

УДК 553.04

МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫХ РОССЫПЕЙ ЛОВОЗЕРСКОГО МАССИВА

© 2022 г. А. В. Лаломов^{а, б, *}, А. В. Григорьева^а, В. А. Зайцев^с

^аИнститут геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,
Старомонетный пер., 35, Москва, 119017 Россия

^бПермский государственный национальный исследовательский университет,
ул. Букирева, 15, Пермь, 614990 Россия

^сИнститут геохимии и аналитической химии РАН им. В.И. Вернадского,
ул. Косыгина, 19, Москва, 119991 Россия

*e-mail: lalomov@mail.ru

**e-mail: va_zaitsev@inbox.ru

Поступила в редакцию 15.01.2022 г.

После доработки 16.02.2022 г.

Принята к публикации 01.04.2022 г.

В статье представлены новые оригинальные данные по минералогии Сергеваньского участка Ревдинской россыпи Ловозерского россыпного района. Ледниковые и тектонические процессы, сопровождавшиеся разрушением и переотложением первичных пород Ловозерского массива, привели к образованию по периферии редкометалльных россыпей ближнего сноса. В представленной статье впервые сделана попытка характеристики тяжелых минералов Сергеваньского участка Ревдинской россыпи. Было установлено, что помимо основного россыпеобразующего минерала лопарита в россыпи присутствует еще несколько минералов-носителей редких металлов, что может быть использовано для расширения сырьевой базы Ловозерского ГОКа. Определены главные для россыпи минералы – носители редких и редкоземельных элементов, проведена их количественная оценка и охарактеризованы некоторые минералогические и химические особенности, позволяющие установить их принадлежность к разным типам пород, слагающих Ловозерский массив.

Ключевые слова: россыпи, редкие металлы, Ловозерский массив

DOI: 10.31857/S0016777022050069

ВВЕДЕНИЕ

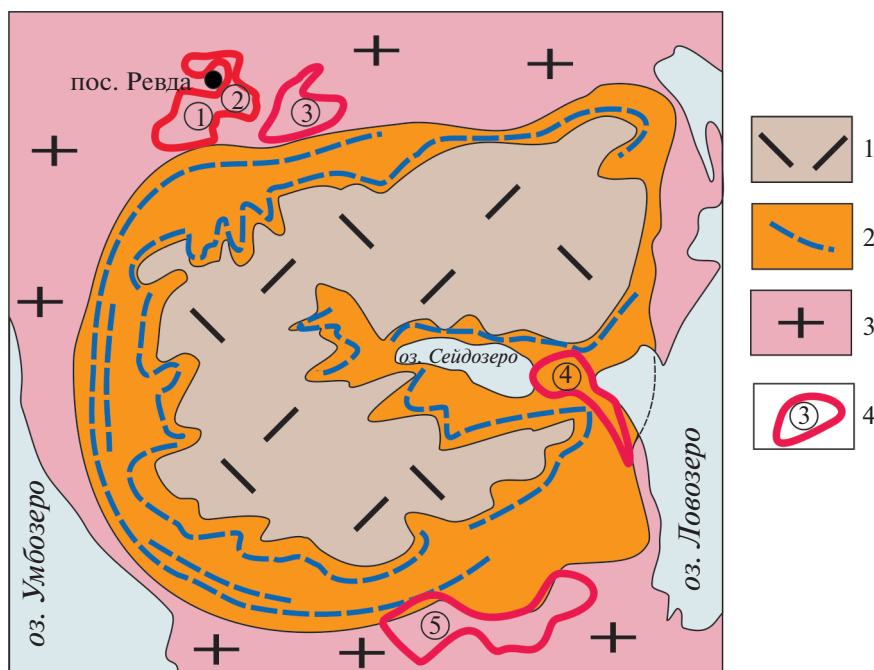
Редкие металлы (РМ) находят широкое применение в современных высокотехнологичных отраслях промышленности – электронике, оптике, энергетике, производстве высоколегированных сплавов и т.д. Область их применения постоянно расширяется. Перспективный прогнозируемый мировой рост потребления РМ составляет около 10% в год (Лихникевич, 2020).

В настоящее время единственным действующим источником редкоземельных металлов (и значительной части РМ) в России является Ловозерский ГОК, но добыча ведется в сложных горно-геологических условиях при низкой рентабельности существующих разрезов, причем по мере выработки доступных ресурсов сложность горных работ и себестоимость продукции увеличивается. В этой связи возникает потребность в диверсификации сырьевых источников комбината: разработка новых технологических схем переработки традиционных руд, извлечение попут-

ных компонентов, вовлечение в переработку новых видов сырья (россыпного, эвдиалитового и апатит-лопаритового), для которых возможна добыча открытым карьером.

Большое количество публикаций по Ловозерскому массиву касается, в основном, минералогии и геохимии коренных пород дифференцированного комплекса, эвдиалитового комплекса и пегматитовых образований (Герасимовский и др., 1966; Буссен, Сахаров, 1972; Семёнов, 1972; Пеков, 2001; Иванюк и др., 2006, 2014; Когарко и др., 1983; Пахомовский и др., 2006; и др.). Рыхлые отложения, образованные за счет эрозии массива, изучены очень слабо. При этом они в промышленных содержаниях и объемах содержат редкометалльные минералы, включая лопарит и широкий спектр других минералов-носителей редких металлов.

Уникальные по своему составу и генезису россыпи лопарита, расположенные по периферии Ловозерского массива могут служить альтерна-



Фиг. 1. Схематическая геологическая карта Ловозерского массива со снятыми четвертичными отложениями. 1 – эвдиалитовые лувяриты нерасчлененные, 2 – дифференцированный комплекс лопаритоносных лувяритов-фойялитов-уртитов с рудными горизонтами, 3 – вмещающий докембрийский гранито-гнейсовый комплекс, 4 – Ревдинская редкометалльная россыпь, участки: 1 – Шомиокский, 2 – Ревдинский, 3 – Сергеваньский; 4 – Сейдозерское россыпное поле, 5 – Райяврская россыпь (по материалам Лаломов и др., 2019; Лихачев, 1984ф)

тивным источником сырья для работы горно-обогатительного комбината. При этом ассортимент продуктов ГОК может оставаться неизменным, то есть какого-либо изменения металлургической технологии не требуется.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И РУДОНОСНОСТЬ ЛОВОЗЕРСКОГО МАССИВА И ПРИМЫКАЮЩЕГО ОСАДОЧНОГО ЧЕХЛА

Ловозерский щелочной массив представляет собой сложнопостроенную многофазную интрузию площадью 650 км², относящуюся к позднедевонской Кольской щелочной провинции, объединяющей массивы щелочно-ультраосновных пород и нефелиновых сиенитов. Вмещающими являются докембрийские гранито-гнейсы. Основными фазами в составе массива являются дифференцированный комплекс лопаритоносных лувяритов-фойялитов-уртитов и комплекс эвдиалитовых лувяритов, слагающих верхнюю часть массива (Арзамасцев и др., 2013). Лопаритовое оруденение приурочено к верхней и нижней зонам дифференцированного комплекса. В верхней зоне находится горизонт малиньитового состава, содержащий до 25% лопарита. В нижней имеется несколько рудных горизонтов уртитов и реже лувяритов, содержащих промышленные

концентрации лопарита (Когарко, 2021). Потенциально рудоносный комплекс эвдиалитовых лувяритов представлен пластообразной интрузией, прорывающей и перекрывающей породы дифференцированного комплекса (Когарко, 2015). На заключительном этапе становления массива появляется комплекс даек щелочных лампрофиров. Рудник “Карнасурт” разрабатывает лопаритовые уртиты и малиньиты в составе верхней зоны дифференцированного комплекса, а рудник “Умбозеро” был заложен в нижней зоне (Пеков, 2001).

Лопаритовые россыпи, разведанные Ловозерской ГРП (Лихачев, 1984ф¹), расположены по северной периферии плутона (Шомиокский, Сергеваньский и Ревдинский участки), на его южном склоне (Райяврская) и у восточного подножья (участки Губы Мотка и Прибрежный), а также на востоке центральной котловины – на перемычке между озерами Сейдозеро и Ловозеро (фиг. 1).

