

## ЭВОЛЮЦИЯ ПИРОКСЕНОВ ЛОВОЗЕРСКОГО РЕДКОМЕТАЛЬНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (НИЖНЯЯ ЗОНА)

© 2021 г. И. И. Шубин<sup>a, b, \*</sup>, М. И. Филина<sup>a</sup>, Л. Н. Когарко<sup>a, \*\*</sup>

<sup>a</sup>Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, ул. Косыгина, 19, Москва, 119991 Россия

<sup>b</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Геологический факультет, Ленинские горы, Москва, 119991 Россия

\*e-mail: shubin.ivann@mail.ru

\*\*e-mail: kogarko@geokhi.ru

Поступила в редакцию 13.02.2020 г.

После доработки 16.06.2020 г.

Принята к публикации 16.06.2020 г.

Впервые были изучены пироксены из наиболее глубинных пород Ловозерского месторождения. Исследование геохимии и минералогии этих пород представляют большой научный интерес, так как, являясь наименее дифференцированными породами, они содержат в себе информацию о составе исходной магмы. По данным микрозондового анализа клинопироксены эволюционируют от ранних диопсид-геденбергит-авгитовых до более поздних щелочных эгирин-авгитовых разновидностей. С возрастанием стратиграфической высоты разреза интрузии содержания Na, Fe<sup>3+</sup> и Ti увеличиваются, в то время как содержания Mg, Ca, Fe<sup>2+</sup> и Zr уменьшаются. Таким образом, изоморфное замещение в пироксенах нижней зоны происходит по схеме (Ca, Mg, Fe<sup>2+</sup>, Zr) → (Na, Fe<sup>3+</sup>, Ti).

**Ключевые слова:** щелочной магматизм, эволюция состава клинопироксенов, Ловозерский щелочной массив

**DOI:** 10.31857/S001675252101009X

### ВВЕДЕНИЕ

Пироксены являются порообразующими минералами для многих магматических систем. В химическом составе пироксенов записана длительная дифференциация исходной магмы, это характерно также для щелочных систем, в которых на эволюцию состава клинопироксенов влияет ряд параметров, таких как состав магмы, уровень щелочности, фугитивность кислорода и др. Целью данной работы было исследование химического состава клинопироксенов Ловозерского массива. Для исследования была выбрана практически неизученная нижняя зона интрузии, важной особенностью которой является ее слабая степень расслоенности, что дает основание предполагать, что ее состав близок к составу первичной магмы Ловозерского интрузии.

Первые данные о составе ловозёрских пироксенов были представлены в работах Власова с соавторами (1966) и Герасимовского с соавторами (1966), Коробейникова и др. (1994). Исследования показали, что пироксены значительно обогащены эгириновым компонентом. Однако эволюция состава пироксенов в процессе формирования щелочных интрузии не была детально исследована.

Позднее, в работе Когарко (2006), была более подробно исследована эволюция пироксенов в вертикальном разрезе Ловозерского массива. В настоящей работе авторами приводится исследование наиболее глубинных пород нижней зоны Ловозерского месторождения, ранее практически неизученных. В данной работе были исследованы составы пироксенов из скважин (№ 903, 904, 905), исследуемый материал был взят с глубины 2380–1300 метров, изучено 70 зерен пироксенов различной морфологии.

### ГЕОЛОГИЯ МАССИВА

Ловозерский щелочной массив является одной из крупнейших расслоенных ультращелочных интрузий мира, по запасам редкометалльных и редкоземельных элементов Ловозеро является уникальным месторождением, включающим лопаритовое и эвдиалитовое оруденение. Здесь на лопаритовых месторождениях зарождалась редкометалльная промышленность СССР (Пеков, 2001). В связи с его уникальной рудоносностью и значимостью для промышленности, изучением данного массива занимались ведущие научные коллективы СССР. Было предложено несколько

схем геологического строения интрузии. В дальнейшем мы будем придерживаться схемы строения массива, предложенной сотрудниками ГЕОХИ РАН (Герасимовский и др., 1966).

Ловозерский массив расположен в центральной части Кольского полуострова. Массив находится между двумя крупными озерами, с запада отделен от Хибинского массива озером Умбозером, с востока ограничен озером Ловозеро, в центральной части массива находится озеро Сейдъявр. Форма массива в плане четырехугольная, с закругленными углами, площадь массива 650 км<sup>2</sup>. Он прорывает гранито-гнейсовую толщу нижнепротерозойского возраста, и представляет собой лополитоподобное тело с широким питающим каналом в юго-западной части интрузии (Kogarko et al., 1995; Arzamastsev et al., 1998). В строении массива выделяется 4 интрузивные фазы. Первая фаза представлена равномерно-зернистыми нефелиновыми сиенитами, нефелин-гидросодалитовыми сиенитами, пойкилитовыми гидросодалитовыми сиенитами и метаморфизованными нефелиновыми сиенитами. Породы этой ассоциации расположены в нижних частях массива и в виде ксенолитов по всему массиву. Величина коэффициента агпаитности для этих пород близкая к 1 ( $K_{\text{агп}} = \frac{\text{Na} + \text{K}}{\text{Al}} \times 1.12$ ), таким образом, эти породы можно отнести к переходному миаскитовому ряду. Главные породообразующие минералы – К-Na полевые шпаты, нозеан, нефелин, эгирин-диопсид и магнезиорибекит, биотит, гидросодалит, а характерные акцессорные минералы – ильменит, магнетит, титанит, апатит, ловенит и мозандрит.

