

УДК 553.068.58

## ЛОПАРИТ В РОССЫПЯХ ЛОВОЗЕРСКОГО РОССЫПНОГО УЗЛА НА ПРИМЕРЕ СЕРГЕВАНЬСКОГО УЧАСТКА<sup>1</sup>

© 2024 г. А. В. Григорьева<sup>а, \*</sup>, А. В. Лаломов<sup>а</sup>, В. А. Зайцев<sup>б</sup>, Д. А. Лаломов<sup>с</sup>,

А. В. Чефранова<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,  
Старомонетный пер., 35, Москва, 119017 Россия

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

<sup>с</sup>ООО “Геодевайс технолджис”, ул. О. Берггольц, 36, Санкт-Петербург, 192148 Россия

\* E-mail: grig357@mail.ru

Поступила в редакцию 09.11.2023

После последней доработки 20.12.2023 г.

Принята к публикации 29.01.2024 г.

Лопарит является основным россыпеобразующим минералом в россыпях, расположенных по периферии Ловозерского щелочного массива. В статье представлены новые материалы изучения лопарита из проб, отобранных при полевых работах на Сергеваньском участке Ревдинской россыпи, расположенной у северного обрамления массива. Минерал был выделен из тяжелой фракции технологической пробы весом около 30 кг. В работе представлены результаты исследования морфологии, особенностей химического состава и внутреннего строения лопарита из россыпей, а также его связь с коренными породами массива. Определено, что в россыпи лопарит представлен двумя типами зерен: “лопарит-1” – крупные (0.25–0.75 мм) двойники кристаллов; “лопарит-2” – более мелкие (0.05–0.20 мм) обломки неправильной формы. В работе изучены минералогические особенности каждого типа зерен и выявлена их связь с коренной минерализацией. Исследование типоморфных особенностей россыпного лопарита позволяет разработать оптимальную технологическую схему обогащения россыпей для расширения редкометальной сырьевой базы России.

**Ключевые слова:** лопарит, Ловозерский массив, морфология, редкоземельные элементы (РЗЭ), химический состав, зональность, коренные источники.

**DOI:** 10.31857/S0016777024030045, **EDN:** dbpjyi

### ВВЕДЕНИЕ

В отечественной и зарубежной литературе опубликовано большое число работ, посвященных лопариту Ловозерского массива (Mitchell, Chakhmouradian, 1996; Kogarko et al., 2002; Chakhmouradian, Mitchell, 2002; Когарко, 2004; Сук и др., 2012; Пахомовский и др., 2014; Михайлова и др., 2018; Когарко, 2021; и др.), в которых рассматриваются его химический состав, генетические аспекты образования, содержание и распределение минерала в коренных породах. На фоне этого вопросы его концентрации в россыпях, изменение химического состава минерала и гипергенные изменения, происходящие при образовании и становлении россыпей, изучены недостаточно. Цель этой работы — изучение типоморфизма,

морфологических особенностей и химического состава лопарита в рыхлых отложениях на примере Сергеваньского участка Ревдинской россыпи северного обрамления Ловозерского массива, определение коренных источников сноса, а также изучение степени гипергенных изменений, происходящих в условиях его существования в россыпи.

Россыпи лопарита, локализованные в рыхлых отложениях в предгорьях Ловозерского массива и в центральной Сейдозерской впадине, образуют Ловозерский россыпной узел. Наиболее разведанной и перспективной является Ревдинская россыпь, расположенная по северной периферии Ловозерского массива. Она состоит из трех участков: Шомиокского, Ревдинского и Сергеваньского. В процессе полевых работ 2021 г. были опробованы

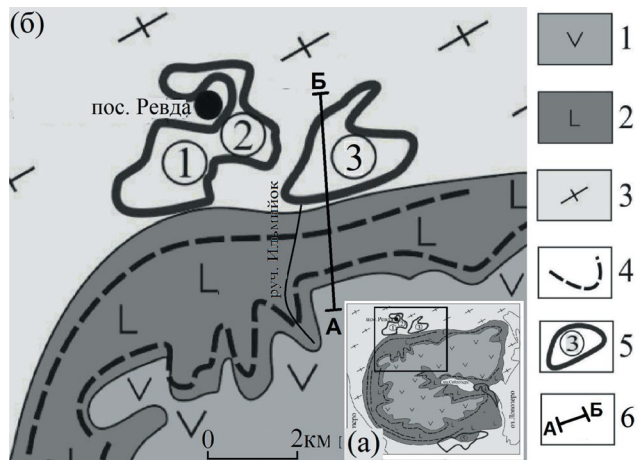
<sup>1</sup> Дополнительная информация для этой статьи доступна doi: 10.31857/S0016777024030075 для авторизованных пользователей.

продуктивные отложения наиболее перспективного Сергеваньского участка, расположенного в восточной части россыпного поля. В процессе определения минерального состава шлиховых проб было установлено, что лопарит в россыпи присутствует как в свободном виде, так и во включениях в обломках пород класса крупности более 0.8 мм, которые составляют более половины объема пробы. По петрографическому составу они аналогичны породам Ловозерского массива. Лопарит в свободном состоянии представлен зернами двух типов, отличающихся по крупности, морфологическим особенностям, внутренней структуре и химическому составу. Авторами представлены результаты изучения каждого из этих типов и определена их связь с определенными коренными породами Ловозерского массива.

### ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И ЛОПАРИТОВАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ ЛОВОЗЕРСКОГО МАССИВА

Ловозерский массив относится к позднедевонскому комплексу щелочных и нефелиновых сиенитов и представляет собой сложнопостроенную многофазную интрузию площадью 650 км<sup>2</sup> (фиг. 1). Возраст массива Ловозера определяется Rb-Sr изохронным методом как  $370 \pm 7$  млн лет (Kramm, Kogarko, 1994), Th-Pb изохронным методом как  $376 \pm 13$  (Зартман, Когарко, 2014), U-Pb методом по циркону из цирконсодержащих сиенитов — как  $346.9 \pm 8.1$  и из цирконсодержащей микроклиновой жилы в контактовой зоне массива — как  $346.9 \pm 8.1$  (Арзамасцев и др., 2007), U-Pb методом по первичному титаниту  $379.4 \pm 3.9$  из луаврита дифференцированного комплекса и  $361.4 \pm 3.2$  — по титаниту из зоны апатит-титанитовой минерализации (Родионов и др., 2018). Для лопарита Ловозерского массива возраст составляет  $373 \pm 11$  млн лет (Mitchell et al., 2011). Вмещающими являются докембрийские гранито-гнейсы. По данным геофизических исследований, массив имеет коническое строение и простирается до глубины 7–9 км, где устанавливается его нижняя граница (Глазнев и др., 2008).

В составе массива установлено несколько комплексов (серий) пород, генетические взаимоотношения и детали строения которых трактуются разными исследователями по-разному, нет даже единого мнения относительно количества фаз внедрения. Подавляющая часть поверхности Ловозерского массива занята выходами пород дифференцированного комплекса уртитов-фойяитов-луавритов и прорывающего и перекрывающего его



**Фиг. 1.** Геологическое строение со снятыми четвертичными отложениями и лопаритовая минерализация части Ловозерского массива: а — обзорная схема массива, б — фрагмент северо-восточной части массива (Лихачев и др., 1980<sup>1</sup>; Лаломов и др., 2019). 1 — эвдиалитовые луавриты нерасчлененные; 2 — дифференцированный лопаритоносный комплекс луавритов-фойяитов-уртитов; 3 — вмещающий докембрийский гранито-гнейсовый комплекс; 4 — рудные зоны массива; 5 — Ревдинское редкометальное россыпное месторождение (поле), контурное по содержанию 4 кг/м<sup>3</sup>; участки: 1 — Шомиокский, 2 — Ревдинский, 3 — Сергеваньский; 6 — разрез по линии АБ, фиг. 2.