Местоположение россыпей контролируется участками максимального вскрытия лопаритоносных пород дифференцированного комплекса (ледниковыми карами и долинами, поставлявшими фрагментированный обломочный материал в зону предгорий) и элементами рельефа, бла-

¹ Лихачев А.С. Геологическая записка к ТЭО и расчету временных кондиций по Ревдинскому россыпному месторождению. ПГО Севзапгеология, Мурманская ГРЭ, Апатиты, – 1984. (фондовая, № ТФГИ № 3226).

гоприятными для накопления лопарита: локальные депрессии коренного ложа по северному и южному обрамлению массива, обработанная ледником и впоследствии занятая подпрудным озером центральная Сейдозерская котловина, береговая зона оз. Ловозеро (Евзеров и др., 1978).

В разрезе рыхлых отложений северного обрамления массива выделяется три основных комплекса, соответствующие основным этапам развития региона в кайнозое: доледниковые элювиально-склоновые мезозой-кайнозойские отложения e-d MZ-N (?), флювиогляциальные fgQ_{III}^{1-2} и моренные gQ_{III}^{1-2} отложения местного горного оледенения, и перекрывающая морена покровного оледенения $gQ_{III}^{3-IV}{}^1$. Эти основные комплексы в свою очередь подразделяются на более дробные разности. В доледниковом комплексе выделяются элювий, развитый на гнейсовом субстрате, включающем локально проявленные первичные каолины, и доледниковый склоновый комплекс, в котором выделяются образования преимущественно нефелинового состава (Лаломов, Чефранов, 2020).

В продуктивной толще местного горного оледенения прослежены собственно морена и флювиогляциальные отложения, в которых преобладает обломочный материал щелочных пород местного происхождения. Флювиогляциальные отложения расположены во внешней (по отношению к массиву) части россыпи; ближе к склону Ловозерского массива преобладает морена. Флювиогляциальные отложения характеризуются валунно-галечно-гравийно-песчаным составом, пониженной глинистостью и повышенной, по отношению к морене, сортированностью отложений. Обломочный материал обладает средней окатанностью. Состав морены валунно-галечный с супесью и суглинком. Суммарная мощность отложений горного оледенения достигает 40–50 м.

Верхняя часть разреза рыхлых отложений сложена мореной покровного оледенения мощностью от 0.5 до 25 м, увеличение мощности происходит по мере удаления от склонов массива и с запада на восток. Отложения представлены валунно-галечным суглинком с линзами сортированных и промытых песчано-гравийных осадков флювиогляциально-генезиса.

Продуктивный пласт россыпи приурочен к отложениям склонового комплекса, содержащим обломочный материал местных щелочных пород, флювиогляциальным отложениям и морене местного горного оледенения. Отложения нижней части флювиогляциала и морены местных ледников несут в себе повышенную концентрацию лопарита и содержат основную часть промышленных запасов Ревдинской россыпи. При этом максимальные мощности пласта флювиогляциальных галечников и максимальные содер-

жания лопарита (до 35 кг/м³) отмечаются в депрессиях коренного рельефа. В верхней части комплекса содержания лопарита уменьшаются и колеблются от 0.5 до 8.5 кг/м³. Россыпное месторождение охватывает почти всю территорию развития шлейфа отложений местных ледников в северных предгорьях Ловозерского массива (Лаломов, Чефранов, 2020).

ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В процессе проведения полевых работ стояла задача опробования продуктивного пласта россыпи. По результатам разведочных работ (см. Лихачев, 1984) были определены площади, где продуктивные отложения расположены максимально близко к поверхности и были достижимы неглубокими (до 3 м) шурфами. В ряде случаев эти площади оказались затоплены пойменными грунтовыми водами, засыпаны хвостами обогатительной фабрики, в двух точках на участке Шомиокский оперативное минералогическое и последующее аналитическое (РФА) исследование не подтвердило наличие промышленных отложений, и только на линии 560 скважина 46 участка Сергеванский (67°55.268' N, 034°40.098' E) шурфом в интервале 0.3–1.3 м был вскрыт промышленный пласт россыпи с содержаниями лопарита по данным минералогического анализа 0.13% от исходной пробы (2.67 кг/м³), и по данным РФА Nb – 679 ppm, Ta – 40 ppm, TR – 1389 ppm, Ti – 1.17% (от исходной пробы).

Полученный материал представлял собой зеленовато-серую супесь с гравийно-галечным материалом преимущественно пород Ловозерского комплекса. Содержание обломочного материала в классе >1.0 мм составляет 42.6%. Из класса 0.05–1 мм в бромформе была выделена тяжелая фракция.

В качестве объектов сравнения выступали образцы пород Ловозерского массива: эвдиалитовый лувярит г. Кедыкверпах, фойит с апатитом – скв. 904 глубина 116 м, сфен-амфиболовый лувярит скв. 406 глубина 178 м и проба флотационного продукта Ловозерского ГОК (2010 год).

Минералогия россыпи была изучена с использованием оптического и электронно-микроскопического методов. Диагностика минералов проведена с использованием сканирующего электронного микроскопа JSM-5610LV (Япония) в отраженных и обратно-рассеянных электронах (BSE), отображающих контраст в зависимости от среднего атомного номера элемента. Электронный микроскоп оснащен аналитическим энергодисперсионным спектрометром (ЭДС) INCA-Energy 450 (Великобритания), который позволяет проводить качественный и полуколичественный

Таблица 1. Минеральный состав тяжелой фракции Сергеваньского участка россыпи (об. %)

Минералы	Пироксен	Титанит	Лопарит	Лоренцит	Лампрофиллит	Амфиболы	Апатит	Магнетит	Флогопит + биотит	Эвдмалит	Энигмагит	Гранат	Эпидот	Сростки
% от т.ф.	92.0	2.05	1.49	0.85	0.83	0.67	0.65	0.42	0.35	0.22	0.19	0.10	0.03	0.09

анализ с рельефных образцов, и количественный анализ с полированных образцов для определения всех элементов тяжелее С (исключая N)) методов (аналитики Л.О. Магазина и Л.В. Левицкая). Химический состав ряда минералов был определен методом рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) в аналитической лаборатории ИГЕМ РАН (аналитик Е.Н. Ковальчук) на приборе JEOL-8200 и в Аналитическом центре ГЕОХИ РАН на сканирующем электронном микроскопе четвертого поколения TESCAN MIRA 3 с энергодисперсионным спектрометром Ultimex-100 Oxford Instruments (В.А. Зайцев, операторы С.Н. Теплякова, М.А. Иванова).

Материал тонкого класса с размером частиц менее 0.044 мм изучался с использованием количественного рентгенодифракционного анализа на порошковом дифрактометре D/MAX-2200 Rigaku (Япония) (аналитик О.В. Доржиева).

МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ ПРОДУКТИВНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

Продуктивный класс россыпи представлен рыхлым материалом с размером частиц 0.05–1 мм (49.5% от исходной пробы), в котором произошло раскрытие сростков, что сделало возможным проведение диагностики и оценки содержаний минералов. Наибольший интерес представляют минералы тяжелой фракции плотностью более 2.9 г/см³. Оптическое определение минерального состава тяжелой фракции (табл. 1) показало, что в россыпеобразующей толще преобладают специфические минералы нефелиновых сиенитов, в подчиненном количестве встречаются минералы гранито-гнейсового комплекса и сквозные минералы, присутствующие во всех типах пород.

В знаковых количествах (менее 0.01% от состава тяжелой фракции) встречаются кианит, цеолиты, андалузит, циркон и щелочные амфиболы. Ильменит в россыпи представлен сростками с другими минералами – эгирином, лоренцитом и титанитом.

Преобладающими нерудными минералами тяжелой фракции класса 1.0–0.05 мм в россыпи являются моноклинные пироксены. Они составля-

ют более 90% тяжелой фракции или более 22% исходной пробы класса крупности 1.0–0.05 мм. Это осколочные обломки кристаллов, которые сохраняют в россыпи (частично или полностью) грани призмы (100 и 110) (фиг. 2). Они представлены обломками кристаллов зеленого и, преимущественно, темно-зеленого (до черного) цвета. Наблюдаются сростания пироксена с кварцем и ильменитом (фиг. 3а, б) Встречается полосчатая зональность, соответствующая эгирин-диопсиду и эгирин-геденбергиту (фиг. 3в). Состав пироксена приведен в табл. 2.