Вторая фаза (Фаза II), также известная как расчлененный дифференцированный комплекс, сложена агпаитовыми нефелиновыми сиенитами (коэффициент агпаитности 1.4) и является примером стратифицированной интрузии. Комплекс состоит из различных слоев – горизонтов нефелиновых сиенитов (уртиты, ювиты, фойяиты, луявриты). Мощность горизонтов колеблется от сантиметров до сотен метров. Для второй фазы характерно наличие пачек ритмично повторяющихся пород, состоящих, как правило, из трех (сверху вниз: луяврит, фойяит, уртит) или двух (луяврит, фойяит) горизонтов нефелиновых сиенитов. Интересной особенностью комплекса является характер контактов между горизонтами, в большинстве случаев смена пород происходит постепенно, однако местами обнаружены резкие контакты между луявритами и перекрывающими урритами. Суммарная мощность дифференцированного комплекса составляет около 2400 м. Породообразующими минералами являются нефелин, микроклин, содалит, эгирин и арфведсонит, акцессорными фазами – эвдиалит, лампрофил-

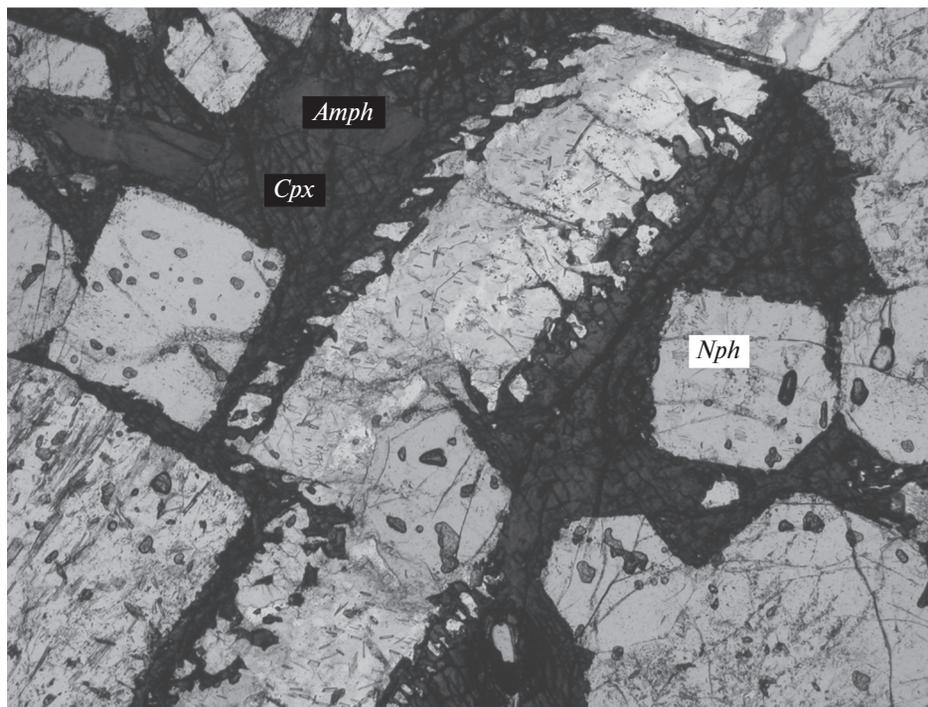
лит, ломоносовит-мурманит, апатит, лопарит, виллитамит.

Фаза III, также известная как Эвдиалитовый комплекс, представляет собой плоское тело (этомолит) мощностью до 450 м, перекрывающее верхнюю часть Дифференцированного комплекса. Третья фаза по объему составляет 18% всей интрузии. Породы Фазы III включают лейко-, мезо- и меланократовые эвдиалитовые луявриты, они несколько более щелочные, коэффициент агпаитности 1.5, и они в большей степени обогащены редкометалльными ультращелочными минералами. Породообразующими минеральными фазами являются нефелин, микроклин, эгирин, арфведсонит, лампрофиллит и эвдиалит. Основными акцессорными минералами – ломоносовит-мурманит, апатит, лопарит, содалит, пироксид и др. Принципиальным различием между этим и Дифференцированным комплексом является наличие идиоморфного эвдиалита, в то время как в дифференцированном комплексе этот минерал кристаллизуется на поздних стадиях и образует ксеноморфные интерстициальные формы. В некоторых частях интрузии можно видеть реакцию между щелочной магмой Фазы III и основными породами кровли, и как результат – образование сфен-апатитовых пород, богатых амфиболами (Герасимовский и др., 1966).

