когарко с соавторами (Kogarko et al., 2006) для клинопироксенов из различных пород Ловозерского массива. Отмечающийся в серии составов клино-

Таблица 5. Химические составы лопаритов из пород Ловозерского щелочного массива

Компо- ненты, мас.%	С-79		С-102	447-7	904-46	904- 50*	447-31	ВК-54	С-74	
	Lop1 (n=2)	Lop2 (n=3)	(n=15)	(n=7)	(n=3)	(n=3)	(n=5)	(n=5)	Lop1 (n=3)	Lop2 (n=1)
TiO ₂	42.12	39.33	41.01	41.84	44.18	43.55	42.92	37.98	40.86	42.07
FeO	0.65	0.52	0.50	0.58	0.15	0.51	0.56	-	0.44	0.67
Na ₂ O	8.33	8.94	8.73	8.76	7.90	7.82	7.94	10.25	9.19	8.05
CaO	4.92	5.50	4.45	4.15	4.59	4.44	4.61	4.21	3.98	5.17
SrO	1.57	3.18	1.04	1.45	1.35	0.93	0.90	4.68	1.57	1.51
La ₂ O ₃	10.00	8.08	10.22	9.79	9.87	9.57	10.66	8.38	9.06	9.25
Ce ₂ O ₃	18.50	16.06	19.30	18.27	19.27	18.88	19.18	15.52	19.49	19.30
Pr ₂ O ₃	0.91	1.22	1.57	1.49	0.93	1.37	1.17	1.37	1.53	2.07
Nd ₂ O ₃	4.27	4.80	4.56	4.37	3.95	3.88	4.50	4.21	4.47	4.80
Nb ₂ O ₅	8.06	11.42	7.44	8.18	7.33	7.16	6.92	12.35	8.93	6.69
Ta ₂ O ₅	He опр.	He опр.	0.61	0.56	-	1.08	-	He опр.	He опр.	He опр.
ThO ₂	0.67	0.95	0.57	0.56	0.48	0.81	0.64	1.05	0.48	0.42
Lop	0.556	0.461	0.594	0.576	0.580	0.583	0.602	0.457	0.578	0.578
Lu	0.165	0.216	0.161	0.179	0.154	0.167	0.145	0.237	0.185	0.135
Prv	0.238	0.246	0.217	0.206	0.229	0.225	0.229	0.191	0.195	0.248
Tas	0.041	0.077	0.028	0.039	0.037	0.025	0.024	0.115	0.042	0.039

Таблица 5. Окончание

Компо- ненты, мас.%	С-103	447-8	904-26	904-42	904-31*		447-16	904-34	904-49
	(n=4)	(n=22)	(n=7)	(n=2)	Lop1 (n=3)	Lop2 (n=2)	(n=12)	(n=4)	(n=3)
TiO ₂	40.37	41.89	43.30	42.73	42.44	45.21	42.36	42.16	43.68
FeO	0.63	0.49	-	0.23	-	-	0.62	-	0.29
Na ₂ O	9.28	8.76	8.40	8.12	8.40	8.20	8.12	8.15	7.84
CaO	3.90	4.03	3.89	4.36	3.99	5.19	4.22	3.98	4.82
SrO	1.45	1.35	1.75	1.70	1.83	1.82	1.34	1.83	1.33
La ₂ O ₃	10.09	9.91	9.21	8.80	9.21	9.04	10.15	9.57	9.50
Ce ₂ O ₃	18.50	18.70	18.16	18.63	18.81	18.37	18.84	18.02	18.88
Pr ₂ O ₃	1.50	1.60	1.10	1.71	1.28	1.24	1.37	1.18	1.25
Nd ₂ O ₃	4.62	4.47	4.25	4.27	3.88	3.80	4.49	3.81	3.94
Nb ₂ O ₅	8.90	8.14	8.68	7.86	8.81	6.55	7.81	8.86	6.92
Ta ₂ O ₅	He опр.	He опр.	0.59	1.32	0.90	-	He опр.	1.67	0.91
ThO ₂	0.76	0.66	0.67	0.27	0.45	0.58	0.68	0.77	0.64
Lop	0.584	0.591	0.564	0.560	0.559	0.553	0.591	0.549	0.569
Lu	0.185	0.171	0.192	0.180	0.195	0.138	0.164	0.206	0.156
Prv	0.192	0.201	0.196	0.215	0.197	0.259	0.209	0.196	0.239
Tas	0.039	0.037	0.048	0.045	0.049	0.049	0.036	0.049	0.036

Примечание: анализы нормированы на сумму 100%. n – количество замеров. Lop – лопарит, Lu – луешит, Prv – перовскит, Tas – таусонит.

*В единичных анализах обнаружено присутствие ВаО в количестве: 0.42-2.88 мас.% (обр. 904-50) и 0.71-1.32 (обр. 904-31).

СОСТАВЫ МИНЕРАЛОВ

Таблица 6. Химические составы зональных кристаллов лопарита из пород Ловозерского щелочного массива

Компо- ненты, мас.%	С-79		С-102		904-46			
	центр (n=1)	край (n=1)	центр (n=1)	край (n=1)	край (n=1)	центр* (n=1)	зона 1 (n=1)	зона 2 (n=1)
TiO ₂	40.07	38.58	40.17	42.89	43.02	41.47	44.08	45.45
FeO	0.55	0.75	0.39	0.41	-	0.63	-	0.48
Na ₂ O	8.49	9.14	9.12	8.42	8.29	7.20	8.16	7.57
CaO	5.95	5.69	4.32	5.73	5.27	4.24	4.76	5.79
SrO	2.73	3.57	1.35	0.82	2.51	1.89	1.41	1.59
La ₂ O ₃	7.97	8.10	10.61	10.69	8.30	10.05	8.66	8.44
Ce ₂ O ₃	16.74	15.27	19.57	19.84	16.47	18.13	18.47	18.07
Pr ₂ O ₃	1.90	1.19	1.68	1.06	1.61	1.77	1.66	1.88
Nd ₂ O ₃	4.79	4.12	4.63	4.18	4.82	4.73	4.29	4.39
Nb ₂ O ₅	10.15	12.83	7.54	5.96	8.70	7.84	6.83	6.34
Ta ₂ O ₅	He опр.	He опр.	He опр.	He опр.	-	1.01	1.07	-
ThO ₂	0.66	0.76	0.62	-	1.01	-	0.61	-
Lop	0.478	0.429	0.602	0.584	0.508	0.573	0.565	0.545
Lu	0.191	0.273	0.154	0.121	0.175	0.173	0.158	0.131
Prv	0.265	0.249	0.209	0.274	0.252	0.205	0.239	0.282
Tas	0.066	0.085	0.035	0.021	0.065	0.049	0.038	0.042