комплекса эвдиалитовых луавритов (Герасимовский и др., 1966; Буссен, Сахаров, 1972; Семенов, 1972; Веселовский и др., 1990; Арзамасцев и др., 2013). Остальные комплексы пород присутствуют среди пород двух этих комплексов в виде обособленных тел: в разной степени переработанных, ксенолитов, либо обособлений, для которых предполагают ликвационный генезис (пойкилитовые содалитовые сиениты) (Герасимовский и др., 1966).

Породы дифференцированного комплекса луавритов-фойяитов-уртитов, выполняют основной объем массива. Они геофизически прослеживаются до глубины не менее 8 км. Особенности геологического строения позволяют выделить в вертикальном разрезе дифференцированного комплекса три зоны: верхнюю, мощностью около 300 м, сложенную преимущественно трехчленными пачками пород (уртит-фойяит-луаврит), среднюю, мощностью 650 м, представленную очень слабо расслоенной толщей в основном луавритового состава, и нижнюю, мощностью свыше 500 м, сложенную

<sup>1</sup> Лихачев, А.С. и др. Отчет о детальной разведке Шомиокского участка Ревдинского россыпного месторождения лопарита с подсчетом запасов по состоянию на 01.07.1980 г. ПГО Севзапгеология, Мурманская ГРЭ. Апатиты, 1980. (фондовая, № ТФГИ № 2823).

двухчленными (фойяит-луаврит) и трехчленными (уртит-фойяит-луаврит) пачками пород.

Слои (горизонты) залегают согласно, падение их к центру массива под углами не более  $10^{\circ}$ – $15^{\circ}$ , лишь в непосредственной близости от контакта с вмещающими докембрийскими породами оно становится более крутым — до  $30^{\circ}$  и даже  $50^{\circ}$  (Буссен, Сахаров, 1967). Для разреза пород комплекса характерна относительная выдержанность пластов по простиранию и падению и наличие маркирующих горизонтов, прослеживающихся по всему периметру массива. В разрезе пород дифференцированного комплекса встречаются горизонты уртитов и ювитов<sup>2</sup>, резко обогащенных лопаритом и иногда апатитом. Промышленная лопаритовая минерализация приурочена к верхней и нижней зонам дифференцированного комплекса. В верхней зоне находится горизонт малиньитового<sup>3</sup> состава мощностью около 20 см, содержащий до 25% лопарита. В нижней зоне имеется несколько рудных горизонтов уртитов и реже луавритов, содержащих промышленные концентрации лопарита (Когарко, 2002). Рудник “Карнасурт” разрабатывает лопаритовые уртиты и малиньиты в составе верхней зоны дифференцированного комплекса (слои I-4 и II-4), в нижней части был заложен рудник “Умбозеро”, разрабатывавший слои III-10 и III-14 (Пожиленко и др., 2002), (фиг. 2).

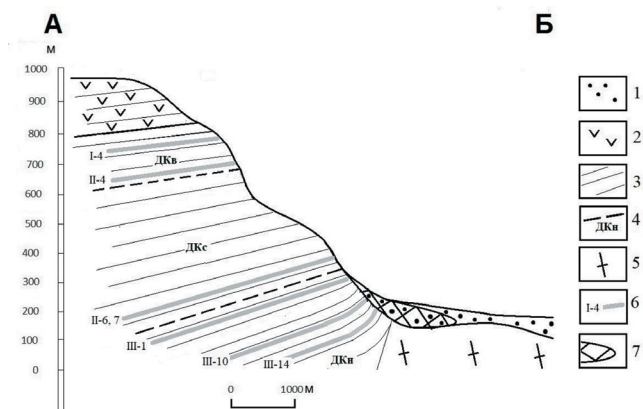
Содержание лопарита в наиболее обогащенных этим минералом породах Ловозера следующее: лопаритовый луаврит — 1–3%, лопаритовый ювит — 1–13%, лопаритовый уртит — 3.5–16%, лопаритовый малиньит — 10–30% (Пеков, 2001).

Породы комплекса эвдиалитовых луавритов образуют пластовое тело мощностью до нескольких сотен метров, субсогласно (за исключением т.н. “ареала прорыва”, где они явно прорывают дифференцированный комплекс, расположенный в центральной части массива), залегающее на породах дифференцированного комплекса (Герасимовский и др., 1966; Буссен, Сахаров, 1972).

В комплексе эвдиалитовых луавритов преобладают мезо- и меланократовые луавриты с подчиненным количеством эвдиалитовых фойяитов,

<sup>2</sup> Ювит — порода промежуточного состава между уртитом и фойяитом.

<sup>3</sup> Малиньит — порода, обедненная полевым шпатом относительно луаврита, т.е. промежуточная по составу между луавритом и ийолитом или мельтейгитом.



**Фиг. 2.** Схематический обобщенный разрез северозападного фланга Ловозерского массива по линии АБ (фиг. 1) по данным (Герасимовский и др., 1966; Буссен, Сахаров, 1972; Когарко, 2002; Пожиленко и др., 2002; Лаломов и др., 2019). 1 — четвертичные отложения делювиально-пролювиального и горно-ледникового генезиса; 2 — комплекс эвдиалитовых луавритов; 3 — дифференцированный лопаритовый комплекс луавритов-фойяитов-уртитов; 4 — границы серий дифференцированного комплекса (ДКн — нижняя серия, ДКс — средняя серия, ДКв — верхняя серия); 5 — вмещающий докембрийский гранито-гнейсовый комплекс; 6 — рудные горизонты массива; 7 — россыпи лопарита.

как ортокитов<sup>4</sup> и эвдиалитов<sup>5</sup>. Наиболее заметная особенность пород комплекса — обилие идиоморфного эвдиалита.

В вертикальном разрезе этого комплекса фиксируется первичная расслоенность — чередование разных по составу пород, но она выражена значительно слабее, и выдержанность слоев значительно меньше, чем в дифференцированном комплексе. Среди них отдельные линзы нефелиновых сиенитов и фойяитов с низким содержанием эвдиалита содержат лопарит с повышенным содержанием тория, тантала и железа в количестве 0.5–1 об. % (Михайлова и др., 2018).

В дифференцированном комплексе и комплексе эвдиалитовых луавритов обнаружена скрытая расслоенность — закономерное изменение состава минералов в зависимости от гипсометрического (стратиграфического) положения образца (Kogarko et al., 2002; Kogarko et al., 2006; Shubin et al., 2021; Kogarko, Nielson, 2021; Михайлова и др., 2018; Kogarko, 2022). Примечательно, что на диаграммах

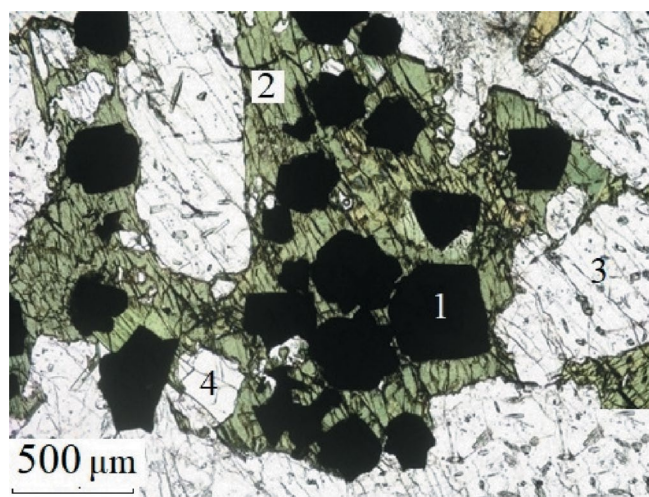
<sup>4</sup> Как ортокиты — тонкослоистые породы, в которых чередуются слои, богатые эвдиалитом, и пироксеновые или амфибол-пироксеновые слои, содержащие полевой шпат и нефелин.