Породы Фазы IV представлены дайками щелочных лампрофиров (камptonиты, мончикиты-фурчиты, тингуаиты и нефелиновые базальты), которые секут все более ранние щелочные породы и заодно окружающие гранито-гнейсы. Они, как правило, распространены в северо-западных и южных частях массива. Главные породообразующие минералы основной массы: эгирин, авгит, К-Na полевой шпат, андезин, баркевикит, биотит.

### ОСОБЕННОСТИ ПЕТРОГРАФИИ И ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПИРОКСЕНА НИЖНЕЙ ЗОНЫ

Подробное описание пород дифференцированного комплекса Ловозерского массива приводилось в работах Герасимовского с соавторами (1966). Мы сосредоточим внимание на описании пироксенов из нижней зоны, которая была пробурена позднее в восьмидесятых годах прошлого века. Пироксены из нижней зоны часто образуют идиоморфные правильно огранные кристаллы, шестиугольной и прямоугольной формы, иногда встречаются скелетные формы кристаллов в промежутках между зерен нефелина и полевого шпата. Реже встречаются ксеноморфные интерстициальные формы. Также пироксен часто присутствует в виде мелких-игльчатых вкраплений в зернах нефелина. Авторами анализировались пироксены как идиоморфной формы, так и скелетной конфигурации, представительные анализы



**Рис. 1.** Фото шлифа 810. Нефелиновый сиенит из нижней зоны дифференцированного комплекса, глубина 1700 м, с типичным агдайтовым порядком кристаллизацией. Идиоморфные кристаллы нефелина в ассоциации с интерстициальным клинопироксеном и амфиболом. Николи параллельны, ув. 10.

пироксенов приведены в табл. 2. Некоторые пироксены претерпевали вторичные изменения, они замещались Ti-содержащими слюдами. Для нефелиновых сиенитов, слагающих Ловозерский массив, характерен агдайтовый порядок кристаллизации, при котором лейкократовые минералы – нефелин и калиевый полевой шпат кристаллизуются раньше меланократовых – пироксена и амфибола как это показано на рис. 1.

Наши и более и более ранние исследования (Gerasimovsky et al., 1966; Korobeynikov, Laaioki, 1994; Kogarko et al., 2006) показали, что ловозёрские пироксены являются членами диопсид-геденбергит-эгириновой серии, с небольшой примесью йохансенитового компонента. Для оценки эволюции состава пироксенов мы использовали коэффициент фракционирования Na–Mg параметр, который базируется на формульных единицах

**Таблица 1.** Основные и аксессуарные минеральные фазы Ловозёрского массива

Название минерала	Формула
Эвдиалит	$Na_{15}Ca_6(Fe^{2+}, Mn^{2+})_3Zr_3(Si, Nb)(Si_{25}O_{73})(O, OH, H_2O)_3(Cl, OH)_2$
Лампрофиллит	$Na_2(Sr, Ba)_2Ti_3(SiO_4)_4(OH, F)_2$
Ломоносовит	$Na_2Ti_2Si_2O_9 \cdot Na_3PO_4$
Лопарит-(Ce)	$(Ce, Na, Ca)(Ti, Nb)O_3$
Лоренценит	$Na_2Ti_2Si_2O_9$
Ловозерит	$Na_2Ca(Ti, Zr)Si(O, OH)_{18}$
Мозандрит	$(Ca, Na, Ce)_{12}(Ti, Zr)_2Si_7O_{31}H_6F_4$
Мурманит	$Na_2(Ti, Nb)_2Si_2O_9 \cdot nH_2O$
Виллиомит	NaF
Ильменит	$FeTiO_3$
Мангано-ильменит	$(Mn, Fe)TiO_3$