Таблица 6. Продолжение

Компо- ненты, мас.%	904-50			ВК-23 крупный кристалл мелкий кристалл				904-26	
	зона 1 (n=3)	зона 2 (n=5)	зона 3 (n=2)	зона 1 (n=10)	зона 2 (n=4)	зона 1 (n=3)	зона 2 (n=1)	зона 1 (n=4)	зона 2 (n=2)
TiO ₂	44.76	42.47	41.33	39.72	37.64	39.55	36.83	43.86	41.70
FeO	0.80	0.53	-	-	-	-	-	-	-
Na ₂ O	7.89	8.07	8.46	9.17	9.26	9.14	9.90	8.26	9.30
CaO	5.63	4.33	3.45	2.87	2.94	2.89	2.91	4.84	2.44
SrO	1.76	1.46	6.49	4.66	5.11	4.70	5.49	1.62	2.19
La ₂ O ₃	8.92	9.70	8.82	8.85	8.32	8.77	8.18	9.21	9.39
Ce ₂ O ₃	17.85	18.78	14.84	15.77	14.36	15.79	13.52	18.43	18.10
Pr ₂ O ₃	0.69	1.39	-	1.25	1.10	1.30	1.25	0.94	1.44
Nd ₂ O ₃	4.20	4.17	2.79	3.97	3.61	3.96	3.73	3.88	4.57
Nb ₂ O ₅	6.04	7.55	12.27	12.60	16.78	12.75	17.56	7.42	9.80
Ta ₂ O ₅	0.78	0.88	-	He опр.	He опр.	He опр.	He опр.	0.99	-
ThO ₂	0.68	0.67	1.55	1.14	0.88	1.15	0.63	0.55	1.07
Lop	0.537	0.577	0.427	0.488	0.422	0.485	0.406	0.549	0.596
Lu	0.136	0.169	0.244	0.254	0.320	0.256	0.331	0.168	0.215
Prv	0.280	0.215	0.163	0.137	0.133	0.138	0.130	0.240	0.127
Tas	0.047	0.039	0.166	0.121	0.125	0.121	0.133	0.043	0.062

Таблица 6. Продолжение

Компоненты, мас.%	447-8				904-42				904-31	
	центр (n=1)	край (n=2)	центр (n=1)	край (n=1)	центр (n=1)	край (n=1)	зона 1 (n=1)	зона 2 (n=1)	зона 1 (n=3)	зона 2 (n=3)
TiO ₂	41.08	41.61	44.00	42.52	42.85	43.21	42.50	42.38	42.48	44.75
FeO	0.44	0.61	0.61	0.48	0.70	-	0.46	0.51	-	-
Na ₂ O	8.59	9.01	8.45	8.69	7.92	8.12	7.69	7.84	8.27	8.18
CaO	3.94	4.04	4.63	4.08	4.43	4.90	4.74	4.35	4.07	5.31
SrO	1.39	1.33	1.67	1.28	1.84	1.81	1.75	1.54	1.91	1.75
La ₂ O ₃	10.19	9.86	10.31	9.68	9.36	8.91	9.53	9.89	9.68	8.80
Ce ₂ O ₃	18.96	18.11	19.42	18.85	18.73	18.45	18.17	18.36	18.73	18.33
Pr ₂ O ₃	1.20	1.71	-	1.62	1.96	1.08	2.12	1.32	1.39	1.51
Nd ₂ O ₃	4.10	4.58	3.84	4.07	3.96	3.84	4.96	4.10	3.85	4.12
Nb ₂ O ₅	9.15	8.40	7.07	7.76	7.25	8.15	7.16	7.92	8.11	6.45
Ta ₂ O ₅	He опр.	He опр.	He опр.	He опр.	1.00	1.53	0.92	1.07	0.91	-
ThO ₂	0.96	0.74	-	0.97	-	-	-	0.72	0.60	0.80
Lop	0.579	0.585	0.574	0.592	0.570	0.532	0.570	0.567	0.568	0.555
Lu	0.190	0.177	0.149	0.166	0.163	0.185	0.156	0.178	0.180	0.135
Prv	0.194	0.202	0.232	0.207	0.218	0.236	0.228	0.214	0.201	0.263
Tas	0.037	0.036	0.045	0.035	0.049	0.047	0.046	0.041	0.051	0.047

Таблица 6. Окончание

Компоненты, мас.%	904-34			904-49				
	зона 1 (n=1)	зона 2 (n=4)	зона 3 (n=2)	центр (n=1)	край (n=2)	зона 1 (n=3)	зона 2 (n=1)	зона 3 (n=1)
TiO ₂	44.46	43.10	38.33	41.66	44.34	44.66	43.09	44.22
FeO	0.45	0.35	-	0.46	0.57	0.50	-	0.58
Na ₂ O	7.55	8.45	10.10	7.76	8.04	7.82	7.96	7.57
CaO	5.68	4.19	1.94	4.33	4.79	5.58	4.07	6.30
SrO	1.82	1.52	1.91	1.20	1.22	1.42	1.49	1.74
La ₂ O ₃	8.81	9.95	8.91	9.99	8.80	9.58	9.51	9.64
Ce ₂ O ₃	18.12	18.54	16.36	18.12	18.57	18.74	18.74	16.67
Pr ₂ O ₃	1.89	0.70	0.50	1.56	1.37	1.21	1.62	-
Nd ₂ O ₃	4.55	4.03	3.54	4.10	4.00	3.72	4.24	4.26
Nb ₂ O ₅	5.71	8.50	15.80	8.50	6.67	6.25	7.38	7.86
Ta ₂ O ₅	-	0.28	0.56	0.86	1.13	-	1.12	1.16
ThO ₂	0.96	0.39	2.05	-	0.50	0.52	0.78	-
Lop	0.556	0.567	0.506	0.568	0.566	0.558	0.585	0.490
Lu	0.118	0.183	0.344	0.187	0.157	0.130	0.171	0.170
Prv	0.278	0.209	0.098	0.213	0.243	0.274	0.204	0.296
Tas	0.048	0.041	0.052	0.032	0.034	0.038	0.040	0.044

Примечание: анализы нормированы на сумму 100%.