<sup>5</sup> Эвдиалититы — породы, состоящие в основном (на 60–80%) из эвдиалита, при подчиненной роли амфибола, содалита, цеолитов, нефелина и полевого шпата, находящихся в переменных количествах.

состав минерала — вертикальное положение образца фигуративные точки лопарита и пироксена из пород обоих комплексов образуют единые тренды (Kogarko, 2006, 2022) несмотря на то, что геологически между комплексами отмечается отчетливое несогласие.

В породах массива можно выделить следующие типы зерен лопарита: 1 — хорошо оформленные идиоморфные кристаллы (“кумулятивный” лопарит по Л.Н. Когарко (Когарко, 2002)), как правило, сдвойникованные по флюоритовому закону (фиг. 3), довольно часто среди них встречаются скелетные кристаллы, содержащие включения сингенетических лопариту минералов: нефелина, полевого шпата и пироксена; 2 — интерстициальный, ксеноморфный лопарит, который кристаллизовался из остаточного расплава; 3 — неправильной формы выделения лопарита — остатки кристаллов, частично замещенных вторичными минералами в результате постмагматических процессов. В процессах такого замещения состав ранее сформированного лопарита оказывается устойчивым, но в них же формируется вторая генерация лопарита, обогащенного луешитовым компонентом или луешитом с примесью лопаритового компонента (Mitchell, Chakhmouradian, 1996), а в порфиридных луявритах описано обрастание лопарита каймой, богатой луешитовым компонентом (Chakhmouradian, Mitchell, 2002).

Проведенные исследования показали, что в самой нижней части дифференцированного комплекса присутствует только интерстициальный лопарит; идиоморфная разновидность появляется в верхней части с глубины приблизительно 1500 м



**Фиг. 3.** Лопарит-1 в малините из промышленной рудной зоны массива (прозрачный шлиф). 1 — лопарит, 2 — эгирин, 3 — нефелин, 4 — полевой шпат (по материалам авторов).

(Kogarko et al., 2002). В вертикальном разрезе всего плутона снизу вверх в лопарите возрастает содержание SrO (от 0.84 до 7.68%), Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (от 7.40 до 13.35%), Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (от 0.54 до 0.77%), ThO<sub>2</sub> (от 0.50 до 1.0%), Na<sub>2</sub>O (от 8.60 до 10.0%) и уменьшаются концентрации CaO (от 4.35 до 3.08%), FeO (от 0.56 до 0.09%), TiO<sub>2</sub> (от 40.04 до 36.62%), Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (от 20.38 до 14.76%), La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (от 10.05 до 7.8%), Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (от 4.6 до 3.3%), ΣREE (от 37.6 до 27.6%) (Когарко, 2002). Эти закономерности изменения состава лопарита в разрезе плутона позволили установить основной источник формирования россыпных месторождений, что будет показано далее.

### ГЕОЛОГИЯ СЕРГЕВАНЬСКОГО УЧАСТКА РЕВДИНСКОЙ РОССЫПИ

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

Ревдинская россыпь расположена в северных предгорьях массива (см. фиг. 1). Продуктивный пласт россыпи приурочен к отложениям склонового комплекса, содержащим обломочный материал местных щелочных пород, флювиогляциальным отложениям и морене местного горного оледенения. Нижняя часть флювиогляциальных отложений 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 содержания лопарита (до 35 кг/м<sup>3</sup>) отмечаются в депрессиях коренного рельефа. В верхней части продуктивного комплекса содержания лопарита уменьшаются и колеблются от 0.5 до 8.5 кг/м<sup>3</sup>. Россыпное месторождение охватывает почти всю территорию развития шлейфа отложений местных ледников в северных предгорьях Ловозерского массива (Лаломов, Чефранов, 2020). В плане россыпь оконтурена по бортовому содержанию 2 кг/м<sup>3</sup>. При бортовом содержании 4 кг/м<sup>3</sup> россыпное поле распадается на 3 отдельных участка, Сергеваньский участок связан с главным выносом долины руч.

Ильмаюк и занимает восточную часть россыпного поля (Лихачев, 1984<sup>6</sup>).

Продуктивная зернистая часть отложений пласта (размерный класс  $-0.8 + 0.045$  мм) составляет 49.45% при содержании класса  $+0.8$  мм 47.39% и шламового класса  $-0.045$  мм — 3.16%. В тяжелой фракции зернистого класса (выход 16.6% на зернистый класс или 8.4% на исходную пробу) преобладает пироксен — 92%, титанит — 2.05%, лопарит — 1.49%. В содержании менее 1% присутствуют лоренценит, лампрофиллит, амфиболы, апатит, магнетит, флогопит + биотит, эвдиалит, энigmatит, гранат, эпидот (Лаломов и др., 2022).

На основании технолого-минералогического исследования малой минералого-технологической пробы, взятой из продуктивных отложений Сергеваньской россыпи, были изучены, в первую очередь, гравитационно обогатимые “зернистые” отложения класса крупности  $-0.8 + 0.045$  мм, содержание которых в составе продуктивного пласта составляет приблизительно 50%. Общее содержание лопарита в исходной пробе 0.13% ( $2.67 \text{ кг/м}^3$ ) или 1.49% от тяжелой фракции, выход которой в зернистом классе  $-0.8 + 0.045$  мм составляет 16.4% (или 8.4% на исходную пробу). Эти отложения могут эффективно и экономически оправданно обогащаться по гравитационно-магнитной схеме с выделением на первом этапе в черновой концентрат комплекса тяжелых минералов и последующей двухстадийной магнитной сепарацией, что позволит получить промышленный лопаритовый концентрат для редкометальной промышленности России (Левченко и др., 2023).

## ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материал для изучения россыпи был получен в ходе полевых работ, проведенных по данным разведочных работ предыдущих исследователей (Лихачев, 1984<sup>7</sup>). Авторами были определены площади, где продуктивные отложения расположены максимально близко к поверхности и достигимы неглубокими (до 3 м) шурфами. В процессе полевых работ из Сергеваньской россыпи рядом со скважиной 46 разведочной линии 560 шурфом

<sup>6</sup> Лихачев А.С. Геологическая записка к ТЭО и расчету временных кондиций по Ревдинскому россыпному месторождению. ПГО Севзапгеология, Мурманская ГРЭ, Апатиты, 1984. (фондовая, № ТФГИ № 3226).

<sup>7</sup> Лихачев А.С. Геологическая записка к ТЭО и расчету временных кондиций по Ревдинскому россыпному месторождению. ПГО Севзапгеология, Мурманская ГРЭ, Апатиты, 1984. (фондовая, № ТФГИ № 3226).

с координатами  $67^{\circ}55.268' \text{ N}$ ,  $034^{\circ} 40.098' \text{ E}$ , высотная отметка 310 м, в интервале 0.3—1.3 м был вскрыт промышленный пласт россыпи с содержаниями лопарита по данным минералогического анализа в исходной пробе 0.13% ( $2.67 \text{ кг/м}^3$ ), из которого была отобрана крупнообъемная проба весом около 30 кг. Из класса  $-0.8$  мм после обесшламливания (отмывки непродуктивной фракции менее 0.044 мм) в бромформе (плотность  $2.89 \text{ г/см}^3$ ) была выделена тяжелая фракция, которая затем исследовалась с помощью оптического и электронного микроскопа. Выделенные зерна лопарита были помещены в эпоксидную шлифованную шашку для изучения на микрозонде. Также были изготовлены и исследованы шлифы и шашки из галечного материала нефелиновых сиенитов. Породы верхнего рудного пласта (малиниты) были изучены в прозрачных шлифах (фиг. 3).