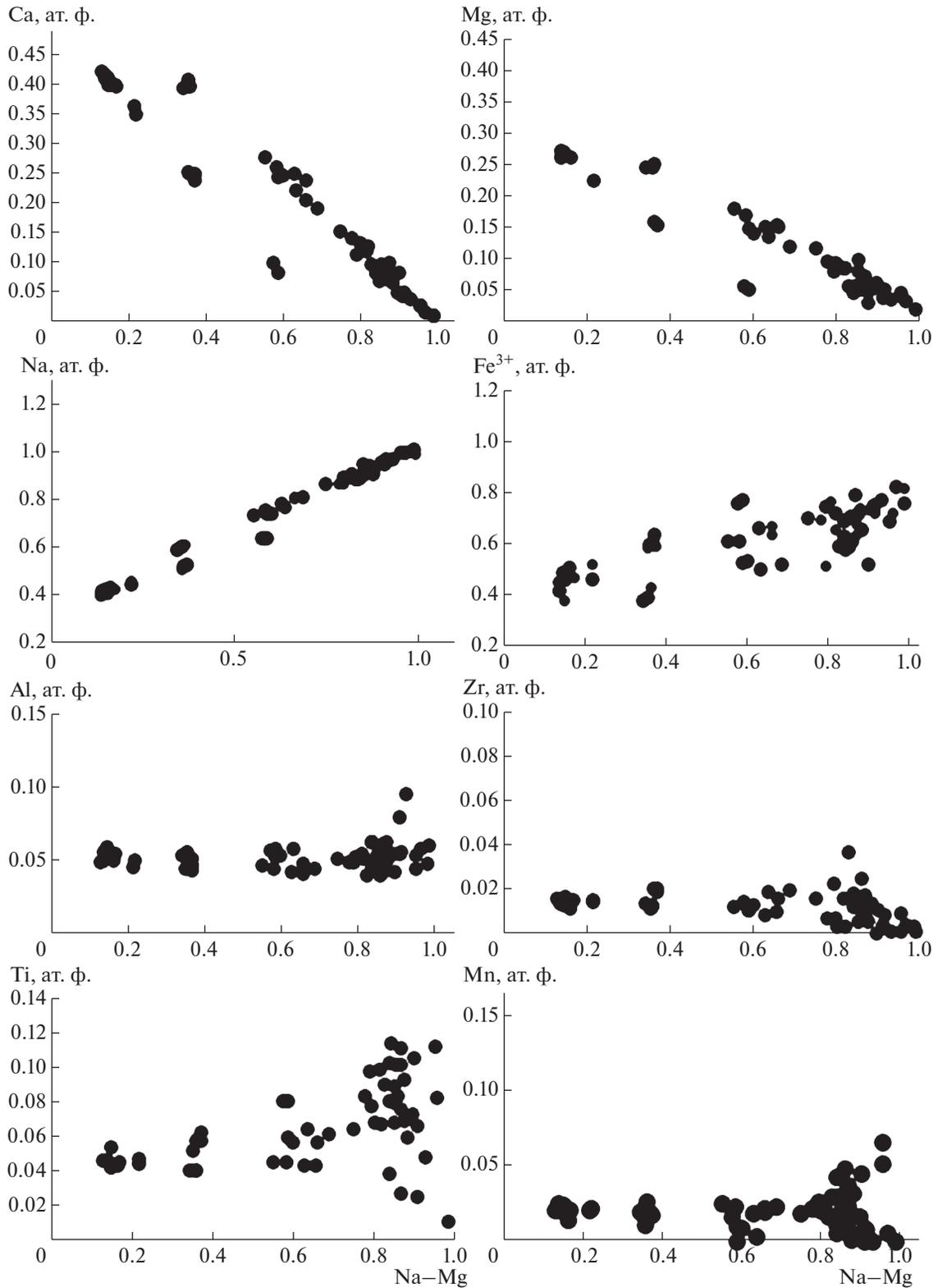
**Таблица 2.** Представительные анализы химического состава (мас. %) клинопироксенов Ловозерского массива

Глубина скважины, м	1567	1567	1659	1659	1883	1883	2195	2195	2195	2195	2195
Зона кристаллов	C	R	C	R	C	R	C	R	C	C	R
SiO <sub>2</sub>	51.73	52.18	52.54	52.12	52.31	52.46	52.33	52.16	51.75	52.27	51.84
TiO <sub>2</sub>	1.49	1.47	3.19	1.54	1.93	2.22	3.16	2.10	1.39	3.88	3.47
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.89	0.91	1.02	0.99	1.01	1.10	1.08	1.12	0.99	0.91	1.01
FeO	21.61	21.80	21.76	20.81	20.81	21.59	25.74	26.92	19.73	23.91	22.06
MnO	0.59	0.58	0.52	0.77	0.66	0.58	0.64	0.98	0.81	1.15	0.93
MgO	2.67	2.57	1.03	3.10	2.56	1.99	1.00	0.88	4.37	0.85	0.95
CaO	5.71	5.95	2.34	6.61	4.88	3.60	2.20	1.52	9.61	1.79	1.85
Na <sub>2</sub> O	10.92	10.41	12.48	9.77	10.77	11.61	12.48	12.82	8.24	12.41	12.26
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.05	0.02	0.03	0.04	0.01	0.04	0.03	0.03	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.
ZrO <sub>2</sub>	0.53	0.45	0.69	0.62	0.83	0.83	0.75	0.73	0.68	0.34	0.79
F	н.п.о.	н.п.о.	0.15	н.п.о.	0.07	н.п.о.	0.10	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.
Сумма	96.50	96.41	95.69	96.39	95.83	96.24	99.42	99.26	97.78	97.56	95.25
O=F	–	–	0.06	–	0.03	–	0.04	–	–	–	–
	–	–	95.54	–	95.76	–	99.32	–	–	–	–
Формульные единицы рассчитанные на 4 катиона											
Si	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Ti	0.04	0.04	0.09	0.05	0.06	0.06	0.09	0.06	0.04	0.11	0.10
Al	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.05
Fe <sup>2+</sup>	0.02	0.07	0.03	0.10	0.06	0.03	0.15	0.11	0.15	0.12	0.06
Fe <sup>3+</sup>	0.67	0.64	0.69	0.58	0.63	0.67	0.64	0.72	0.47	0.64	0.66
Mn	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04	0.03
Mg	0.15	0.15	0.06	0.18	0.15	0.11	0.06	0.05	0.25	0.05	0.06
Ca	0.23	0.25	0.10	0.28	0.21	0.15	0.09	0.06	0.39	0.07	0.08
Na	0.81	0.78	0.95	0.74	0.82	0.87	0.89	0.91	0.60	0.92	0.94
Zr	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02