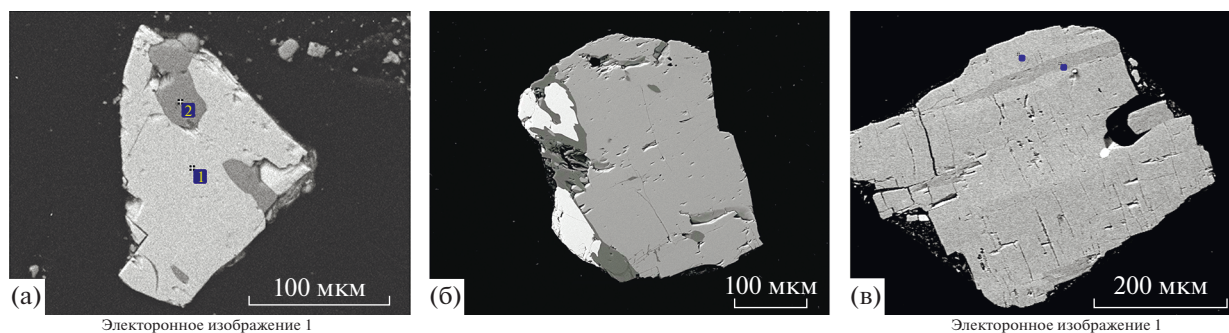
На поверхности обломков пироксена отмечаются присыпки тонкозернистого материала, состоящего из обломков полевых шпатов (преимущественно микроклина и альбита), лампрофиллита (фиг. 3а), нефелина, содалита, натролита, гакманита, каолинита и гидрослюд. В этих присыпках содержатся также тончайшие частицы (5–18 мкм) редкоземельных минералов, таких как монацит (фиг. 3б), стенструпин (фиг. 3в) и др. Вероятно, в процессе становления россыпи они захватывались глинистыми минералами и сохранялись в тонкозернистых слабо литифицированных агрегатах.

Титанит (второй по распространенности минерал) присутствует в пробе в количестве 2.05 об. % и представлен двумя типами зерен: 1 – плохо окатанными осколочными обломками кристаллов неправильной формы желтого цвета разной интенсивности окраски с размером частиц более 0.25 мм (фиг. 4, табл. 3); 2 – прозрачными удлиненными кристаллами с желтоватым оттенком и более высоким блеском, размерного класса 0.05–0.12 мм (фиг. 5).

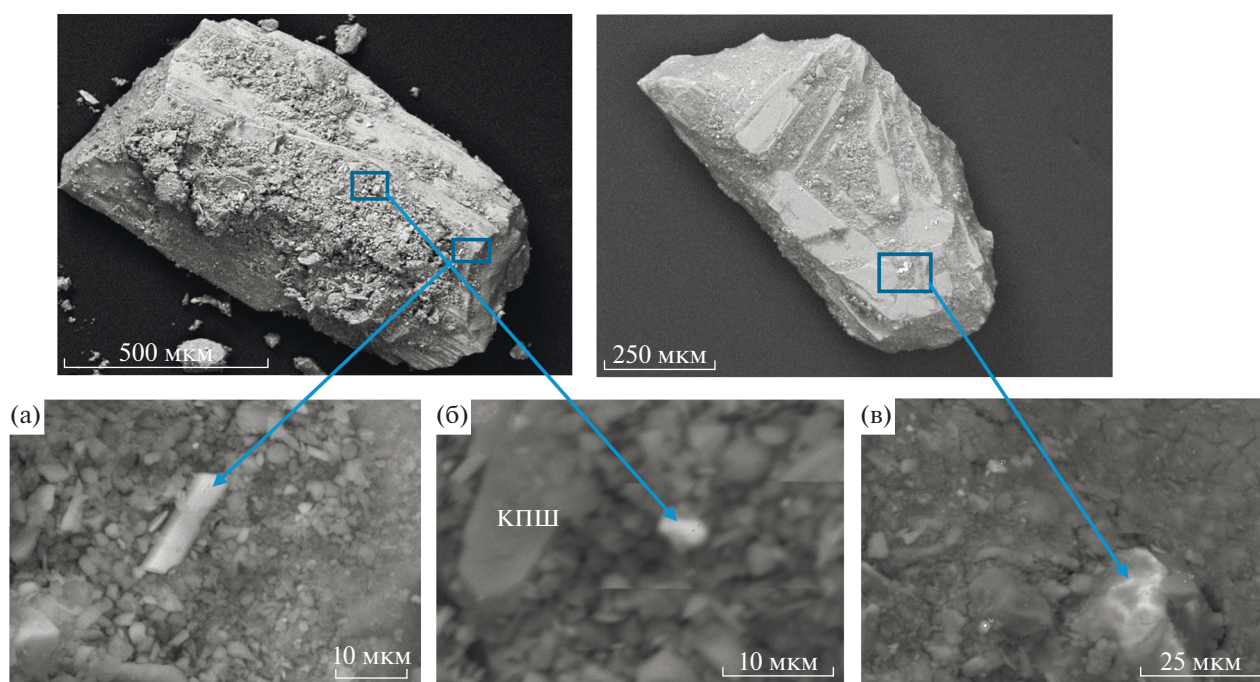
На поверхности зерен отмечаются поверхностные примазки глинистых минералов. В некоторых случаях титанит развивается по ильмениту (фиг. 4в).

Ниже представлен химический состав титанита 2-го типа, определенный методом РСМА (табл. 4).

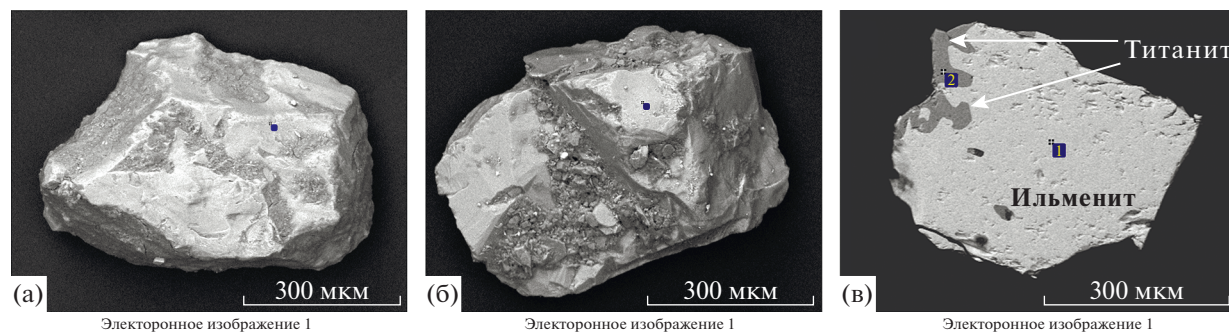
Анализ полученных результатов показывает, что титанит Сергеваньского участка россыпи представлен двумя типами зерен, значительно различающихся по химическому составу не толь-



Фиг. 2. Моноклинные пироксены, изображения в обратно-рассеянных электронах: а – эгирин (светлое) в сростке с кварцем; б – эгирин в сростке с ильменитом (белое слева), который замещается лоренцитом (темное); в – зональный обломок кристалла эгирина (темно-серые участки по химическому составу соответствуют эгирин-диопсиду; светло-серые – эгирин-геденбергиту).



Фиг. 3. Обломки кристаллов пироксена с присыпками тонкозернистого материала, содержащего обломки глинисто-слоистых частиц, и микрочастицы редких и редкоземельных минералов: а – лампрофиллит; б – монацит; в – стен-струпин. Тяжелая фракция, изображение в отраженных электронах.



Фиг. 4. Морфологические разновидности зерен титанита 1-го типа. Изображение в отраженных электронах: а, б – зерна, в – полированная шашка (РСМА).