Минералогия россыпи была изучена с использованием оптического и электронно-микроскопического методов (Лаломов и др., 2022). Диагностика минералов проведена с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-5610LV (Япония) в отраженных электронах (BSE COMPO), отображающих контраст в зависимости от среднего атомного номера элемента. Электронный микроскоп оснащен аналитическим энерго-дисперсионным спектрометром (ЭДС) INCA-Energy 450 (Великобритания), который позволяет проводить качественный и полуколичественный анализ с рельефных образцов, и количественный анализ с полированных образцов для определения всех элементов тяжелее С, исключая N, (аналитики Л.О. Магазина и Л.В. Левицкая).

Методом рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) в полированных шашках в аналитической лаборатории ИГЕМ РАН (аналитик Е.Н. Ковальчук) на приборе JEOL — 8200 было исследовано 35 зерен лопарита, в том числе 12 зерен “лопарита-1” (35 определений состава) и 23 зерна “лопарита-2” (35 определений состава), а также 4 зерна лопарита из обломков пород из россыпи крупностью более 0.8 мм, помещенных в полированные шашки (9 определений состава).

## ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ И МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЛОПАРИТА В РОССЫПИ

### *Лопарит в обломках пород*

В отобранной пробе продуктивного пласта Сергеваньской россыпи размерный класс более 0.8 мм составляет 42.6 вес. %. Класс более 10 мм

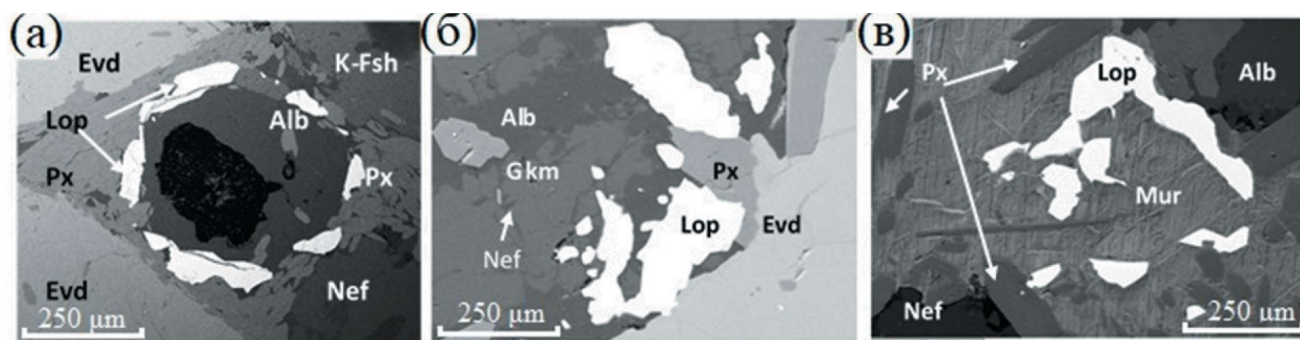
представлен плохо окатанной галькой и щебнем пород Ловозерского массива — преимущественно нефелиновыми сиенитами, эвдиалитовыми и мурманитовыми луявритами. Лопарит выявлен, в основном, в двух последних типах пород в виде включений. Он представлен в породах преимущественно в виде скелетных форм и ксеноморфных выделений в межзерновом пространстве породообразующих минералов. Скелетные формы (фиг. 4а) выделяются в ассоциации с пироксенами, эвдиалитом, нефелином и калиевым полевым шпатом, внутренняя часть выполнена альбитом с мелкими включениями эгирин-авгита; ксеноморфные выделения лопарита (фиг. 4б) отмечаются в межзерновом пространстве нефелина (практически полностью замещенного гакманитом (содалитом) и сохранившегося только в виде тонких просечек в гакманите), эвдиалита (в сростании с пироксенами) и альбита, а также в поле развития мурманита (фиг. 4в), заместившего ломоносвит, по периферии поля мурманита располагаются очаговые выделения нефелина, альбита и редкие кристаллы пироксенов. Аналогичные (фиг. 4а) полифазные

включения в сдвойникованных идиоморфных кристаллах лопарита встречаются в рудных ийолитах (Пахомовский и др., 2014).

#### Лопарит в свободном состоянии

Лопарит в свободном состоянии концентрируется, в основном, в классе крупности от 0.044 до 0.8 мм. Установлено, что минерал в россыпи представлен разнообразными зернами, различающимися по размерам, морфологии, цвету крошки, внутреннему строению и химическому составу. Эти особенности дали возможность выделить в россыпи два типа зерен лопарита, “лопарит-1” и “лопарит-2” (табл. 1).

Анализируя статистические параметры состава разновидностей лопарита из табл. 1, можно отметить, что “лопарит-1” представляет собой гораздо более однородные минеральные образования — коэффициент вариации по всем проанализированным компонентам для него меньше (в ряде случаев — в 2—3 раза), чем для “лопарита-2”, что можно интерпретировать как свидетельство внутренней неоднородности зерен (зональной или

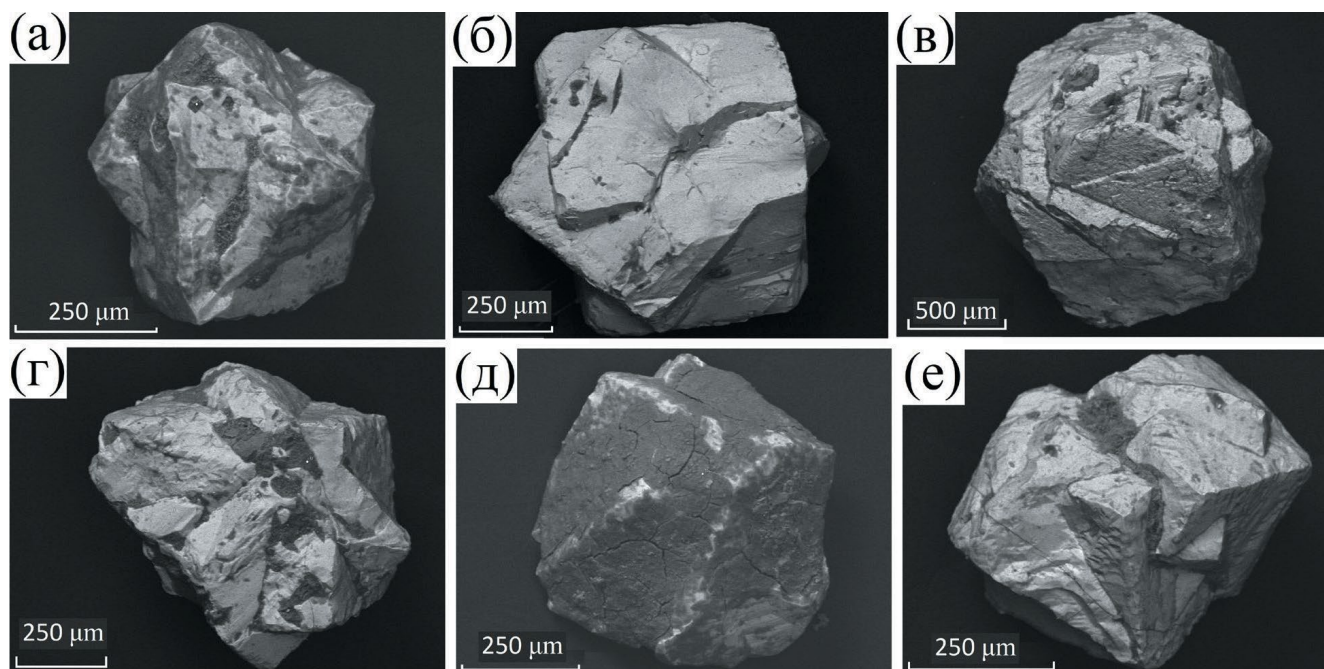


**Фиг. 4.** Формы нахождения лопарита в крупных обломках пород в россыпи: а — скелетный кристалл лопарита в окружении скоплений кристаллов эгирин-авгита (*Px*); б — ксеноморфные выделения лопарита на контакте эвдиалита (*Evd*) с эгирин-авгитом (*(Px)*), альбитом (*Alb*) и гакманитом (*Gkm*) по нефелину; в — в поле развития мурманита (*Mur*) в окружении очаговых выделений альбита (*Alb*), нефелина (*Nef*) и эгирина (*Px*). Размеры выделений лопарита варьируют в пределах от 20 до 250 мкм. Прозрачно-полированный шлиф. Изображение в отраженных электронах.