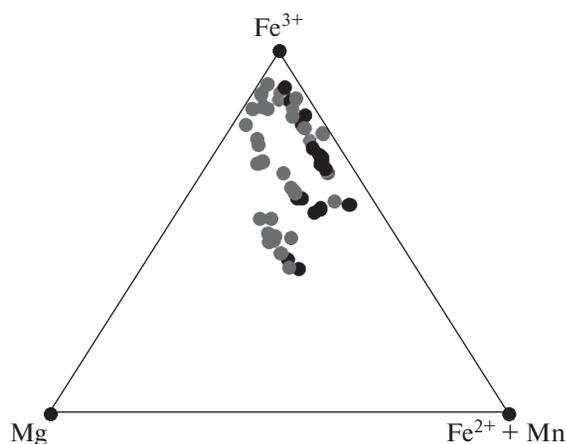
Примечания. Зона кристаллов: С – центр, R – край; н.п.о. – ниже предела обнаружения.

элементов, как это было предложено Стивенсоном (Stephenson, 1972). Пироксены образуют два тренда эволюции химического состава (рис. 2, 3). Первый тренд – для самых глубинных пироксенов (2000–2300 м), характеризуется существенным уменьшением диоксидовой составляющей (Ca, Mg), с небольшим уменьшением геденбергитовой составляющей (Ca, Fe), и сильным обогащением эгириновым компонентом (Na и Fe<sup>3+</sup>). Второй тренд – для менее глубинных пироксенов (1300–1900 м), характеризуется сильным уменьшением геденбергитовой составляющей, с небольшим изменением диоксидовой составляющей и сильным увеличением эгириновой составляющей. Также, наблюдаются небольшие вариации содержаний Al. Исследования показали, что главное изоморфное замещение в ходе эволюции ловозёрских клинопироксенов это замещение (Ca, Mg, Fe<sup>2+</sup>, Zr) на

(Na, Fe<sup>3+</sup>, Ti) (рис. 3). Наличие двух трендов эволюции состава пироксенов, в нижней зоне массива может являться следствием подъема дополнительной порции магмы несколько иного состава. Также нами были проанализированы несколько зерен пироксенов из самых нижних горизонтов, характеризующихся повышенным содержанием MgO (4.22–4.47 мас. %). На рис. 3, они расположены в центре диаграммы. Такое повышенное значение Mg, по сравнению с другими пироксенами с той же глубины может быть результатом реакции основных или ультраосновных ксенолитов с щелочной магмой. Не исключено, что магнезиальные пироксены также образовались в результате внедрения более магнезиального щелочного расплава, так как Ловозерский массив перекрывается эффузивной серией, представленной пикрит-порфиритами, авгит-порфиритами,



**Рис. 2.** Графики вариаций зависимости состава основных компонентов в пироксенах от коэффициента фракционирования (Na–Mg), выраженные в катионных пропорциях на 6 атомов кислорода. (Stephenson, 1972).