Таблица 2. Химический состав минералов группы пироксена (PCMA, мас. %)

№	Массовые проценты									
	Na ₂ O	CaO	MgO	MnO	FeO об.	Al ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	Σ	
1	3.79	16.6	6.71	0.46	15.6	0.59	1.0	50.1	94.8	
2	4.18	15.1	5.40	0.5	19.5	–	1.39	52.9	98.91	
5	9.8	5.11	1.75	0.56	24.46	1.25	2.76	53.71	99.41	
6	11.71	1.52	–	0.47	27.64	1.02	1.99	56.14	100.5	
7	4.36	15.65	5.49	0.44	19.32	0.72	1.19	52.43	99.6	
8	8.33	6.95	1.75	0.73	24.55	0.98	2.29	51.89	97.47	
9	11.08	2.15	1.1	1.15	22.72	1.30	6.19	54.78	100.5	
	Формульные единицы									
	Na	Ca	Mg	Mn	Fe ²⁺	Fe ³⁺	Al	Ti	Si	O
1	0.29	0.71	0.40	0.02	0.32	0.20	0.03	0.03	2.00	6
2	0.31	0.63	0.31	0.02	0.51	0.13	0.00	0.04	2.05	6
5	0.72	0.21	0.10	0.02	0.35	0.43	0.06	0.08	2.04	6
6	0.85	0.06	0.00	0.01	0.38	0.48	0.05	0.06	2.10	6
7	0.32	0.64	0.31	0.01	0.43	0.19	0.03	0.03	2.01	6
8	0.63	0.29	0.10	0.02	0.42	0.39	0.05	0.07	2.03	6
9	0.81	0.09	0.06	0.04	0.43	0.28	0.06	0.18	2.06	6

ко по всем основным компонентам (пониженное содержание SiO₂ и повышенное – CaO и TiO₂ в титаните 2-го типа), но и по составу изоморфных примесей, причем титанит 2-го типа содержит постоянную примесь Nb₂O₅ в количестве от 0.7 до 1.26 мас. % и спорадические примеси ZrO₂ и Ce₂O₃, что типично для титанита из дифференцированного комплекса Ловозерского массива (Зайцев и др., 2002).

Лопарит содержится в тяжелой фракции в виде двойников кристаллов черного цвета с металлическим блеском и концентрируется преимущественно в немагнитной части тяжелой фракции. Общее количество минерала – 1.5% от тяжелой фракции (0.13% на исходную пробу). Минерал демонстрирует высокую степень сохранности кри-

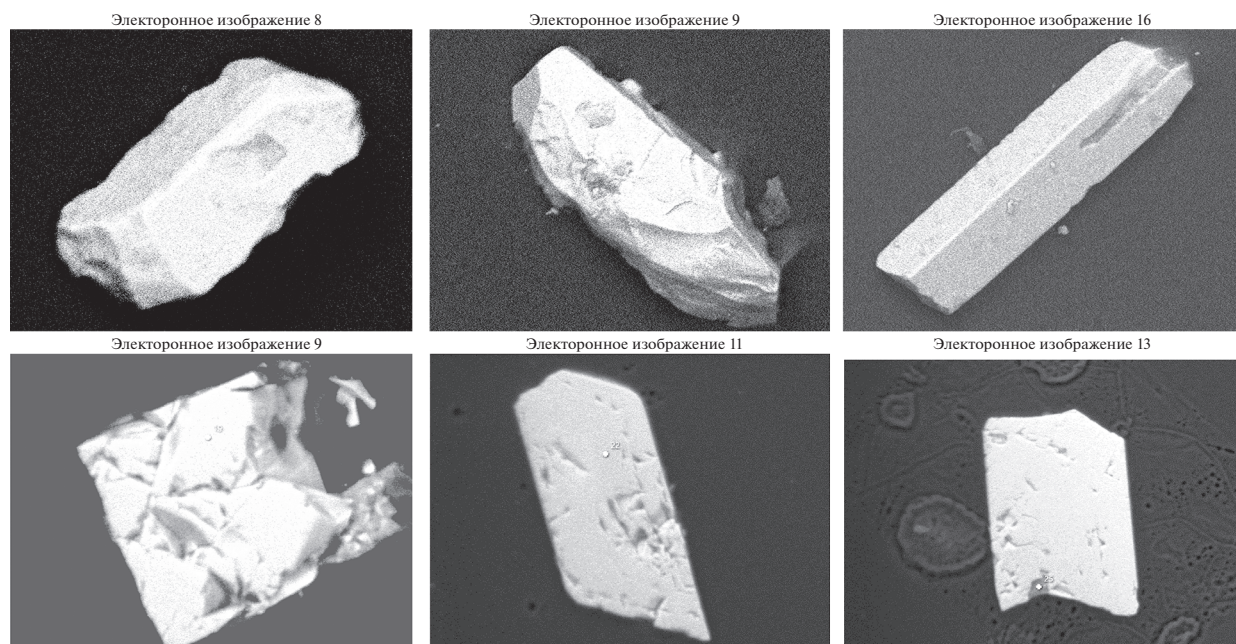
сталлографических форм (фиг. 6), на поверхности кристаллов отмечаются примазки смеси глинистых минералов, которые представляют собой спрессованные глинисто-слюдистые агрегаты, которые в различной степени покрывают кристаллы лопарита (фиг. 6а).

При изучении внутреннего строения зерен лопарита была выявлена зональность по химическому составу: более темные в BSE участки зерен содержат меньшее количество РЗЭ и стронция, и, наоборот, светлые части обогащены этими элементами (табл. 5). Такая зональность типична для лопарита Ловозерского массива и обусловлена изменением концентрации элементов в расплаве в процессе кристаллизации минерала (Когарко и др., 1996; Сук и др., 2013). На фиг. 6 в представлен зональный кристалл с чередованием темных и светлых участков, располагающихся по кристаллографическим граням, отражающим периодичность изменения концентрации тяжелых элементов при кристаллизации, а также очаговые выделения высокостронциевых участков по периферии зерна.

Эвдиалит содержится в пробе в небольшом количестве (около 0.22 об. % тяжелой фракции). Он концентрируется в неэлектромагнитной фракции, где составляет около 8% и представлен обломками неправильной формы с размерами до

Таблица 3. Химический состав титанита 1-го типа (класс более 0.25 мм)

№	SiO ₂	CaO	TiO ₂	FeO	Na ₂ O	Сумма
1	29.9	27.9	39.5	1.60	–	99
2	29.8	26.2	40.7	0.52	1.17	98.3
3	31.5	26.4	39.8	0.99	1.18	99.8
4	31.5	27.4	39.8	1.28		100



Фиг. 5. Морфологические разновидности зерен титанита 2-го типа. Вверху – объемные фото минерала, внизу полированная шашка. Изображения в отраженных электронах.

0.7 мм. Цвет минерала варьирует в светло-розовых и желтовато-оранжевых тонах. Часто на поверхности обломков заметны следы растворения и небольшие поверхностные примазки (фиг. 7). Химический состав эвдиалита определен методом РСМА (аналитик Ковальчук Е.В.) (табл. 6)

Лампрофиллит содержится в тяжелой фракции пробы в количестве около 0.83 об. %. Он концентрируется в неэлектромагнитной фракции, где составляет более 10%. Минерал представлен высокостронциевой разновидностью. Представлен прозрачными обломки золотисто-желтого цвета пластинчатой формы с совершенной спайностью и стекляннным блеском (фиг. 8). При механическом воздействии кристаллы распадаются по спайности на более мелкие пластинки. Определено, что лампрофиллит содержит в своем составе от 10 до 15 мас. % стронция и около 0.5 мас. % ниобия.

Лоренценит распределен в пробе между электромагнитной и, преимущественно, немагнитной фракцией, и, в общей сложности, его содержание составляет около 0.7 об. % тяжелой фракции пробы. Минерал представлен осколочными обломками разнообразных форм (фиг. 9) в коричневой цветовой гамме со стекляннным блеском. Минерал был диагностирован оптическим методом с последующим изучением его с помощью сканирующего электронного микроскопа, где по энерго-дисперсионным спектрам было приблизительно определено содержание в нем основных оксидов: Na_2O – от 4.07 до 6.85%, Al_2O_3 – от 1.02

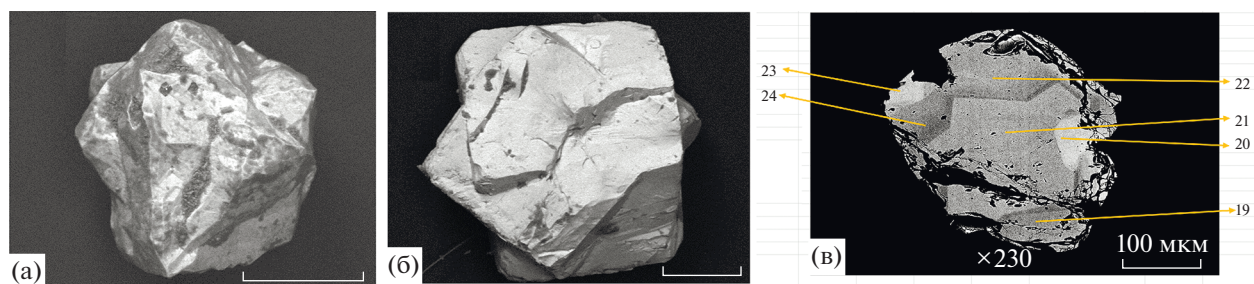
до 3.05%, SiO_2 – от 22.09 до 27.35%, TiO_2 – от 62.78 до 67.62%, FeO – от 0.48 до 1.55%, Nb_2O_5 – от 0.55 до 1.62%.