**Таблица 1.** Химический состав лопарита в россыпи (PCMA, мас. %) по 35 анализам для каждой разновидности

		TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ThO <sub>2</sub>	Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	CaO	SrO	Total	ΣREE
Лопарит-1	Среднее	42.28	9.75	4.38	7.92	8.67	1.62	0.83	16.28	0.21	0.30	4.88	3.15	100.35	31.99
	S*	0.87	0.34	0.17	1.15	0.38	0.08	0.12	0.68	0.06	0.08	0.63	0.53		0.99
	Cv	0.02	0.03	0.04	0.15	0.04	0.05	0.14	0.04	0.30	0.25	0.13	0.17		0.03
Лопарит-2	Среднее	40.62	9.37	4.53	10.20	7.65	1.52	0.82	16.61	0.20	0.24	4.64	3.68	100.12	31.33
	S*	2.79	0.82	0.56	4.54	0.38	0.15	0.25	1.13	0.08	0.08	0.81	0.70		2.06
	Cv	0.07	0.09	0.12	0.45	0.05	0.10	0.30	0.07	0.38	0.33	0.17	0.19		0.07

Примечание. S\* — стандартное отклонение; Cv — коэффициент вариации.



**Фиг. 5.** Морфологические разновидности зерен лопарита-1 Сергеевской россыпи: а, д — сочетания кубических и октаэдрических форм; б — двойник кубических кристаллов; в — двойники кубических кристаллов с частичными сколами; г, е — двойники кристаллов по флюоритовому закону (по грани 111). Тяжелая фракция, изображение в отраженных электронах.

блоковой) “лопарита-2” и/или неоднородности выборки в россыпи по источникам поступления.

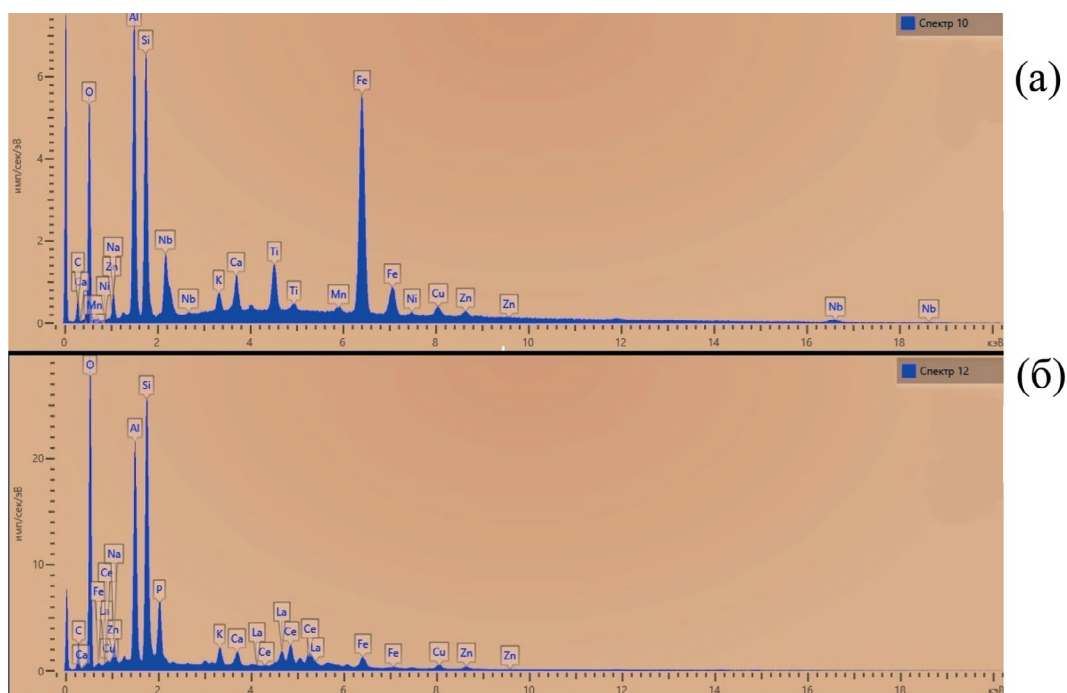
*Лопарит-1* составляет около 60 об. % от общего количества свободного лопарита, концентрируется в тяжелой фракции материала Сергеевской россыпи и представлен зернами правильных кристаллографических форм, как правило, это двойники кристаллов черного цвета с металлическим блеском, находящиеся преимущественно в немагнитной части тяжелой фракции, их содержание в ней составляет более 10 об.%. Морфологические особенности лопарита-1 представлены на фиг. 5.

Наиболее распространенные разновидности двойникованных кристаллов лопарита образованы сочетаниями кубических и октаэдрических форм в разных вариациях. Размеры таких кристаллов находятся в интервале от 0.1 до 1.0 мм с преобладанием индивидов с размерами кристаллов от 0.3 до 0.8 мм. Минерал демонстрирует высокую степень сохранности кристаллографических форм, в редких случаях отмечаются незначительные сколы ребер.

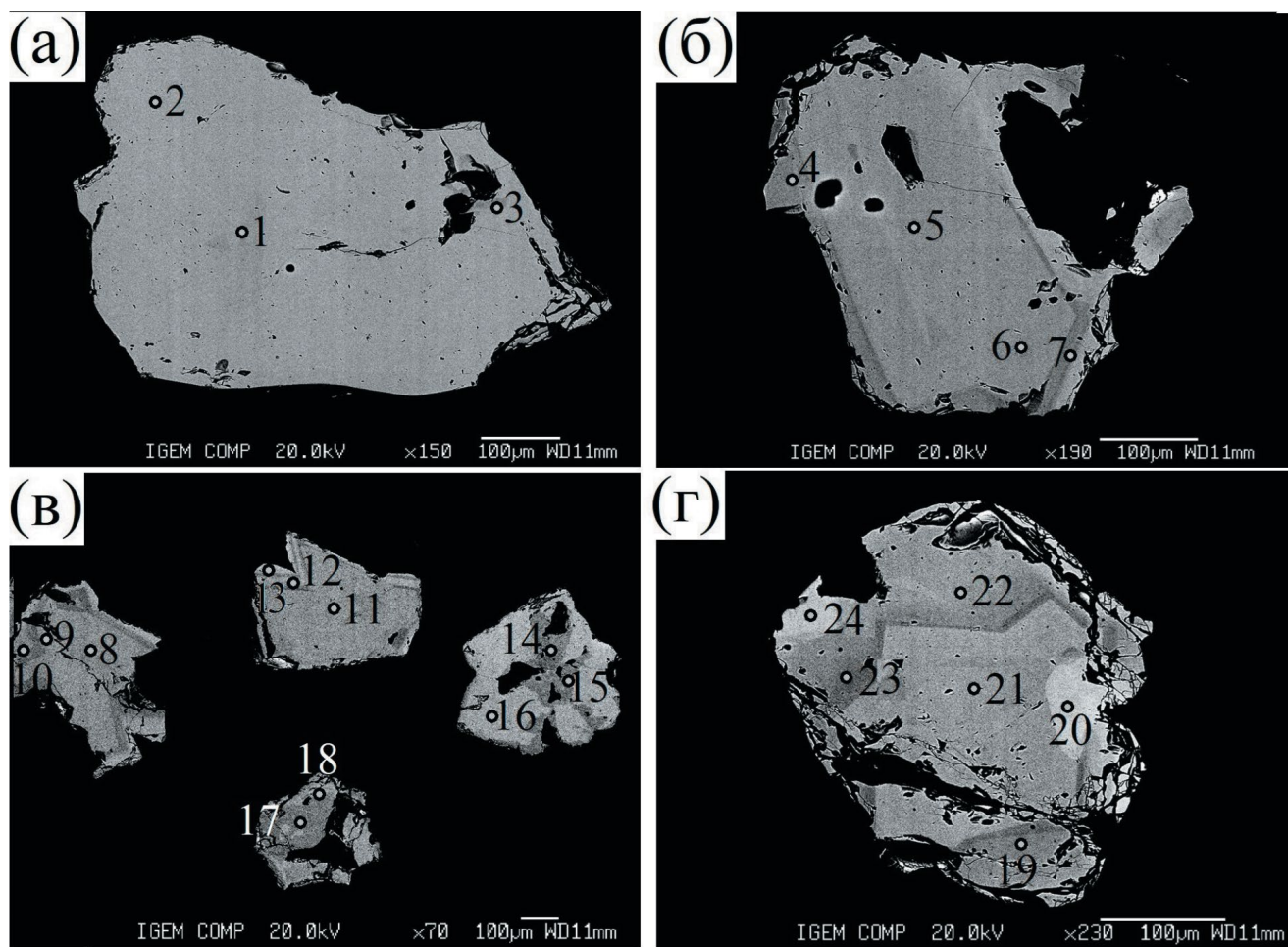
Около 30% кристаллов лопарита-1 имеют поверхностные корочки и примазки, образовавшихся при разрушении пород и сегрегированных в процессе становления россыпи (фиг. 5а, г, е). В ряде случаев наблюдаются корочки, практически полностью покрывающие зерно (фиг. 5д).