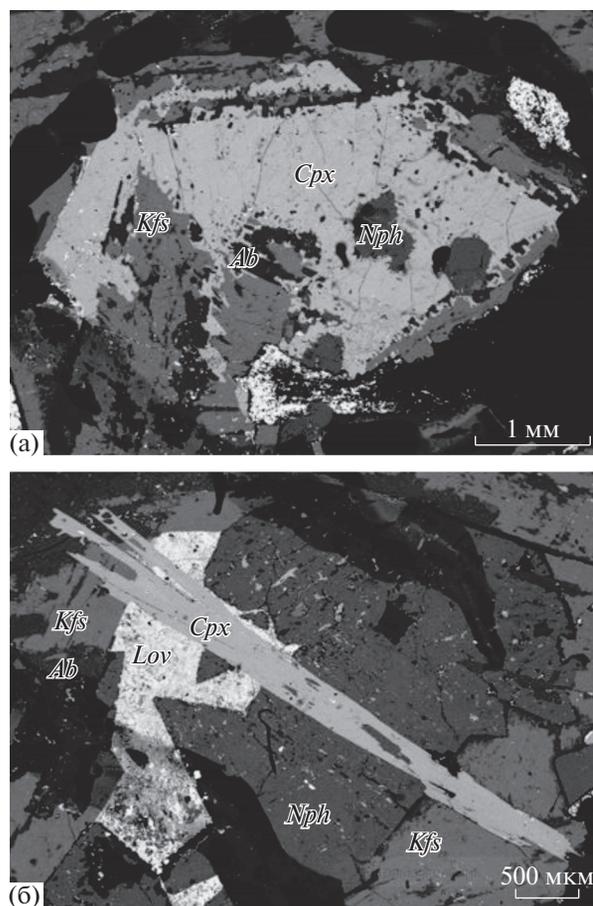


**Рис. 3.** Эволюция пироксенов нижней зоны дифференцированного комплекса Ловозёрского массива, нанесенные на треугольную диаграмму Mg–Fe<sup>3+</sup>–(Fe<sup>2+</sup> + Mn). На треугольной диаграмме два тренда: серые – пироксены с глубины 1300–1900 м, черные – пироксены с глубины 2000–2300 м.

щелочными базальтами и разнообразными фолитами. Ультраосновные породы характеризуются высоким магниевым числом.

Наибольший интерес представляют вариации содержания Mn, Ti и Zr. Цирконий один из важнейших элементов ловозерских пироксенов. В соответствии с нашими и литературными данными (Njonfang, Moreau, 2000), содержания ZrO<sub>2</sub> могут достигать 2% в пироксенах, но резко уменьшаются с возрастанием щелочности пироксенов. В Ловозере наиболее обогащенные Zr пироксены (до 1.91% ZrO<sub>2</sub>) характерны для нижней зоны дифференцированного комплекса. Как правило, краевые части пироксенов обеднены Zr по сравнению с центральными. Разные исследователи предлагали несколько возможных вариантов для вхождения Zr в пироксены. Jones and Peckett (1981) предполагали, что Zr представлен в щелочных системах в виде Na(Fe<sup>2+</sup>, Mg)<sub>0.5</sub>Zr<sub>0.5</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>6</sub>-компонента, а Larsen (1976) предлагает иной состав – NaZrSiAlO<sub>6</sub>. Для нижней зоны характерен первый компонент, о чем свидетельствуют положительные корреляции между суммой (Fe<sup>2+</sup> + Mg) и Zr (рис. 2), между Al и Zr таких корреляций не наблюдается. В то время как, для более высоких горизонтов Ловозерского массива, более характерен второй компонент. Это можно объяснить тем, что с изменением стратиграфической высоты массива меняется состав аксессуарных фаз и они становятся более цирконий содержащими, появляются в обилии такие фазы как ловозерит, мозандрит и эвдиалит.

Содержания Ti в пироксенах как правило увеличиваются в вверх по разрезу интрузива, за исключением нескольких образцов, однако широ-



**Рис. 4.** Фотографии кристаллов пироксенов в отраженных электронах, с глубины 2300 м, (а) – кумулятивный высокомагниевый кристалл (б) – скелетный кристалл.

кий разброс точек говорит о весьма сложном изоморфизме Ti. Содержания Ti варьируют от 1% до 3% максимальные значения TiO<sub>2</sub> – 3.95%. Наиболее вероятная форма нахождения Ti это Ti-авгит (Ca, Na)(Mg, Fe, Al, Ti)Si<sub>2</sub>O<sub>6</sub>. Уменьшение содержания Ti в некоторых поздних пироксенах (рис. 4, 5), возможно, связано с низким содержанием закисного железа в системе, которое необходимо для образования нептунитового компонента. В пироксенах, как правило, краевые зоны обеднены Ti.

Марганец ведет себя неоднозначно. Как правило, Mn присутствует в виде йохансенитового компонента. Максимальные содержания MnO 2.05%. Преимущественно Mn обеднены краевые части пироксенов, однако иногда встречается обратная ситуация.