Часто лоренценит замещает титанит, что подтверждается изучением большого количества минеральных сростков (фиг. 26).

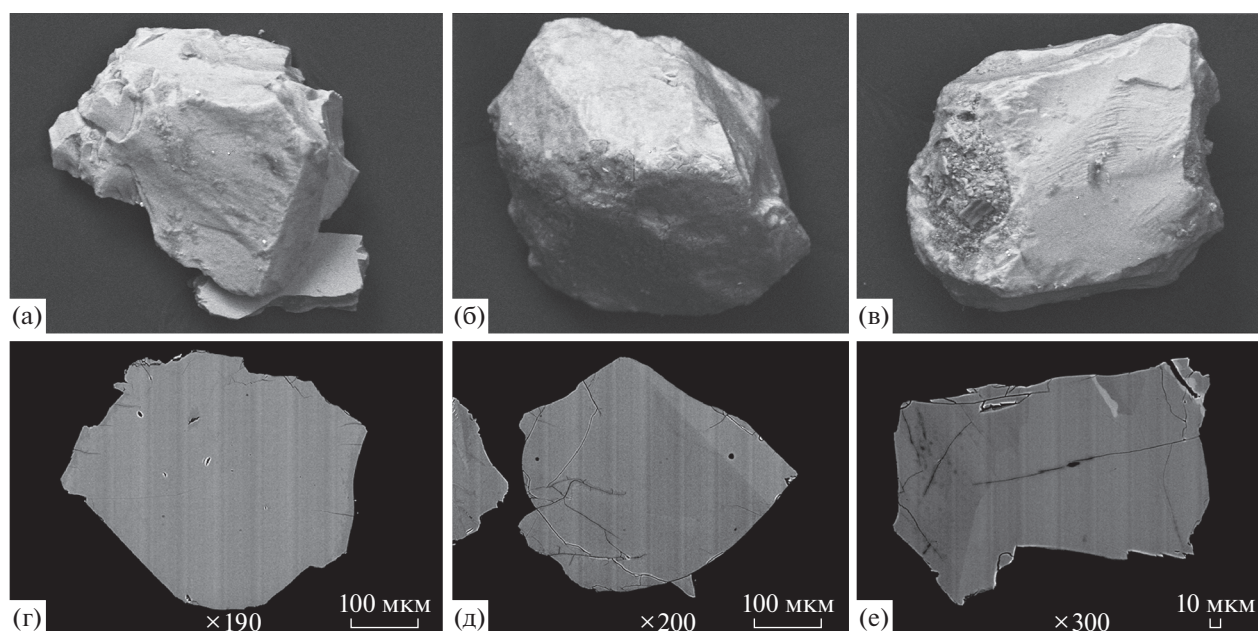
Anatim представлен богатой редкоземельными элементами и стронцием разновидностью фторапатита с РЗЭ и содержится в тяжелой фракции в количестве 0.2 об. % (табл. 7). Апатит в пробе наблюдается как в идиоморфных кристаллах (фиг. 10а), так и полуокатанных обломках кристаллов (фиг. 10в), а также в ксеноморфных выделениях (фиг. 10б) в межзерновом пространстве.

Таблица 4. Химический состав титанита 2-го типа (мас. %, РСМА)

Na_2O	SiO_2	CaO	TiO_2	FeO	ZrO_2	Nb_2O_5	Ce_2O_3
0.49	23.48	29.83	42.76	1.02	1.13	1.22	0.48
0.41	23.41	30.44	43.74	1.15		0.99	
0.53	23.93	30.32	43.89	0.92		0.83	
0.56	23.66	30.12	44.45	0.84		0.76	
0.44	23.58	30.01	43.45	1.17		0.7	
0.58	23.54	29.6	45.16	0.65		1.03	
0.54	23.59	29.86	42.05	1.29	1.51	1.21	
0.63	23.88	30.07	45.04	0.49		1.02	
0.57	23.74	30.12	44.7	0.74		1.26	
0.54	23.24	29.5	42.82	0.98		0.8	0.98



Фиг. 6. Морфологические разновидности зерен лопарита: а – сочетания кубических и октаэдрических форм; б – двойник кубических кристаллов (фото в отраженных электронах); в – зональный кристалл лопарита (полированная шашка), данные анализа в табл. 5.



Фиг. 7. Формы обломков эвдиалита: а–в – объемное изображение зерен в отраженных электронах; г–е – полированная шашка.

Химический состав зерен апатита крайне неоднороден, наблюдается незакономерная зональность, которая обусловлена изменением содержания стронция и редкоземельных элементов в объеме зерен (фиг. 10). Химический состав зерен апатита представлен в табл. 7.

Содержание стронция и РЗМ в россыпном апатите варьирует в широких пределах. Для большинства зерен наблюдаются зональность: основной объем, содержащий апатит-беловитовый твердый раствор (10–15% SrO и 7–10% Σ REE₂O₃, содержания которых положительно коррелиро-

Таблица 5. Химический состав зонального лопарита (фиг. 6в) по данным РСМА

№	TiO ₂	Na ₂ O	Nd ₂ O ₃	Nb ₂ O ₅	La ₂ O ₃	MgO	Pr ₂ O ₃	ThO ₂	Ce ₂ O ₃	Sm ₂ O ₃	FeO	CaO	SrO	Сумма	Σ REE ₂ O ₃
19	42.76	9.67	4.25	7.12	9.14	0.00	1.75	0.71	17.35	0.29	0.21	4.82	2.39	100.55	33.51
20	40.89	10.74	4.31	10.28	9.44	0.01	1.65	1.04	17.02	0.19	0.07	2.71	2.48	100.95	33.65
21	42.15	9.81	3.98	7.74	9.41	0.00	1.54	0.71	17.85	0.22	0.48	4.62	2.10	100.66	33.70
22	42.75	9.98	4.30	7.39	9.05	0.00	1.61	0.78	16.76	0.13	0.19	4.24	2.57	99.83	32.63
23	41.81	10.64	4.49	8.36	9.25	0.01	1.64	0.80	16.96	0.16	0.13	3.70	2.63	100.65	33.29
24	43.37	9.50	4.33	6.29	8.96	0.00	1.76	0.57	17.12	0.27	0.40	5.78	2.27	100.73	33.01

Таблица 6. Состав эвдиалита по данным РСМА (среднее по 33 определениям)

	Ce ₂ O ₃	Na ₂ O	FeO	CaO	La ₂ O ₃	SiO ₂	MnO	ZrO ₂	TiO ₂	SrO	Nd ₂ O ₃	Nb ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	SO ₃	MgO	Cl	K ₂ O	Total	Σ REE ₂ O ₃ **
Среднее	0.54	15.74	3.27	5.20	0.24	52.02	2.27	15.84	0.39	1.24	0.40	0.49	0.31	0.37	0.06	1.19	0.30	99.64	1.18
SD*	0.13	0.89	1.21	1.03	0.06	1.53	0.71	1.15	0.05	0.22	0.13	0.21	0.07	0.23	0.02	0.19	0.12	1.52	0.28

Примечание. *SD – стандартное отклонение. ** Σ REE₂O₃ = Ce₂O₃ + La₂O₃ + Nd₂O₃

Таблица 7. Представительные составы апатита Сергеваньской россыпи (РСМА, мас. %)