Минеральный состав этих образований был изучен с помощью сканирующего электронного микроскопа и методами оптической микроскопии с использованием бинокулярный микроскопа и иммерсионных препаратов. На энергодисперсионных спектрах (фиг. 6) иллюстрируется приблизительный химический состав в точке на поверхности примазок. Фигура 6а — спектр собственно поверхностной примазки, 6б — на спектре, кроме состава вторичных минералов примазки, отмечается захват основного минерала. Однако эти спектры дают суммарный состав в точке с захватом нескольких минеральных фаз, находящихся в тонких сростаниях, тем не менее на спектре можно выделить элементы, присущие каолиниту (Si, Al), гидрослюдам (Si, Al, Mg, K), а также по высокой интенсивности пика железа можно предположить присутствие гидроксидов железа. Для более точной диагностики этих сростаний были изготовлены иммерсионные препараты, и минеральные фазы определялись по оптическим свойствам. В результате этих определений было подтверждено присутствие вышеперечисленных минералов в составе поверхностных образований.

Во внутренней структуре зерен лопарита-1 наблюдается зональность (ширина зон варьирует от 20 до 100 мкм), выраженная изменением химического состава: более темные в BSE участки зерен содержат меньшее количество ниобия



Фиг. 6. Энерго-дисперсионные спектры примазок на зернах лопарита.



Фиг. 7. Внутреннее строение зерен лопарита-1 в россыпи по данным РСМА, цифры на рисунке соответствуют №№ анализов в Приложении 1. Изображение в отраженных электронах. Полированная шашка.

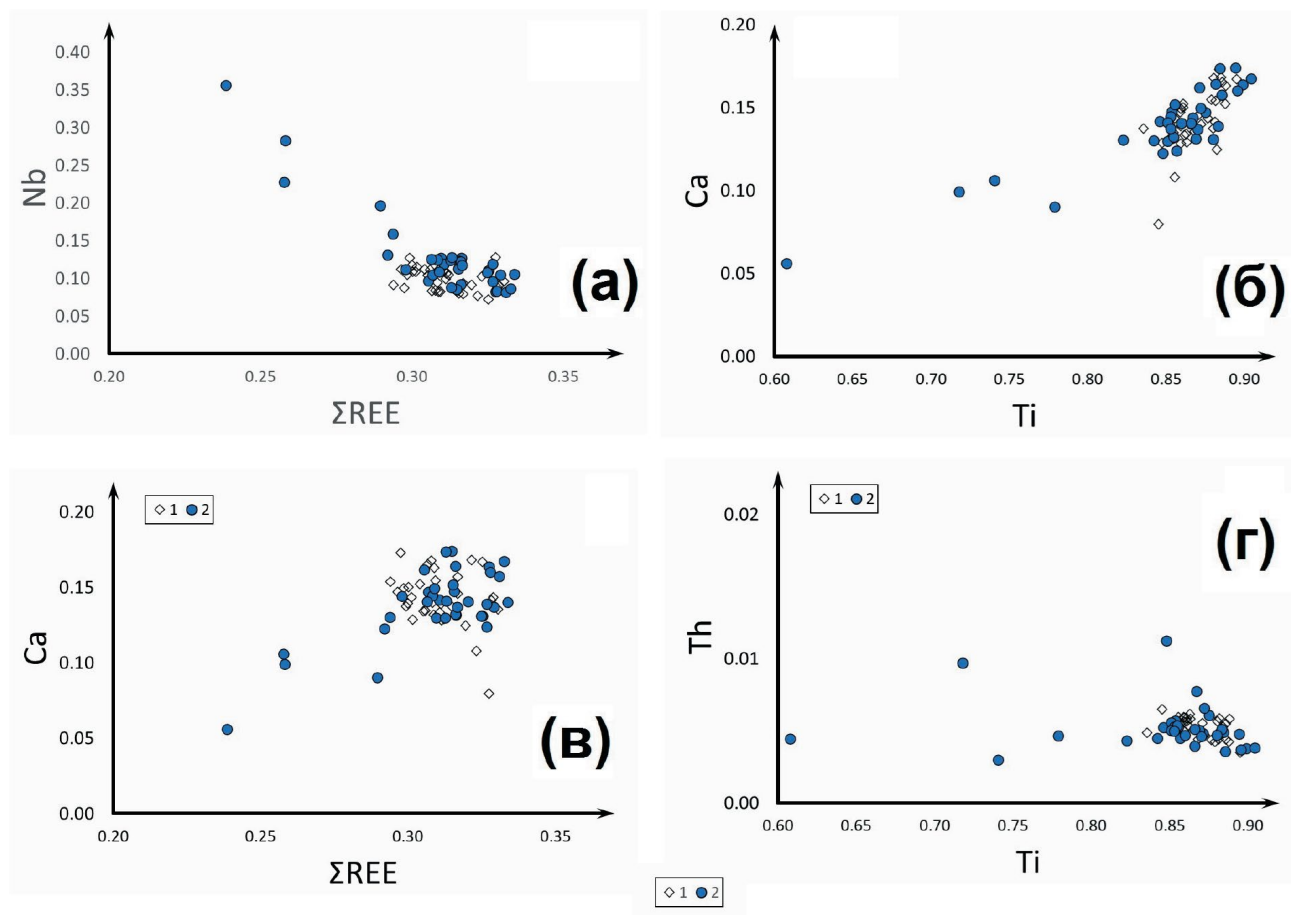


и стронция и, наоборот, светлые части обогащены этими элементами (фиг. 7, Приложение 1). Фигура 7а — зерно наиболее однородное, отмечаются только небольшие, более темные, участки в центре зерна, содержащие несколько меньшие количества Sr и Nb; фиг. 7б — зональное зерно, где по периферии кристалла образуется зона, обедненная тяжелыми элементами (темная кайма); фиг. 7в и г — кристаллы с концентрической зональностью — чередованием темных и светлых участков, располагающихся по кристаллографическим границам, причем в последнем случае видно наложение вторичной зональности (светлое пятно, в центре которого выполнен анализ, точка 20).