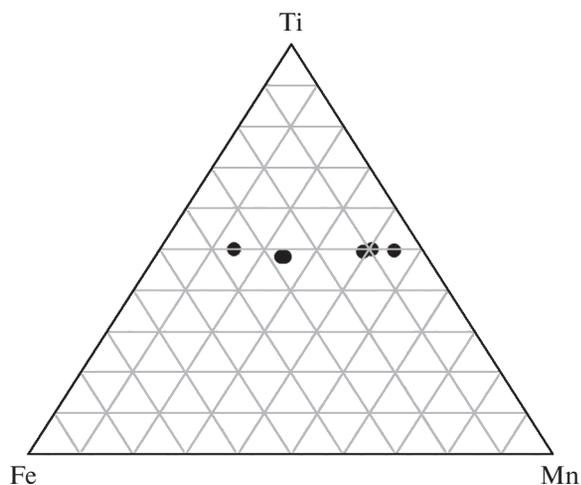
В работах предыдущих исследователей была показана связь изменения состава пироксенов и связанных с ними Fe-Mn-Ti аксессуарных минералов через весь вертикальный разрез Ловозерской интрузии (Герасимовский и др. 1966; Kogarko et al., 2002, Kogarko et al., 2006). В первой фазе

**Таблица 3.** Химический состав мангано-ильменита (мас. %) в вертикальном разрезе нижней зоны. Рассчитанные содержания миналов  $MnTiO_3$ ,  $FeTiO_3$ ,  $FeFeO_3$ 

Глубина, м	TiO <sub>2</sub>	MnO	FeO	Сумма	MnTiO <sub>3</sub>	FeTiO <sub>3</sub>	FeFeO <sub>3</sub>	Сумма
2320	53.03	13.35	33.83	100.21	28.5	71.2	0.03	99.73
1920	53.36	42.11	5.21	100.68	89	11	0	100
1920	53.27	37.35	10.97	101.59	78.2	20.9	0.9	100
1920	53.98	38.72	8.84	101.54	81.2	18.3	0.05	99.55
1820	51.61	23.31	25.96	100.88	49.2	47.5	3.3	100
1820	52.1	22.77	27.15	102.02	47.5	49.0	3.5	100

и самой нижней зоне дифференцированного комплекса до глубины 2300 м пироксен ассоциирует с идиоморфным магнетитом, с продуктами распада ильменита, амфибола, сульфидов Fe, как правило пирротина, пирита, титанита. На глубине 2320 м нами впервые была зафиксирована смена акцессорного парагенезиса: ильменит замещается лоренценитом, появляется мангано-ильменит, и в обилии пирротин. Выше по разрезу (2300–1600 м) преимущественными акцессорными фазами становятся, мангано-ильменит, пирротин, сфен, мозандрит. Вверх по разрезу нижней зоны прослеживается увеличение марганцевой составляющей мангано-ильменита вплоть до появления фазы содержащей – 89%,  $MnTiO_3$ , такие высокие содержания Mn в минералах дифференцированного комплекса Ловозера описано впервые. Нам удалось проследить эволюцию мангано-ильменита в нижней зоне (табл. 3, рис. 5). В верхней зоне Фазы II (1600–600 м) магнетит исчезает и типичной становится ассоциация Mn-ильменита, пироксена и энigmatита. В верхней части Дифференцированного комплекса Mn-ильменит полностью замещается лоренценитом. В Эвдиалитовом комплек-

се (Фаза III) наиболее поздние пироксены (существенно обогащенные эгириновой компонентой) ассоциируют с более щелочными Fe–Mn–Ti-минералами, по сравнению с Фазами I и II, включая лампрофиллит, мурманит, лоренценит, ловозерит которые становятся ранними кумулятивными фазами в Фазе III (Kogarko et al., 2002). Состав мангано-ильменита и пирофанита в нижней зоне широкий  $Ilm_{11-71}Php_{28-89}$ . Отношение  $Ti/(Ti + Fe + Mn)$  постоянно для всех образцов и равно 0.50. Ильменит содержит примесь Nb ( $Nb_2O_5$  0.30–0.43 мас. %, Al 0.02–0.04 мас. %, Mg 0.02–0.07 мас. % и др.). Обычно такие минералы, как пирофанит и ильменит, встречаются в слабо щелочных породах, как результат метасоматических изменений под воздействием флюида и распада твердого раствора титанмагнетита, в то время как в агпаитовой магме, вследствие очень длительного интервала кристаллизации и чрезвычайно низкой температуры солидуса поздние минеральные ассоциации выделяются из расплав-раствора в интервале температур 550–450°C. Наличие выше перечисленных примесей свидетельствует о магматическом происхождении этих минералов. Наличие высоко Mn фазы, описанной выше на определенном горизонте свидетельствует о возрастании содержания этого элемента в процессе кристаллизационной дифференциации, так как коэффициент распределения Mn кристалл/расплав ниже 1. Таким образом, наличие нескольких трендов пироксенов с ростом эгиринового минала, а также скрытой расслоенности этой минеральной фазы (рост концентрации титана в вертикальном разрезе) свидетельствует о том, что главным процессом эволюции нижней зоны массива был процесс кристаллизационной дифференциации.