* В анализе отмечается содержание Gd₂O₃ 1.04 мас.%.

СОСТАВЫ МИНЕРАЛОВ

Таблица 7. Химические составы эвдиалитов из лопаритсодержащих пород Ловозерского щелочного массива

Компоненты, мас.%	C-79*	C-102	ВК-54	904-46	ВК-23	C-74
	(n=1)	(n=4)	(n=2)	(n=3)	(n=3)	(n=2)
SiO ₂	49.12	54.03	52.56	50.39	53.23	53.01
TiO ₂	-	0.60	1.00	0.71	0.57	0.30
Al ₂ O ₃	-	-	-	-	-	0.14
FeO	2.71	2.13	1.70	2.83	3.15	1.68
MnO	4.74	5.98	1.36	2.26	2.78	3.55
Na ₂ O	11.52	10.78	17.49	11.84	13.18	12.06
K ₂ O	0.54	0.16	0.21	0.19	0.25	0.25
CaO	9.43	6.55	10.05	10.50	8.01	7.36
BaO	0.69	-	0.72	-	-	0.77
SrO	1.82	0.51	-	2.45	-	1.20
La ₂ O ₃	0.75	0.76	-	0.57	0.75	0.71
Ce ₂ O ₃	0.81	1.58	0.47	0.85	0.57	1.15
Nd ₂ O ₃	0.58	0.68	-	-	-	-
Nb ₂ O ₅	2.60	0.89	1.13	1.61	0.60	1.12
ZrO ₂	12.39	12.80	11.37	13.04	14.04	14.56
Cl	0.66	0.72	0.78	1.11	1.51	0.54
SO ₃	-	-	0.55	-	-	-

Таблица 7. Окончание

Компоненты, мас.%	447-8	904-26	904-42	904-34	904-49
	(n=1)	(n=3)	(n=3)	(n=2)	(n=4)
SiO ₂	52.24	49.06	48.40	54.92	51.90
TiO ₂	-	0.62	0.23	0.66	0.56
Al ₂ O ₃	-	-	-	0.39	-
FeO	0.75	2.72	0.88	1.20	2.09
MnO	2.80	4.89	4.99	3.63	2.32
Na ₂ O	12.39	13.22	12.91	11.72	16.04
K ₂ O	0.17	0.25	0.23	0.25	0.24
CaO	10.12	7.59	7.70	7.43	9.85
BaO	1.33	-	0.77	-	-
SrO	1.44	2.11	2.95	-	-
La ₂ O ₃	0.49	0.36	1.02	-	-
Ce ₂ O ₃	1.02	0.79	1.78	0.75	-
Nd ₂ O ₃	-	-	0.68	-	-
Nb ₂ O ₅	1.73	1.77	2.38	1.13	-
ZrO ₂	12.59	14.55	13.44	15.60	14.30
Cl	0.72	0.84	0.49	0.72	0.87
SO ₃	0.38	0.34	0.56	-	-

Примечание: * анализ содержит MgO 0.40 мас.%.

Таблица 8. Химические составы некоторых аксессуарных минералов из лопаритсодержащих пород Ловозерского щелочного массива

Компоненты, мас.%	С-79			С-102		447-7	447-31	904-50		904-26	904-31	904-42
	ильменит (n=1)	сфен (n=1)	апатит (n=3)	рамзаит (n=1)	содалит (n=6)	апатит (n=2)	ильменит (n=2)	сфен (n=3)	рамзаит (n=3)	содалит (n=3)	рамзаит (n=1)	рамзаит (n=4)
SiO ₂	-	31.66	0.67	34.56	36.56	1.06	-	30.06	31.04	36.67	33.51	33.42
TiO ₂	50.63	39.30	-	41.93	-	-	51.47	41.91	32.17	-	46.80	44.42
Al ₂ O ₃	-	-	-	-	29.62	-	-	-	-	30.01	-	-
MgO	-	-	-	-	0.18	-	0.15	-	0.33	-	-	-
FeO	28.99	0.62	0.18	0.83	0.68	0.32	37.10	-	3.98	0.69	0.52	1.00
MnO	18.54	-	-	-	-	-	9.24	-	3.05	-	-	-
Na ₂ O	-	1.55	0.93	18.30	25.34	0.96	-	1.88	11.66	25.15	17.33	17.46
K ₂ O	-	-	-	-	-	-	-	-	0.53	-	-	-
CaO	-	25.16	40.69	-	-	41.92	-	25.06	0.79	-	0.15	0.15
BaO	1.84	1.71	-	1.15	-	-	1.60	-	-	-	-	-
SrO	-	-	6.78	-	-	5.00	-	-	16.45	-	-	-
La ₂ O ₃	-	-	1.54	-	-	1.98	-	-	-	-	-	-
Ce ₂ O ₃	-	-	2.65	-	-	3.99	-	-	-	-	-	-
Pr ₂ O ₃	-	-	-	-	-	0.45	-	-	-	-	-	-
Nd ₂ O ₃	-	-	0.86	-	-	1.32	-	-	-	-	-	-
Nb ₂ O ₅	-	-	1.05	2.67	-	0.74	0.44	1.09	-	-	1.69	3.55
ZrO ₂	-	-	-	0.56	-	-	-	-	-	-	-	-
UO ₂	-	-	0.45	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P ₂ O ₅	-	-	40.67	-	-	39.86	-	-	-	-	-	-
F	-	-	3.53	-	-	2.40	-	-	-	-	-	-
Cl	-	-	-	-	6.46	-	-	-	-	6.45	-	-
SO ₃	-	-	-	-	1.16	-	-	-	-	1.03	-	-

Примечание: анализы нормированы на сумму 100%.

пироксенов разрыв (разделение тренда составов на две ветви) А.Н. Коробейников и К. Лаайоки (1993) связывают с критическим нарастанием флюидного давления. Наши данные позволяют построить тренды составов клинопироксенов в пределах одного образца, что выявляет последовательность кристаллизации и характеризует изменение физико-химических условий в процессе формирования отдельной породы.