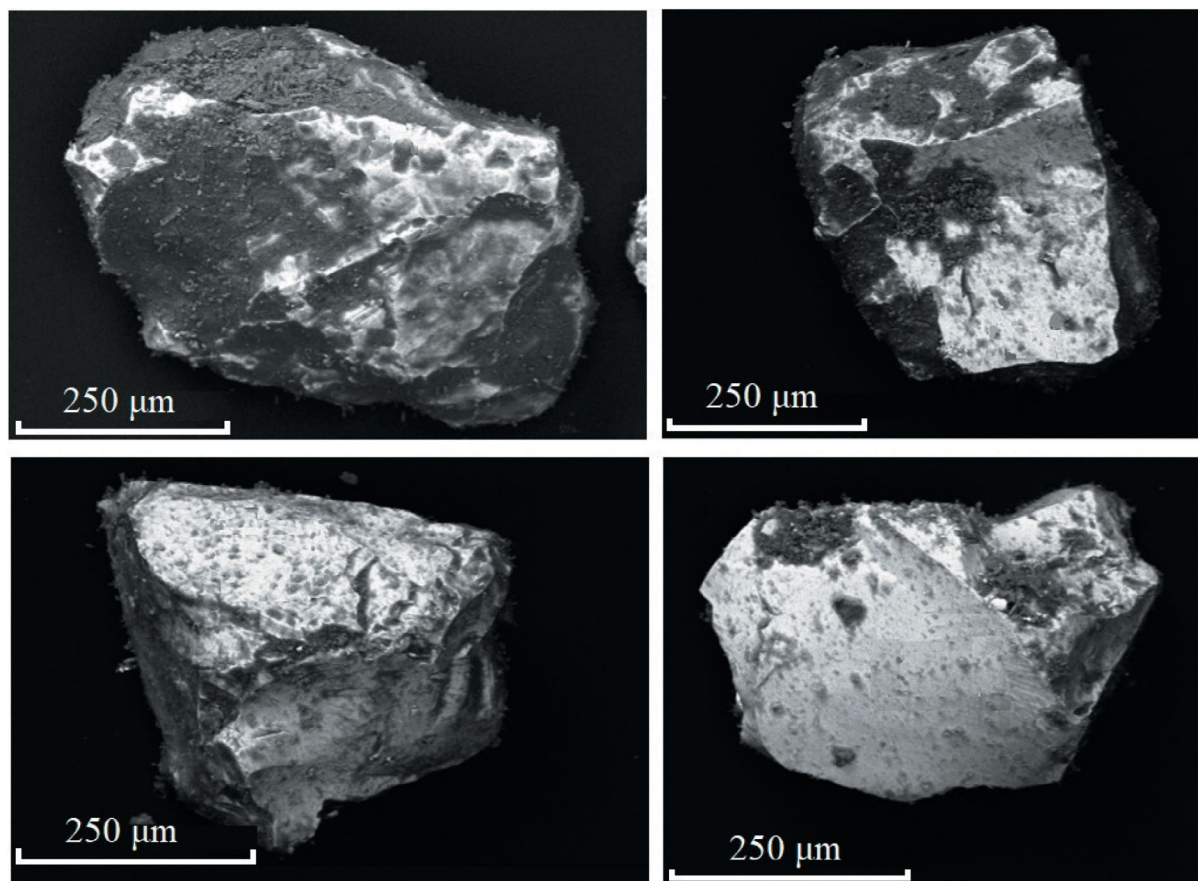
Содержание РЗЭ колеблется в интервале от 30.5 до 33.70 мас. % (среднее — 31.99 мас. %), из них содержание  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  — от 15.27 до 17.85 (среднее — 16.28 мас. %), что составляет более половины от общего содержания РЗЭ. Это дает возможность определить минерал как лопарит-(Ce). Содержание SrO — от 2.10 до 4.10 мас.%;  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  — от 5.88 до 10.28 мас. % (Приложение 1).

Представленные на фиг. 8 соотношения содержаний  $\Sigma\text{REE}$ , Ca, Ti и Nb отражают закономерности вариаций химического состава двух типов россыпного лопарита в отношении макроэлементов. Фигуративные точки лопарита-1 формируют единое компактное поле. Наблюдаемые зависимости между содержаниями Ca и Ti и между содержаниями Nb и REE, аналогичны вариациям этих компонентов в зональности отдельных кристаллов лопарита, отмечавшимся ранее (Mitchell, Chakhmouradian 1996; Kogarko et al., 2002).

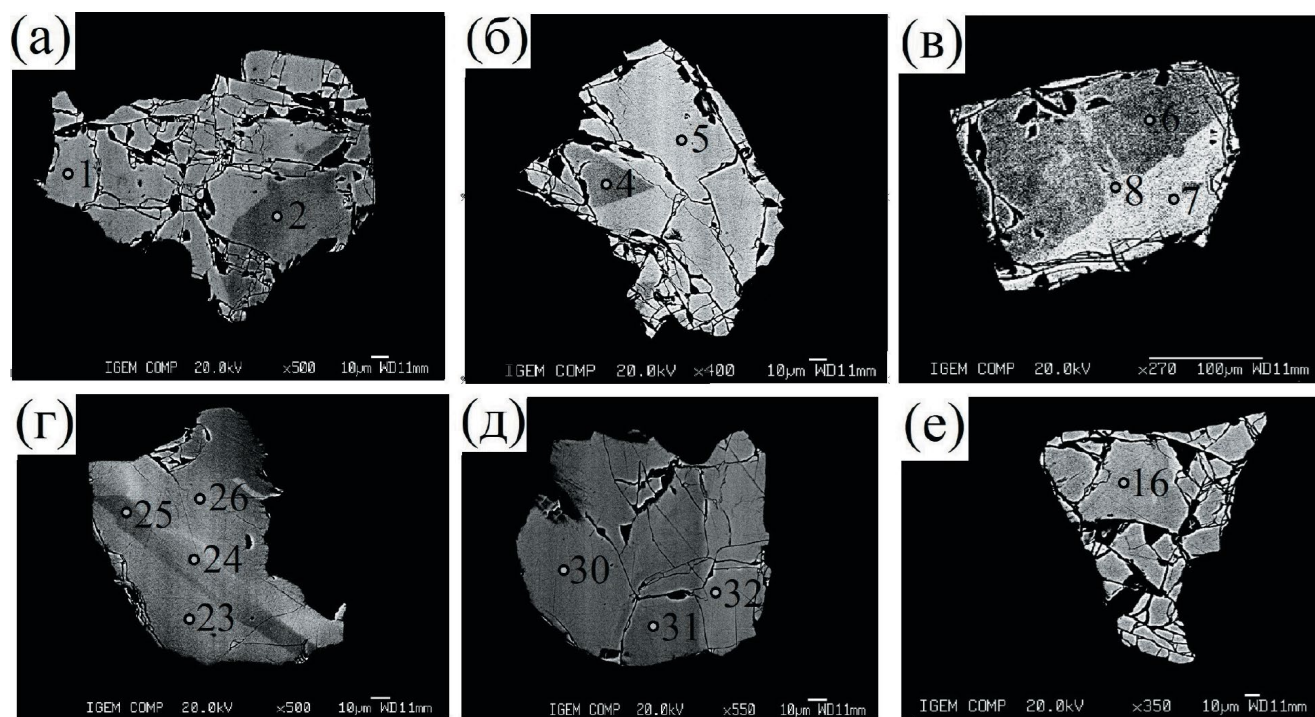
Лопарит-2 составляет около 40% свободных лопаритовых зерен. Он представлен в пробах в виде обломков неправильных форм, концентрируясь преимущественно в классах крупности менее 0.25 мм. Его зерна не обнаруживают кристаллографических форм и представлены обломками, которые обладают раковистым изломом и острыми краями (фиг. 9). Крошка и тонкие сколы лопарита-2 просвечивают коричневым. Поверхность неровная, местами гладкая, в ее углублениях обнаруживаются примазки тонкозернистого материала, аналогичного таковому на поверхности



Фиг. 8. Соотношения содержаний некоторых основных компонентов в лопарите, в формульных единицах. а — ниобий от суммы РЗМ, б — кальций от титана, в — кальций от суммы РЗМ, г — торий от титана. 1 — лопарит-1, 2 — лопарит-2.