**Рис. 5.** Составы ильменит-пирофанитов нижней зоны Ловозерского массива на тройной диаграмме Fe–Ti–Mn, содержания даны в формульных единицах.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено изоморфное замещение пироксенов в нижней части Ловозерского интрузива ( $Ca, Mg, Fe^{2+}, Zr \rightarrow (Na, Fe^{3+}, Ti)$ ). Впервые прослежена эволюция пироксенов нижней зоны дифференцированного комплекса Ловозерского массива, которая отвечает диопсид-геденбергит-

эгириновой серии, характерной для всего массива. Содержания Ti в пироксенах как правило увеличиваются в вверх по разрезу интрузива. Наиболее вероятная форма нахождения Ti это Ti-авгит (Ca, Na)(Mg, Fe, Al, Ti)Si<sub>2</sub>O<sub>6</sub>. Вверх по разрезу нижней зоны прослеживается увеличение марганцевой составляющей мангано-ильменита вплоть до появления фазы, содержащей – 89%, MnTiO<sub>3</sub>, такие высокие содержания Mn в минералах дифференцированного комплекса Ловозера описаны впервые. Выделено 2 тренда эволюции пироксенов нижней зоны Ловозерского массива. Наличие нескольких трендов и присутствие высокомагнезиальных пироксенов свидетельствует о том, что, по всей вероятности, в нижнюю зону поступала дополнительная более основная порция магматического расплава группы пикрит-порфиритов, щелочных базальтов, обладающих более высоким магниевым числом. Менее вероятно контаминация породами эффузивной Ловозерской свиты, так как этот процесс вызывает формирование целой серии других минералов (Герасимовский и др., 1966).

Наличие нескольких трендов пироксенов нижней зоны Ловозеро с ростом эгиринового минерала, а также скрытой расслоенности этой минеральной фазы (рост концентрации титана в вертикальном разрезе в пироксенах) свидетельствует о том, что главным механизмом эволюции нижней зоны массива был процесс кристаллизационной дифференциации.

*Работа выполнена в рамках темы Минобрнауки России № 2020-1902-01-258.*

*Работа выполнена при финансовой поддержке Гранта Министерства науки и высшего образования РФ № 13.1902.21.0018.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Арзамасцев А.А., Арзамасцева Л.В., Глазнев В.Н., Раевский А.Б. (1998). Глубинное строение и состав нижних горизонтов Хибинского и Ловозерского комплексов, Кольский полуостров, Россия: Петролого-геофизическая модель. *Петрология*. **6**(5), 478-496.
- Arzamastsev A.A., Arzamastseva L.V., Glaznev V.N., Raevskii A.B. (1998). Petrologic-geophysical model for the structure and composition of deep levels of the Khibina and Lovozero complexes, Kola Peninsula. *J. Petrol.* **6**(5), 434-450.
- Герасимовский В.И., Волков В.П., Когарко Л.Н., Поляков А.И., Сапрыкина Т.Ю., Балашов Ю.А. (1966). *Геохимия Ловозерского щелочного массива*. М.: Наука. 398 с.
- Когарко Л.Н. (1977). *Проблемы генезиса агаитовых магм*. М.: Наука. 294 с.
- Пеков И.В. (2001). *Ловозерский массив: история исследования, пегматиты, минералы. Творческое объединение*. Земля. Ассоциации Экоств. 464 с.
- Ferguson A.K. (1977) The natural occurrence of aegirine-nepheline solid solution. *Contrib. Mineral. Petrol.* **60**, 247-253.
- Jones A.P. and Peckett A. (1981) Zirconium-bearing aegirines from Motzfeldt, south Greenland. *Contrib. Mineral. Petrol.* **75**, 251-255.
- Kogarko L.N., Williams C.T., Woolley A.R. (2002) Chemical evolution and petrogenetic implication of loparite in the layered aegaitic Lovozero complex, Kola peninsula, Russia. *Mineral. Petrol.* **74**, 1-24.
- Kogarko L.N., Williams C.T., Woolley A.R. (2006). Compositional evolution and cryptic variation in pyroxenes of the peralkaline Lovozero intrusion, Kola Peninsula, Russia. *Mineral. Mag.* **70**(4), 347-359.
- Kogarko L.N., Kononova V.A., Orlova M.P. and Woolley A.R. (1995). *Alkaline Rocks and Carbonatites of the World. Part 2. Former USSR*. Chapman & Hall, London, 226 pp.
- Larsen L.M. (1976) Clinopyroxenes and coexisting mafic minerals from the alkaline Ilimaussaq intrusion, South Greenland. *J. Petrol.* **17**, 258-290.
- Njonfang E. and Moreau C. (2000) The mafic mineralogy of the Pande Massif, Tikar Plain, Cameroon. *Mineral. Mag.* **64**, 525-537.
- Stephenson D. (1972) Alkali clinopyroxenes from nepheline syenites of the South Qoroq Centre, South Greenland. *Lithos.* **5**, 187-201.