Вследствие небольшого содержания геденбергитового компонента в составе клинопироксенов использование минеральных геотермометров с их участием для изученных пород не представляется возможным, поскольку существующие клинопироксен-содержащие геотермометры сделаны без учета данных по твердым растворам щелочных клинопироксенов, в которых содержится большое количество трехвалентного железа (эгиринового минала). Однако, сопоставление полученного тренда составов клинопироксенов

(рис. 2а) с трендом клинопироксенов из содалитовых сиенитов (рис. 2б) Ловозерского массива (Сук и др., 2003, 2007б) позволяет предполагать, что температуры образования клинопироксенов в лопаритсодержащих породах не превышали 600–650°C. Такое сопоставление представляется нам правомерным, так как образцы исследуемых в настоящей работе пород и изученных нами ранее содалитовых сиенитов отобраны из одних и тех же скважин, располагаются в непосредственной близости по глубине и принадлежат к одной и той же толще пород. Содалитовые сиениты слагают прослои или линзы среди фойяитов, луявритов и трахитоидных луявритов дифференцированного комплекса массива. Это позволяет предполагать сходные РТ-параметры эволюции данных пород. Как указывалось ранее (Коробейников, Лаайоки, 1993), клинопироксены Ловозера образуют единую эволюционную серию, что свидетельствует о том, что и сами ука-

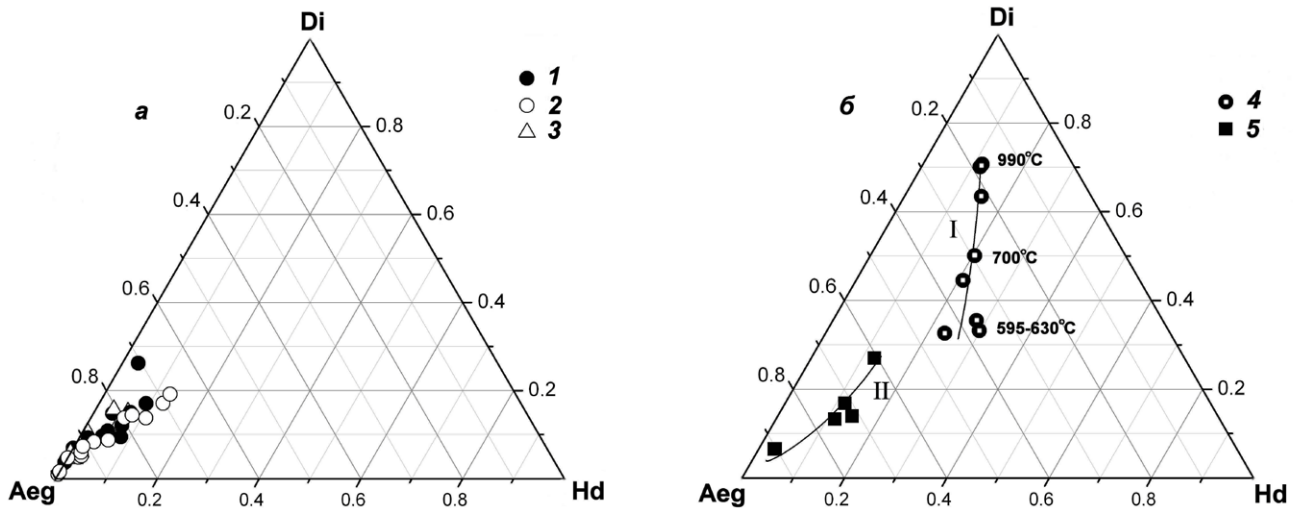


Рис. 2. Составы клинопироксенов из лопаритсодержащих пород (а) в сопоставлении с составами клинопироксенов из содалитовых сиенитов (б) Ловозерского щелочного массива (Сук и др., 2007а) (мол.%). Образцы взяты из скважин (а): 1 – 447; 2 – 904; 3 – 448 и 178. Составы клинопироксенов (б): 4 – клинопироксены высокотемпературной ветви тренда (I); 5 – клинопироксены низкотемпературной ветви тренда (II). Представленные температуры определены по минеральным геотермометрам, содержащим клинопироксен (Сук и др., 2007а, 2007б; Suk et al., 2009).

занные породы представляют собой серию продуктов кристаллизации одной исходной магмы.

Щелочные амфиболы. В табл. 2 представлены составы щелочных амфиболов, которые встречаются главным образом в сростаниях с кристаллами клинопироксена. Характерным является присутствие в амфиболах фтора. Составы амфиболов хорошо иллюстрируются диаграммой в координатах $Ca/(Ca+Na+K) - Al/(Al+Fe+Mg+Mn+Ti+Si)$ (Перчук, 1970; Перчук, Рябчиков, 1976), представленной на рис. 3. В соответствии с этой диаграммой амфиболы изученных пород в основном представляют собой твердый раствор от рихтерит-рибекитового до рихтерит-арфведсонит-рибекитового состава, причем амфиболы из ювитовых пород отличаются от амфиболов из луавритов большим содержанием рибекитовой составляющей. Щелочность амфиболов возрастает в ряду содалитовый сиенит – луаврит – эвдиалитовый луаврит – ювитовые породы (рис. 3) (Suk et al., 2009). При этом составы амфиболов соответствуют общей направленности изменения составов клинопироксенов (рис. 2). С увеличением эгириновой составляющей в клинопироксенах, уменьшается кальциевость (увеличивается доля натрия) в амфиболах. Это также свидетельствует о повышенной щелочности при формировании изученных пород. Магнезиальность амфиболов изученных образцов колеблется от 0.600 до 0.386. Следует отметить также увеличение мольной доли марганца в амфиболах, синхронное с ростом их щелочности.