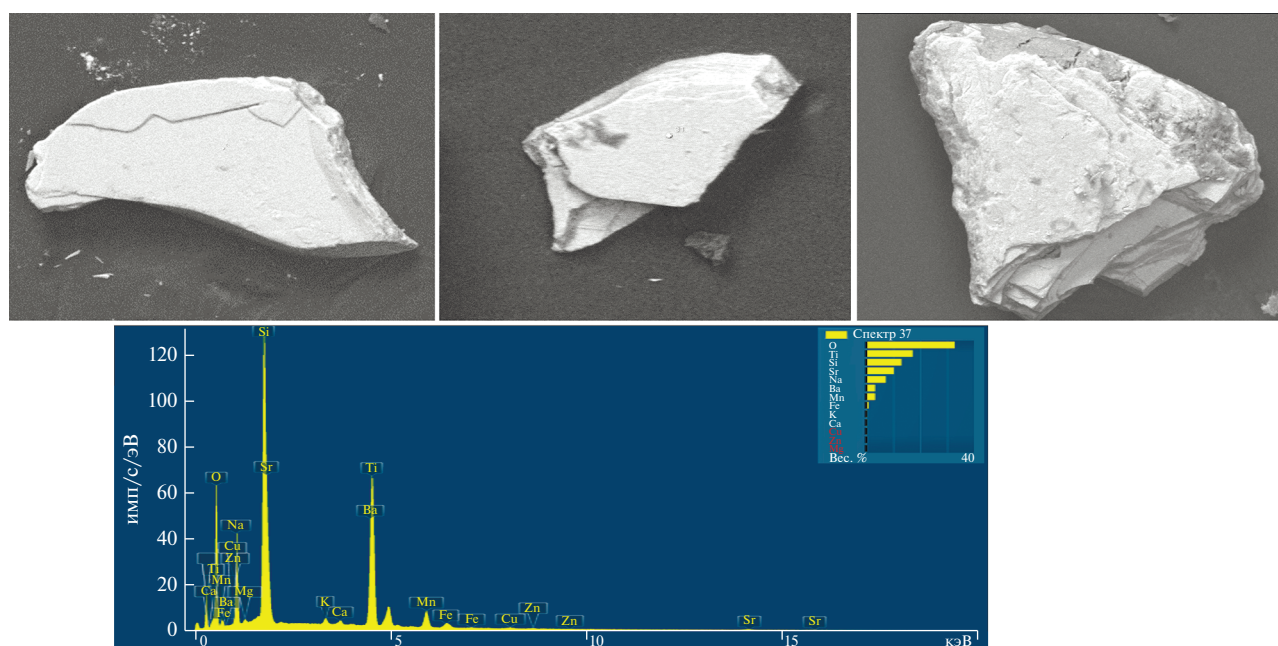
Na ₂ O	CaO	SrO	La ₂ O ₃	Ce ₂ O ₃	Pr ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃	Sm ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	F	Всего	–O=F ₂	Σ REE ₂ O ₃
1.54	26.82	23.69	2.92	5.25	0.47	1.79	0.23	0.45	33.77	3.12	96.92	95.62	10.43
1.63	34.19	14.64	3.23	5.12	0.49	1.50	0.21	0.41	36.06	3.52	97.47	96.00	10.34
1.03	41.33	10.26	1.89	3.45	0.44	1.21	0.14	0.57	37.30	3.19	97.54	96.21	6.99
1.79	30.98	18.19	3.62	5.85	0.57	1.81	0.08	0.42	35.11	2.61	98.43	97.32	11.85
1.95	30.31	16.31	5.16	6.85	0.54	1.19	0.00	0.76	34.17	2.49	97.23	96.19	13.74

Примечание. * Σ REE₂O₃ = Sm₂O₃ + Ce₂O₃ + La₂O₃ + Pr₂O₃ + Nd₂O₃

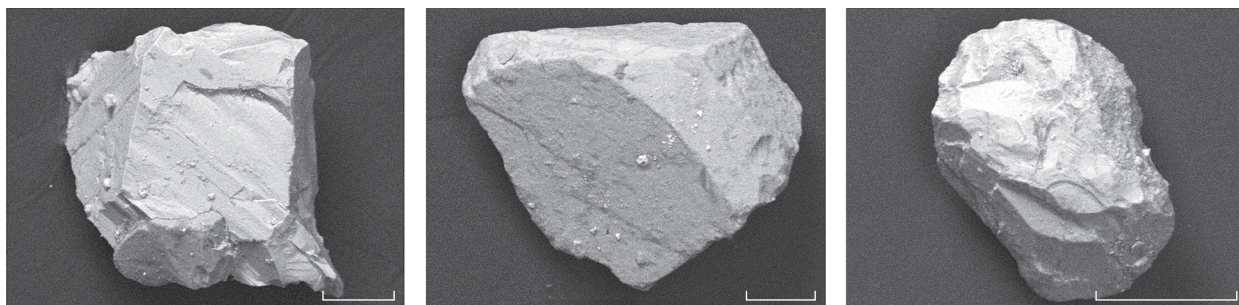
ваны) и резко очерченные зоны, представленные беловитом (до 25% SrO и до 15% REE₂O₃), апатит-стронадальфитовыми растворами (25–40% SrO и ~5% Σ REE₂O₃), богатые РЗЭ (23–27% Σ REE₂O₃) зоны. Такие зоны могут быть краевыми, могут быть приурочены к полифазным включениям в апатите или занимать секущее положение к кри-

сталу. Реже встречаются зерна с низким содержанием Sr и РЗЭ, а также очень низким (ниже 5 мас. % SrO, и REE ниже предела обнаружения).

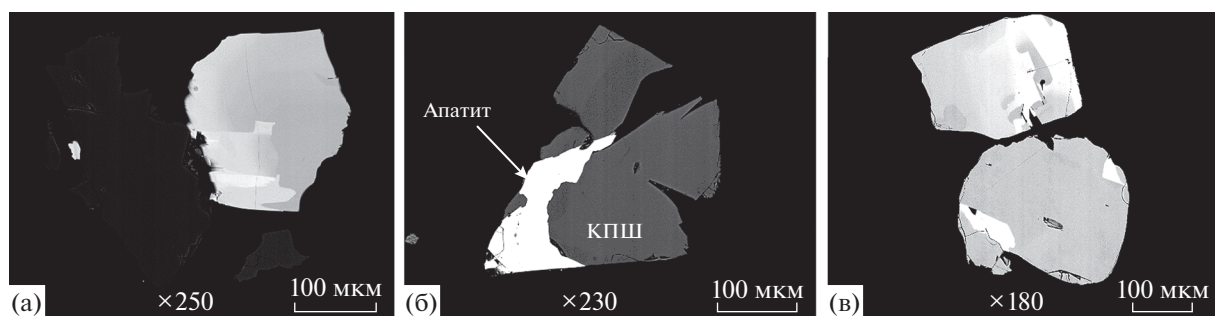
Литературной информации о составе апатита Ловозерского массива очень мало: все приводимые анализы акцессорного апатита выполнены методом мокрой химии, поэтому и не сопостави-



Фиг. 8. Формы обломков лампрофилита Сергеваньской россыпи (изображение в отраженных электронах) и энерго-дисперсионный спектр.



Фиг. 9. Формы обломков лоренценита Сергеваньской россыпи (изображение в отраженных электронах).



Фиг. 10. Формы зерен апатита в Сергеваньской россыпи: а, в — обломки идиоморфных кристаллов; б — ксеноморфная форма выделения апатита (сросток апатита с микроклином).

мы с микронзондовыми данными (по-видимому, при их выполнении из-за высокого содержания СаО занижено содержание SrO). Лишь для апатита из пегматитов имеются опубликованные микронзондовые анализы (Chakmouradian et al., 2002). В связи с этим был изучен апатит из представительных образцов пород: фюйта дифференцированного комплекса, сфен-амфиболового луаврита и эвдиалитового луаврита (в последнем случае апатит был обнаружен в качестве поздней фазы), а также из апатитового продукта флотации лопатритовой руды Карнасурского рудника, рассматриваемого нами как обобщенная проба апатита рудной зоны. Результаты сопоставления анализов приведены на фиг. 11. Они показывают, что вариации состава россыпного апатита практически совпадают с вариациями состава апатита из лопатритовых руд, а бедный Sr и REE апатит может быть сопоставлен с поздним апатитом из эвдиалитового луаврита, тогда как зерен, аналогичных апатиту из сфен-амфиболовых луавритов и пегматитов не обнаружено.