Нефелин. Составы нефелина изученных образцов представлены в табл. 3. Средняя мольная доля калия в нефелине из луавритов составляет

0.181, а из ювитов, уртит-ювитов и фойяит-ювитов – 0.213 (Сук и др., 2007а), что выше, чем средняя мольная доля калия в нефелине содалитовых сиенитов – 0.16 (Сук и др., 2007). Температуры образования нефелина из содалитовых сиенитов, оцененные по содержанию избыточного кремнезема в нефелине (Дир и др., 1966; Hamilton, MacKenzie, 1960), соответствуют ~ 600-700°C. Нефелины лопаритсодержащих пород характеризуются большей калиевостью, которая увеличивается от луавритов к ювитовым породам. При этом в образцах с более калиевым нефелином количество алюминия в нем также возрастает. Содержание избыточного кремнезема в нефелине луавритов варьирует от ~ 4.5 до 6 мол.% (что по данным Гамильтона (Hamilton, McKenzie, 1960; Дир и др., 1966) соответствует температурам от 600 до 760°C), а в породах типа ювитов, уртит-ювитов и фойяит-ювитов составляет менее 3 мол.% (что соответствует температурам ниже 500°C). Это отражает более высокотемпературные условия образования нефелинов из луавритов по сравнению с ювитовыми породами и сходные условия образования с нефелинами содалитовых сиенитов. Кроме того, количество железа в нефелине из луавритов существенно выше, чем в нефелине из ювитовых пород. При этом наблюдается прямая корреляционная зависимость содержания железа в нефелине и температуры образования, оцененной по содержанию избыточного кремнезема.

Полевые шпаты. В табл. 4 представлены составы полевых шпатов. Встречаются альбит и калиевый полевой шпат, которые могли образовываться в результате распада полевошпатового

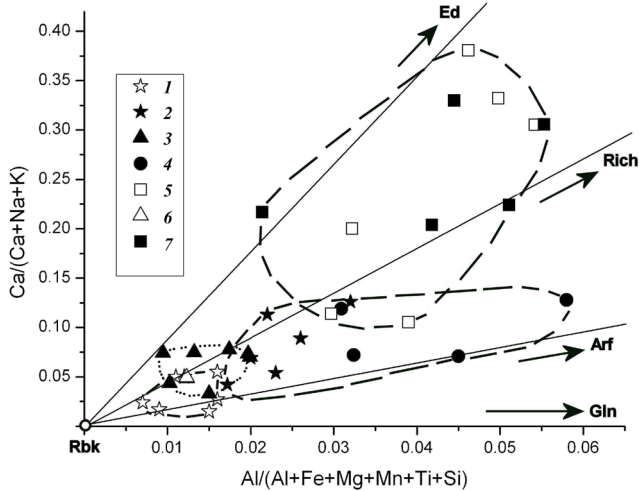


Рис. 3. Составы амфиболов из пород Ловозерского щелочного массива: 1 – из ювитовых пород (наши данные); 2 – из люавритов (наши данные); 3 – из эвдиалитовых люавритов (наши данные); 4 – из люавритов (Власов и др., 1959; Семенов, 1972); 5 – из содалитовых сиенитов (наши данные); 6 – из эвдиалитовых люавритов (Семенов, 1972); 7 – из содалитовых сиенитов (Власов и др., 1959; Семенов, 1972).

твердого раствора. Составы сосуществующих альбитов и калиевых полевых шпатов позволяют оценивать температуру их образования $\sim 400^\circ$ (Nekvasil, 1994). Однако, эта температура не является температурой кристаллизации полевого шпата из расплава, а определена из составов сосуществующих фаз альбита и калиевого полевого шпата, образовавшихся при распаде их твердого раствора. Для корректировки данных по условиям их образования нами проводились рентгеновские исследования щелочных полевых шпатов из пород Ловозерского массива.

Расчет параметров элементарных ячеек проводился для пространственной группы $C1(-)$ триклинной сингонии по 31-44 отражениям в интервале углов 7-40 (teta) с использованием программ LCC, PUDI.

Для полевого шпата состава $K_{0.98}Al_{0.98}Si_{3.01}O_8$ из трахитоидного люаврита были определены следующие параметры элементарной ячейки: $a=8.598(1)$ [Å], $b=12.972(1)$ [Å], $c=7.215(1)$ [Å], $\alpha=90.724(9)$ [°], $\beta=115.921(10)$ [°], $\gamma=87.870(8)$ [°], $V=723.2(2)$ [Å³], а для калиевого полевого шпата состава $K_{0.96}Na_{0.04}Al_{0.98}Si_{3.00}O_8$ из фойяита – $a=8.604(1)$ [Å], $b=12.970(1)$ [Å], $c=7.228(1)$ [Å], $\alpha=90.565(9)$ [°], $\beta=116.111(6)$ [°], $\gamma=87.923(8)$ [°], $V=723.7(2)$ [Å³]. Нанесение полученных данных на диаграмму в координатах параметров b и c элементарной ячейки твердых растворов (Na, K)-полевых шпатов (Blasi, Blasi, 1994) показывает, что природные полевые шпаты пород Ловозерского массива попадают в поле устойчивости упорядоченного микроклина, что подтверждает низкие температуры их формирования. По дан-

ным В.Н. Зырянова (1981) температура перехода микроклин – ортоклаз составляет $375 \pm 50^\circ C$, что хорошо согласуется с нашими данными.

Лопариты. Лопариты представляют собой твердые растворы нескольких минералов, (лопарита, перовскита, лушита и таусонита). Как отмечалось ранее, в составах лопаритов в вертикальном разрезе массива снизу вверх возрастает содержание Sr, Nb, Ta, Th, Na и падают концентрации Ca, Fe, Ti, Ce, La, Nd (Когарко и др., 1996; Сухарев, 1990). В таблице 5 представлены составы лопаритов изученных нами пород. Sm, Gd и Lu в изученных лопаритах микрозондовым анализом не обнаружены. В некоторых образцах присутствуют лопариты разного состава (в табл. 5 их составы обозначены как Lop1 и Lop2). На рис. 4а составы изученных лопаритов отображены в виде треугольной диаграммы лопарит ($NaREETi_2O_6$) – перовскит ($Ca_2Ti_2O_6$) + таусонит ($Sr_2Ti_2O_6$) – лушит ($Na_2(Nb,Ta)_2O_6$). Наиболее значимо лопариты из пород дифференцированного комплекса и комплекса эвдиалитовых люавритов различаются по содержанию Sr и Nb (более высокому в породах комплекса эвдиалитовых люавритов) и по содержанию Ti, Ce, La (более высокому в породах дифференцированного комплекса).