Энигматит представлен осколочными обломками черного цвета с размерами частиц до 0.7 мм. Диагностика проведена по оптическим свойствам и химическому составу, который определялся в полированных шлифах методом РСМА. В виде микровключений наблюдаются минералы

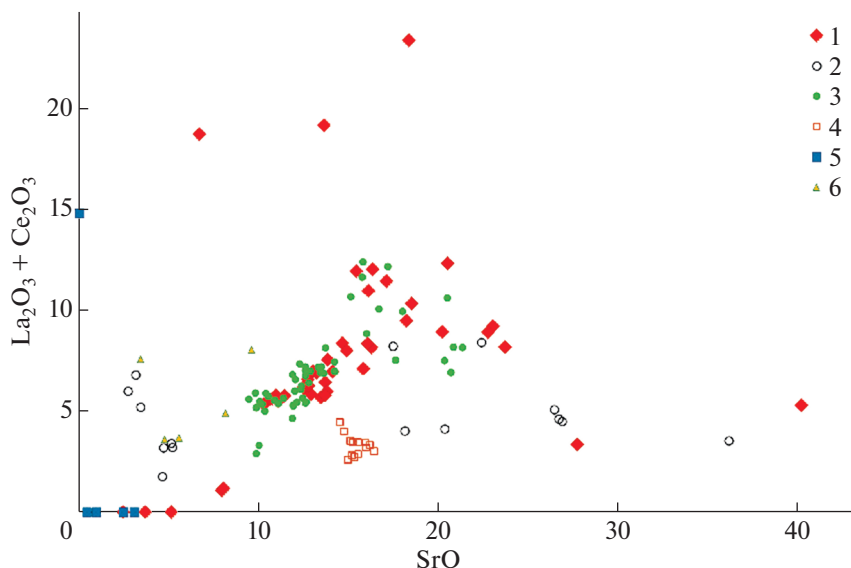
редких земель, преимущественно их оксиды или карбонаты (фиг. 12а, в, табл. 8).

Материал тонкого класса с размером частиц менее 0.044 мм изучался с использованием количественного рентгенодифракционного анализа (аналитик Доржиева О.В.). Проведенный анализ показал, что минеральный состав тонкого класса представлен следующими минералами (вес. %): КПШ — 29; альбит — 21; пироксен — 14%; амфибол — 6; анальцит — 6; натролит — 5; кварц — 5; хлорит — 3; слюда — 2; тальк — 2; содалит — 1; тоберморит (?) — 1; палыгорскит — <1; нефелин — <1; опал — <1 (фиг. 13).

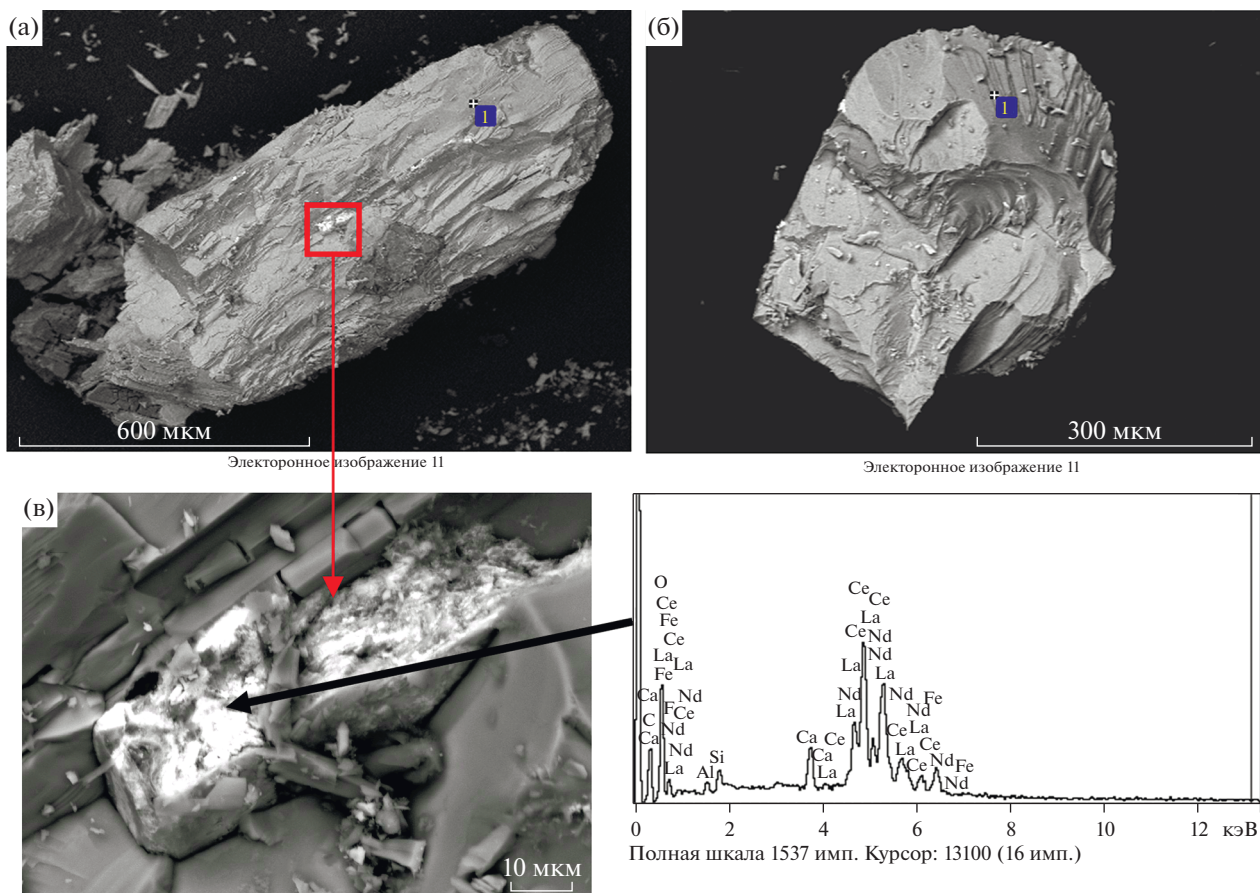
ВЫВОДЫ

1. Минеральный состав россыпных объектов, образованных на периферии Ловозерского массива, определяется составом первичных коренных руд и рассеянной минерализации массива.

2. Данные химического анализа (метод РФА) показывают, что в опробованных продуктивных отложениях Сергеваньского участка содержится Nb — 679 ppm, Ta — 40 ppm, TR — 1389 ppm, Sr — 1416 ppm, Ti — 1.17%, что может являться основанием для постановки работ по оценке перспектив промышленного освоения россыпных руд.



Фиг. 11. Сопоставление состава апатита из Сергеваньской россыпи с составом апатита из различных пород Ловозерского массива: 1 – из россыпи; 2 – из пород нижней зоны дифференцированного комплекса (скв. 904 глуб. 1116 м); 3 – из верхней зоны дифференцированного комплекса (продукт апатитовой флотации рудника Карнасурт); 4 – из сфен-амфиболового луаврита (скважина 406 глуб. 178 м); 5 – поздний апатит из эвдиалитового луаврита г. Кедыкверпакх; 6 – из пегматитов г. Аллуайв (Chakhmouradian et al., 2002).



Фиг. 12. Энигматит Сергеваньской россыпи: а, б – обломочные зерна энигматита, в – выделение оксидов РЗЭ в зерне энигматита. Изображение в отраженных электронах,

Таблица 8. Химический состав энigmatита россыпи (мас. %, РСМА)

№	Na ₂ O	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	FeO об.	CaO	NiO	Σ
1	5.89	1.55	37.62	1.53	9.28	1.55	37.0	0.64	—	95.56
2	8.04	0.71	41.20	0.71	9.09	2.67	37.5	—	0.24	100.01
3	6.23	1.73	40.60	0.99	9.55	1.13	39.1	—	—	99.70
4	6.28	1.04	41.60	—	9.66	3.67	38.20	—	—	100.00
5	5.95	1.09	40.00	1.10	10.10	1.30	39.70	—	—	99.30
6	6.08	1.81	38.80	1.47	9.60	1.79	36.60	0.53	—	96.70
7	6.61	1.10	41.50	—	10.00	3.40	37.30	—	—	99.90
8	6.15	1.14	39.51	2.14	9.19	2.28	39.34	0.63	—	100.40
9	5.32	1.76	39.05	1.45	10.05	2.55	37.93	0.68	—	98.78
10	5.82	1.78	42.19	1.21	9.44	2.27	39.35	—	—	102.10

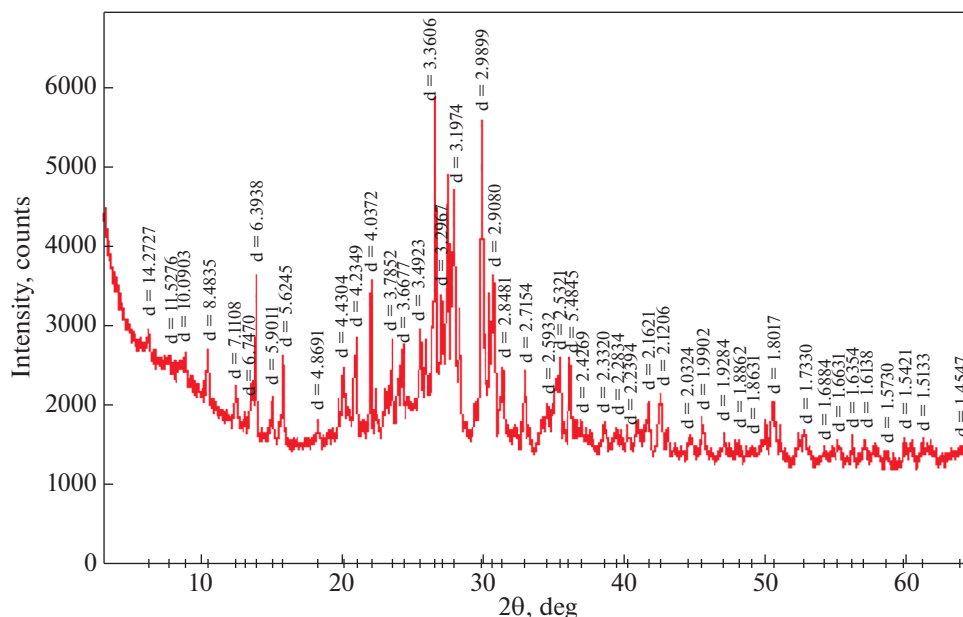
3. Установлено, что в россыпи, кроме лопарита — основного рудного минерала, присутствуют следующие минералы-носители редких и редкоземельных минералов: 1 — *апатит* — Σ РЗЭ (Sm₂O₃ + Ce₂O₃ + La₂O₃ + Pr₂O₃ + Nd₂O₃) около 7.4 мас. %; 2 — *эвдиалит* — Σ РЗЭ — 1.18; ZrO₂ — 15.8; Nb₂O₅ — 0.5; SrO — 1.2 мас. %. 3 — *титанит* — Σ РЗЭ до 1.0; Nb₂O₅ — до 1.24; ZrO₂ — до 1.5; 4 — *лоренцит* — Nb₂O₅ — до 1.6 мас. %. 5 — *лампрофиллит* — Nb₂O₅ около 0.5 мас. %, что может быть использовано

для расширения минерально-сырьевой базы комбината.

4. Апатит из россыпи аналогичен апатиту из рудной зоны, тогда как вклад сфен-амфиболовых луввритов не обнаруживается.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Министерства науки и высшего образования



Фиг. 13. Дифрактограмма тонкого класса (менее 0.044 мм) образца Сергеевского участка.

РФ № 13.1902.2021.0018 (соглашение 075-15-2020-802),
руководитель академик Н.С. Бортников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Арзамасцев А.А., Арзамасцева Л.В., Жирова А.М., Глазнев В.Н. Модель формирования Хибино-Ловозерского рудоносного вулcano-плутонического комплекса // Геология руд. месторождений. 2013. Т. 55. № 5. С. 397–414.

Буссен И.В., Сахаров А.С. Петрология Ловозерского щелочного массива. Л.: Наука, ЛО, 1972, 296 стр.

Герасимовский В.И., Волков В.П., Когарко Л.Н., Поляков А.И., Сапрыкина Т.В., Балашов Ю.А. Геохимия Ловозерского щелочного массива. ГЕОХИ АН СССР. М.: Наука, 1966, 392 стр.

Евзеров В.Я. Роль древних кор выветривания в формировании антропогенных отложений и связанных с ними месторождений северо-восточной части Балтийского щита // Литол. и полез. ископ. 1978. № 1. С. 50–58.

Зайцев В.А., Вильямс Т.С., Когарко Л.Н. Эволюция химического состава сфена в вертикальном разрезе дифференцированного комплекса Ловозерского массива // Труды научной школы “Щелочной магматизм Земли” Всероссийского семинара с участием стран СНГ “Геохимия щелочных пород”. 2002. С. 43–44.

Иванюк Г.Ю., Пахомовский Я.А., Яковенчук В.Н., Меньшиков Ю.П., Михайлова Ю.А. Редкометалльные минералы микроклин-кварцевых жил в вулcanoгенно-осадочных породах г. Киткнюн (Ловозерский массив) // Зап. РМО. 2006. № 1. С. 66–81.

Иванюк Г.Ю., Пахомовский Я.А., Яковенчук В.Н. Минералы группы эвдиалита в породах Ловозерского расчлененного комплекса гор Карнасурт и Кедыквырпахк // Зап. РМО. 2014. № 4. С. 73–90.

Когарко Л.Н. Проблемы генезиса гигантских редкометалльных месторождений Кольского полуострова // Российская Арктика: геологическая история, минералогия, экология. СПб.: ВНИИОкеангеология, 2002. С. 773–787.

Когарко Л.Н. Фракционирование циркония и гафния в процессах эволюции высокощелочной магматической

системы (Ловозерский массив, Кольский полуостров) // ДАН. 2015. Т. 463. № 4. С. 1–4.

Когарко Л.Н., Векслер И.В., Кригман Л.Д. Магматическая кристаллизация лопарита в системе лопарит–нефелин // ДАН СССР. 1983. т. 268. № 5. С. 1213–1215.

Когарко Л.Н., Вильямс Т., Осокин Е.Д. Эволюция составов лопарита Ловозерского массива // Геохимия. 1996. № 4. С. 294–297.

Лаломов А.В., Чефранов Р.М. Разработка метода прогнозирования потенциала россыпей на основе формализации факторов россыпеобразования на базе лопаритовых россыпей Ловозерского массива // Арктика: экология и экономика. 2020. № 4 (40). С. 54–65. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2020-4-54-65>

Лаломов А.В., Григорьева А.В., Бочнева А.А., Магазина Л.О., Чефранов Р.М. Редкометалльные россыпи Ловозерского массива // Разведка и охрана недр. 2019. № 1. С. 51–56.

Лихникевич Е.Г. Опережающие минералогические исследования руд редких металлов – основа для прогнозирования технологических свойств и выбора оптимальных технологических решений: дис. ... док. геол.-минер. наук: 25.00.05. ИГЕМ РАН, Москва, 2020. 180 с.

Пахомовский Я.А., Иванюк Г.Ю., Яковенчук В.Н. Минералогия пород продуктивного комплекса г. Кедыквырпахк, Ловозерский массив, Кольский полуостров // Минералогия во всем пространстве сего слова. Труды III Ферсмановской научной сессии. Апатиты: Изд-во К&М. 2006. С.128–131.

Пеков И.В. Ловозерский массив: история исследования, пегматиты, минералы. М.: ТО “Земля”, 2001. 464 с.

Семенов И.Е. Минералогия Ловозерского щелочного массива. М.: Наука, 1972. 305 с.

Сук Н.И., Котельников А.Р., Вирюс А.А. Кристаллизация лопарита в щелочных флюидно-магматических системах (по экспериментальным и минералогическим данным) // Геология и геофизика. 2013. № 4. С. 569–588.

Chakhmouradian A.R. Reguir E.P. Mitchell R.H. Strontium apatite: new occurrences, and the extent of Sr-for-Ca substitution in apatite-group minerals //The Can. Mineral. 2002. V. 40., P. 121–136.