В изученных образцах обнаружены зональные кристаллы лопарита (рис. 5), при этом составы зон различаются по содержанию редких земель, титана, кальция, ниобия, стронция (табл. 6), иногда значительно. Наблюдается как прямая зональность (с увеличением содержания ниобия, стронция и в меньшей степени натрия и уменьшением содержания титана и редких земель от центра к краю кристалла), так и обратная. Такую зональность можно назвать ритмичной или кольцевой (рис. 5б). Встречается и так называемая «пятнистая» зональность, при которой отдельные зоны имеют неправильную форму (рис. 5а). В пределах одного образца могут присутствовать как зональные кристаллы лопарита, так и лопариты разного состава (табл. 5 и 6), по содержанию основных компонентов соответствующие выделенным зонам. Составы зон варьируют по содержанию титана, ниобия, редкоземельных элементов, стронция, тория (табл. 6). При этом содержание титана, редкоземельных элементов и тория находятся в прямой зависимости друг от друга и в обратной от содержания ниобия и стронция. Для примера составы зон некоторых кристаллов нанесены на треугольную диаграмму (рис. 4б). Аналогичные типы зональности в кристаллах лопарита наблюдались Л.Н. Когарко с соавторами (Kogarko et al., 2002). Возникновение прямой кольцевой зональности авторы связывали с кристаллизацией в условиях понижения температуры, а обратной – с одновременной кристаллизацией лопарита и таких минералов, как

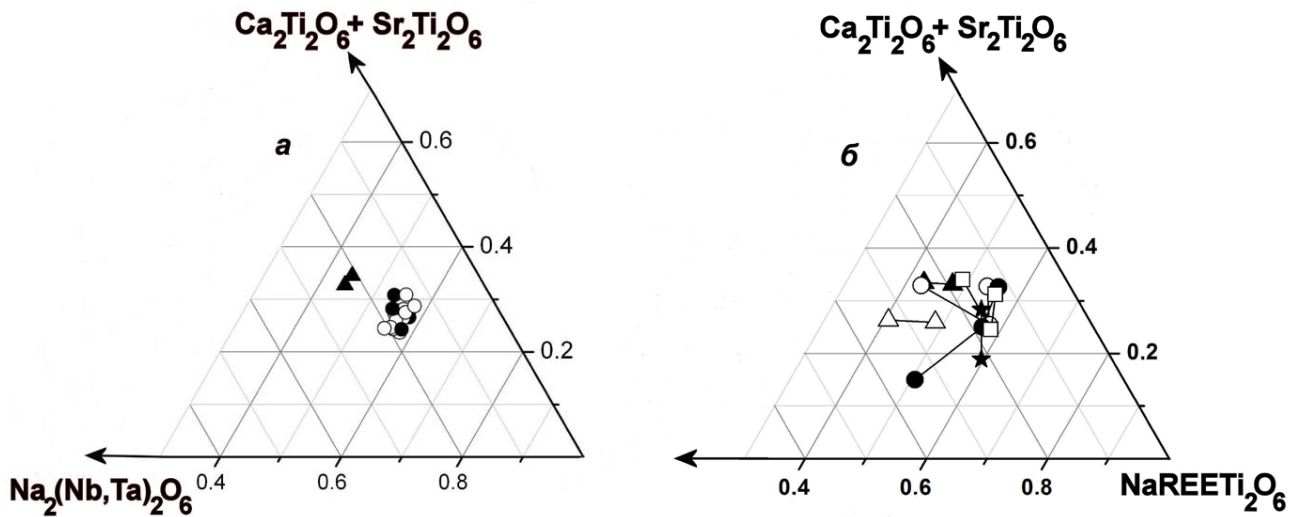


Рис. 4. Составы лопаритов из лопаритсодержащих пород Ловозерского щелочного массива. Составы незональных кристаллов лопарита (а) (по табл. 5). Примеры составов зональных кристаллов лопарита (б) (по табл. 6). Одинаковыми значками показаны составы зон одного кристалла.

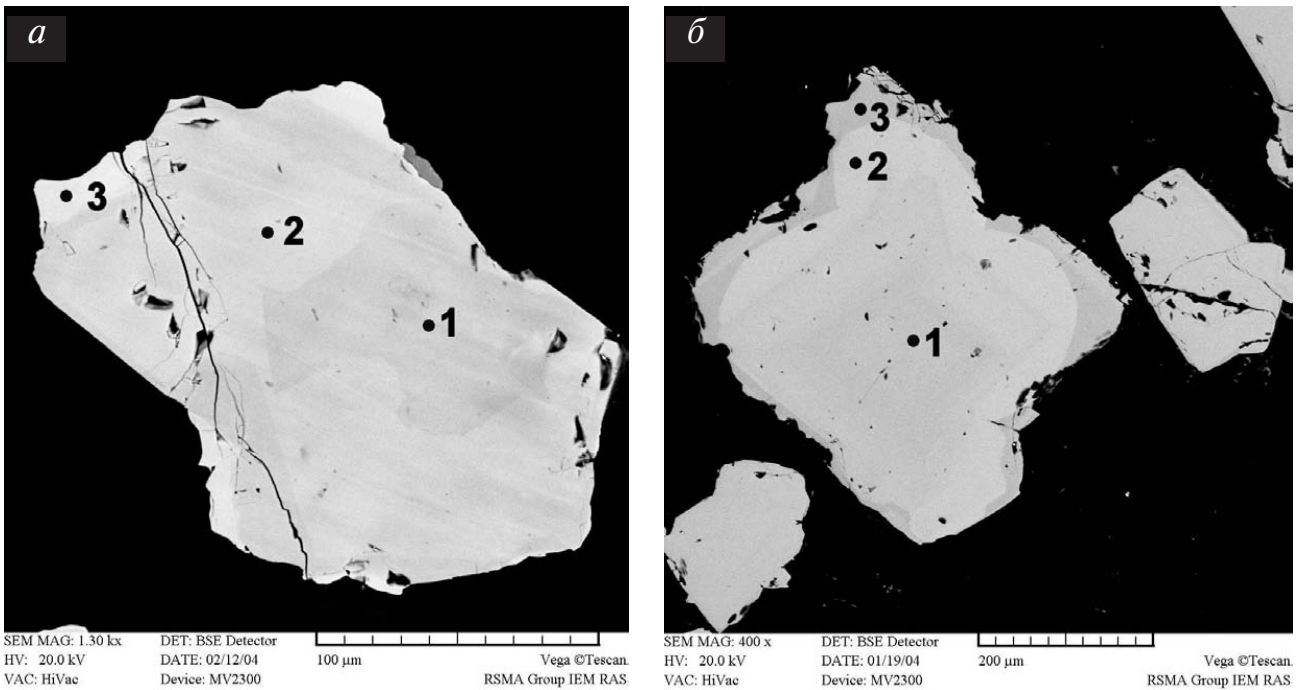


Рис. 5. Зональные кристаллы лопарита из лопаритсодержащих пород Ловозерского щелочного массива: а – образец 904-34; б – образец 904-49. Цифры у точек соответствуют номерам зон в табл. 6. Фотографии сделаны в отраженных электронах. Масштабная линейка соответствует 100 мкм (а) и 200 мкм (б).

лампрофиллит, Sr-апатит, пироклор и других, имеющих коэффициенты разделения Sr, Nb и Na между кристаллами и расплавом большие, чем лопарит. «Пятнистая» зональность могла быть связана с частичной перекристаллизацией лопарита после его образования.

Ранее нами (Сук, Котельников, 2008) экспериментально исследовалось образование лопарита в сложных силикатно-солевых системах, содержащих карбонат, хлорид, фторид или сульфат натрия, в широком диапазоне температур (400-1200°C) и давлении 1-2 кбар. Проведенные

исследования выявили зависимость состава лопаритов от физико-химических условий их образования (флюидного состава), а также показали возможность кристаллизации лопарита в природе в широком интервале температур. В кристаллах лопарита обнаруживалась зональность, которая проявлялась в изменении содержаний Ti, Nb, La, Ce, Y, Ca, Sr и, вероятно, была связана с кинетическими особенностями процесса кристаллизации. Наблюдалась как кольцевая (ритмичная), так и «пятнистая» зональность, сопоставимая с зональностью лопаритов Ловозерского массива.

На основании полученных экспериментальных результатов можно предположить, что составы и зональность лопаритов Ловозерского массива наряду с другими факторами также могли быть обусловлены влиянием флюида сложного состава на кристаллизацию лопарита из расплава.

Эвдиалиты варьируют по составу (табл. 7). Большинство из них характеризуется присутствием редкоземельных элементов, ниобия, бария. Эвдиалиты из пород дифференцированного комплекса содержат стронций в отличие от эвдиалитов из пород комплекса эвдиалитовых луавритов (образцы ВК-23 и ВК-54). Летучие компоненты представлены хлором и иногда SO_3 .

Содалит представляет собой хлор-содалит с содержаниями SO_3 1.03-1.16 мас.% (табл. 8), что соответствует мольной доле серы в содалите 0.066-0.076. Таким образом, содалит изученных лопаритсодержащих пород резко отличается от содалитов из содалитовых сиенитов, изученных ранее (Сук и др., 2007), в которых он представлен главным образом нозеаном (сульфат-содалитом).

Апатит представляет собой стронциевый фтор-апатит с небольшим количеством редких земель (табл. 8).

Среди других акцессорных минералов были проанализированы также сфен, лоренценит, мангано-ильменит (табл. 8) с содержаниями MnO от 9.24 до 18.54 мас.%. Характерным является присутствие в составе мангано-ильменита бария. Обнаружены единичные зерна пирохлора, лампрофиллита, ринколита, стенструпина, селадонита.

В качестве вторичных минералов присутствуют натролит и анальцим. Это свидетельствует о протекании относительно низкотемпературных ($<250^\circ C$) гидротермальных процессов.

Таким образом, полученные нами данные отражают длительный процесс формирования минеральных парагенезисов изученных пород с выделением несколько генераций отдельных минералов (в частности, клинопироксенов) до температур $\sim 250^\circ C$, отражающих протекание постмагматических гидротермальных процессов.

Составы изученных породообразующих и акцессорных минералов свидетельствуют о повышенной щелочности при формировании исследуемых пород. Кроме того, минералы, в состав которых входят летучие компоненты, могут служить индикаторами флюидного режима петрогенеза (Перчук, 1973). Среди изученных минералов таковыми являются содалит, эвдиалит, апатит. Это может свидетельствовать о присутствии флюидов, содержащих воду, фтор, хлор и в меньших количествах серу.

1. Методом микрозондового анализа изучены составы породообразующих и акцессорных минералов лопаритсодержащих пород Ловозерского щелочного массива, и выявлены их характерные особенности. Тренд составов клинопироксенов из этих пород соответствует низкотемпературной ветви тренда для клинопироксенов щелочных пород (в том числе содалитовых сиенитов Ловозерского массива). Это, по-видимому, связано с повышенной щелочностью (о чем свидетельствует также состав амфиболов), а также с повышенным содержанием флюидных компонентов (в том числе солевых) при их образовании. Полученный тренд отражает последовательность кристаллизации и характеризует изменение физико-химических условий в процессе формирования отдельной породы.

2. Показано, что щелочность амфиболов возрастает в ряду содалитовый сиенит – луаврит – эвдиалитовый луаврит – ювитовые породы. В этом же ряду пород возрастает средняя мольная доля калия в нефелине. На основе нефелинового геотермометра, предложенного Гамильтоном, делается вывод о более высокотемпературных условиях образования нефелинов из луавритов по сравнению с ювитовыми породами.

3. Полученные данные отражают длительный процесс формирования минеральных парагенезисов изученных пород с выделением несколько генераций отдельных минералов (в частности, клинопироксенов) до температур $\sim 250^\circ C$, отражающих протекание постмагматических гидротермальных процессов.

4. Составы породообразующих и акцессорных минералов свидетельствуют о повышенной щелочности при формировании исследуемых пород, а также о присутствии флюидов, содержащих воду, фтор, хлор и в меньших количествах серу.

Авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории физических методов исследования ИЭМ РАН А.Н. Некрасову за помощь в проведении микрозондовых анализов и подготовке фотографий образцов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований, проекты №№ 01-05-64839, 06-05-64904, 07-05-00217 и НШ-3634.2010.5.

Список литературы

- Буссен И.В., Сахаров А.С.* Геология Ловозерских тундр. Л.: Наука, 1967. 125 с.
Власов К.А., Кузьменко М.В., Еськова Е.М. Ловозерский щелочной массив. М.: Изд. АН СССР, 1959. 623 с.

- Герасимовский В.И., Волков В.П., Когарко Л.Н. и др.* Геохимия Ловозерского щелочного массива. М.: Наука, 1966. 396 с.
- Дир У.А., Хауи Р.А., Зусман Дж.* Породообразующие минералы. М.: Мир, 1966. Т. 4. 482 с.
- Елисеев Н.А., Федоров Э.Е.* Ловозерский плутон и его месторождения // Матер.ЛАГЕДАН СССР, Геология докембрия. 1953. Вып. 1. С. 23-55.
- Зырянов В.Н.* Фазовое соответствие в системах щелочных полевых шпатов и фельдшпатоидов. М.: Наука, 1981. 181с.
- Ифантопуло Т.Н., Осокин Е.Д.* Акцессорный лопарит из стратифицированной щелочной интрузии // Новые данные по минералогии месторождений щелочных формаций. / Отв. ред. Семенов Е.И. М.: ИМГРЭ, 1979. С. 20-28.
- Когарко Л.Н., Вильямс Т., Осокин Е.Д.* Эволюция составов лопарита Ловозерского массива // Геохимия. 1996. № 4. С. 294-297.
- Коробейников А.Н., Лаайоки К.* *есть ли отчество?* Нет Эволюция состава клинопироксенов из интрузивных пород Ловозерского щелочного массива (петрологический аспект) // Геохимия. 1993. № 8. С. 1143-1150.
- Перчук Л.Л.* Равновесия порообразующих минералов. М.: Наука, 1970. 391с.
- Перчук Л.Л.* Термодинамический режим глубинного петрогенеза. М.: Наука, 1973. 320 с.
- Перчук Л.Л., Рябчиков И.Д.* Фазовое соответствие в минеральных системах. М.: «Недра», 1976. 287 с.
- Семенов Е.И.* Минералогия Ловозерского щелочного массива. М.: Наука, 1972. 307 с.
- Сук Н.И., Котельников А.Р., Ковальский А.М.* Условия минералогенеза Ловозерского щелочного массива (анализ минералов и экспериментальные данные) // Всероссийский семинар «Геохимия магматических пород» и школа «Щелочной магматизм Земли» 20-21 марта 2002 г. Тез. докл. М.: ГЕОХИ РАН, 2002. С. 88-89.
- Сук Н.И., Котельников А.Р., Чевычелов В.Ю., Ковальский А.М.* Условия образования пород Ловозерского щелочного массива по данным геотермометрии // XXI Всероссийский семинар «Геохимия магматических пород» и школы «Щелочной магматизм Земли» 3-5 сент. 2003 г. Тез. докл. Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2003. С. 148.
- Сук Н.И., Котельников А.Р., Ковальский А.М.* Условия образования пород расслоенных щелочных комплексов (анализ минералов) // «Происхождение магматических пород» // Материалы международного (X всероссийского) петрографического совещания «Петрография XXI века», г. Апатиты 20-22 июня 2005 г. Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2005. Т. 2. С. 245-247.
- Сук Н.И., Котельников А.Р., Ковальский А.М.* Лопариты в породах Ловозерского щелочного массива // «Минералогия Урала – 2007». V Всероссийское совещание (Миасс, 20-25 августа 2007 г.). Сборник научных статей. Миасс-Екатеринбург: УрО РАН. 2007а. С. 285-288.
- Сук Н.И., Котельников А.Р., Ковальский А.М.* Минеральная термометрия и состав флюидов содалитовых сиенитов Ловозерского щелочного массива // Петрология. 2007б. Т. 15. № 3. С. 311-329.
- Сук Н.И., Котельников А.Р.* Экспериментальное исследование образования лопарита в сложных флюидно-магматических системах // ДАН. 2008. Т. 419. № 4. С. 543-546.
- Blasi A., Blasi C.* Aspects of alkali feldspar characterization: prospects and relevance to problems outstanding // Feldspars and their reactions. NATO ASI series / I. Parsons (ed.), 1994. V. 421. P. 51-101.
- Hamilton D.L., McKenzie W.S.* Nepheline solid solutions in the system $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 - \text{KAlSi}_3\text{O}_8 - \text{SiO}_2$ // Journal of Petrology. 1960. V. 1. Pt. 1. P. 56-72.
- Kogarko L.N., Williams C.T., Wooley A.R.* Chemical evolution and petrogenetic implications of loperite in the layered, agpaitic Lovozero complex, Kola Peninsula, Russia // Mineral. and Petrol. 2002. V. 74. P. 1-24.
- Kogarko L.N., Williams C.T., Wooley A.R.* Compositional evolution and cryptic variation in pyroxenes of the peralkaline Lovozero intrusion, Kola Peninsula, Russia // Mineral. Magazine. 2006. V. 70. № 4. P. 347-359.
- Nekvasil H.* Ternary feldspar/melt equilibria: a review // Feldspars and their reactions / Ed. I. Parsons. NATO ASI series. 1994. V. 421. 650 p.
- Suk N.I., Kotelnikov A.R., Kovalsky A.M.* Iron-magnesium minerals from differentiated rocks of Lovozersky alkaline massif // Geochemistry, Mineralogy and Petrology. Sofia. 2009. V. 47. P. 97-107.

СУК и др.

**COMPOSITIONS OF MINERALS OF LOPARITE-BEARING ROCKS
OF LOVOZERSKII ALKALINE MASSIF AND PHYSICS-CHEMISTRY
CONDITIONS OF MINERAL PARAGENESIS FORMATION**

N.I. Suk, A.R. Kotelnikov, A.M. Kovalskii

*Institute of experimental mineralogy RAS, Chernogolovka, Moscow district, 142432;
e-mail: sukni@iem.ac.ru*

A number of loparite-bearing rocks samples of Lovozerskii alkaline massif (lujavrites, juvites, fojaite-juvites ets) collected from differentiated complex and particulate from eudialite lujavrite complex have been investigated.

The compositions of rock-forming and accessory minerals have been studied by microprobe analysis.

The trend of clinopyroxene compositions from these rocks corresponds to low temperature part of trend for all alkaline rocks (and sodalite syenite particularly) of Lovozerskii massif. It is likely to connect with high alkalinity (the amphibole compositions testify this fact, too) and with elevated content of fluid components during their formation.

It has been shown that amphibole alkalinity increases in the sequence sodalite syenite→lujavrite→eudialite-lujavrite→juvitic rocks. In this sequence the average mole fraction of potassium in nepheline increases too. Based on the nepheline geothermometer proposed by Hamilton the conclusion about higher temperature conditions of nepheline from lujavrites formation is making.

Keywords: clinopyroxene, amphibole, nepheline, loparite, mineralogenesis, Lovozerskii alkaline massif.