Фиг. 9. Морфология зерен лопарита-2. Изображение в отраженных электронах.



Фиг. 10. Внутреннее строение лопарита-2. Изображение в отраженных электронах. Номера точек опробования соответствуют Приложению 2.

кристаллического лопарита-1, которые образовались в процессе формирования россыпи.

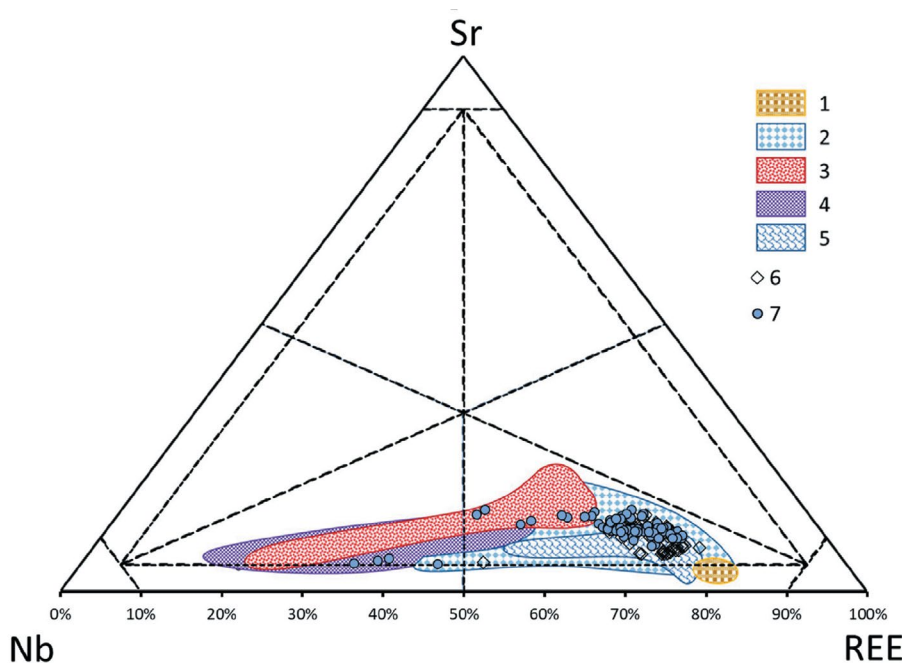
Внутреннее строение зерен лопарита-2 отличается сильной трещиноватостью и неоднородностью химического состава — неравномерным распределением оксидов редких земель, стронция и ниобия в виде очаговых, полосчатых неоднородных выделений (фиг. 10).

Содержание РЗЭ колеблется в интервале от 24.48 до 33.60 мас. % (среднее — 31.33 мас. %), из них содержание  $Ce_2O_3$  — от 14.00 до 17.84 (среднее — 16.61 мас. %), что составляет более половины от общего содержания РЗЭ, что дает возможность определить минерал как лопарит-(Ce). Содержание SrO — от 1.93 до 4.45 мас. %;  $Nb_2O_5$  — от 6.60 до 28.77 мас. %. Химический состав зерен лопарита-2 более неоднороден, чем лопарита-1: при близких средних значениях стандартное отклонение для лопарита-2 больше, чем в лопарите-1 по сумме редких земель — в 2 раза, по  $TiO_2$  — в 3, а по  $Nb_2O_5$  — в 4 раза (Приложение 2). На диаграммах (фиг. 8) видно, что большинство точек лопарита-2 группируются в одной области составов с точками лопарита-1, но есть несколько анализов лопарита-2, резко отличающихся. Такие “аномальные” лопариты содержат меньше редкоземельных

элементов и кальция и больше ниобия. Так, в точках 26 (фиг. 10г) и 32 (фиг. 10д) отмечается повышенное (в 2.5—4 раза) по сравнению с соседними точками содержание  $Nb_2O_5$ , при этом стронцием и торием эти точки могут быть как обогащены, так и обеднены.

В работах (Mitchell, Chakhmouradian, 1996; Chakhmouradian, Mitchell, 2002; Kogarko et al., 2002; Сук и др., 2012; Пахомовский и др., 2014; Михайлова и др., 2018) проанализирован состав лопарита из основных комплексов пород Ловозерского массива. На основании этих данных построена треугольная диаграмма  $Nb_2O_5$  — SrO — REE, на которую были вынесены поля составов лопарита из различных комплексов пород массива и нанесены (в виде отдельных точек) составы лопарита-1 и лопарита-2 из Сергеваньской россыпи (фиг. 11).

Эти поля составов лопарита из разных комплексов пород хотя и смещены друг относительно друга, но в некоторой мере перекрываются. Отдельные поля состоят из двух частей: находящегося в правой части диаграммы “тела”, вытянутого вдоль линии, идущей от правого нижнего (лопаритового) угла к центру треугольника, в которое попадает большинство анализов, и бедной анализами “щупальцы”, протягивающейся к левому (луешитовому) углу диаграммы. Таким образом, образуется два



**Фиг. 11.** Сравнительная диаграмма состава лопарита Сергеваньской россыпи и из коренных пород Ловозерского массива. Области составов лопарита из массива — обобщение наших и литературных данных (Сук и др., 2012; Chakhmouradian, Mitchell, 2002; Михайлова и др., 2018; Пахомовский и др., 2014; Mitchell, Chakhmouradian, 1996): 1 — пойкилитовые содалитовые и нозеановые сиениты; 2 — дифференцированный комплекс уртитов-фойитов-луявритов; 3 — комплекс эвдиалитовых луювритов; 4 — мурманитовые порфириовидные луювриты; 5 — пегматиты; 6, 7 — составы лопарита из россыпи: 6 — лопарит-1, 7 — лопарит-2.

тренда: первый, к которому принадлежит большинство лопаритов из коренных пород (пойкилитовых сиенитов, дифференцированного комплекса и эвдиалитовых луявритов). Большинство анализов лопарита из россыпи протягивается от поля пойкилитовых сиенитов к центру диаграммы таким образом, что лопарит эвдиалитовых луявритов отмечается пониженным содержанием  $REE_2O_3$  и относительно повышенным  $SrO$  и  $Nb_2O_5$ . Второй тренд загибается к Nb-углу, он включает поля лопарита из пегматитов, лопарита из затронутых процессами вторичного изменения пород дифференцированного комплекса и мурманитовых порфиридных луявритов. То есть этот тренд можно связать с действием поздне- и постмагматических процессов.

Анализ показывает, что как лопарит-1, так и лопарит-2 из россыпи в основном попадают в поле, перекрывающееся полем дифференцированного, реже — полем эвдиалитового комплекса, причем лопарит-2 имеет более широкие вариации состава и часть его фигуративных точек попадают в область тренда, протягивающегося к Nb-углу. Таким образом, лопарит в россыпи соответствует двум разновидностям лопарита, выявленным в пределах массива — идиоморфному (“кумулятивному”) и ксеноморфному интерстициальному (с учетом возможного дробления ксеноморфных зерен при дезинтеграции коренных пород и формировании россыпи), однако сделать конкретные выводы об идентификации источников из эвдиалитового

и дифференцированного комплексов на основании такой диаграммы оказывается невозможно.

### ОЦЕНКА ПРЕОБЛАДАЮЩЕГО ИСТОЧНИКА В ПРЕДЕЛАХ МАССИВА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ РОССЫПЕЙ

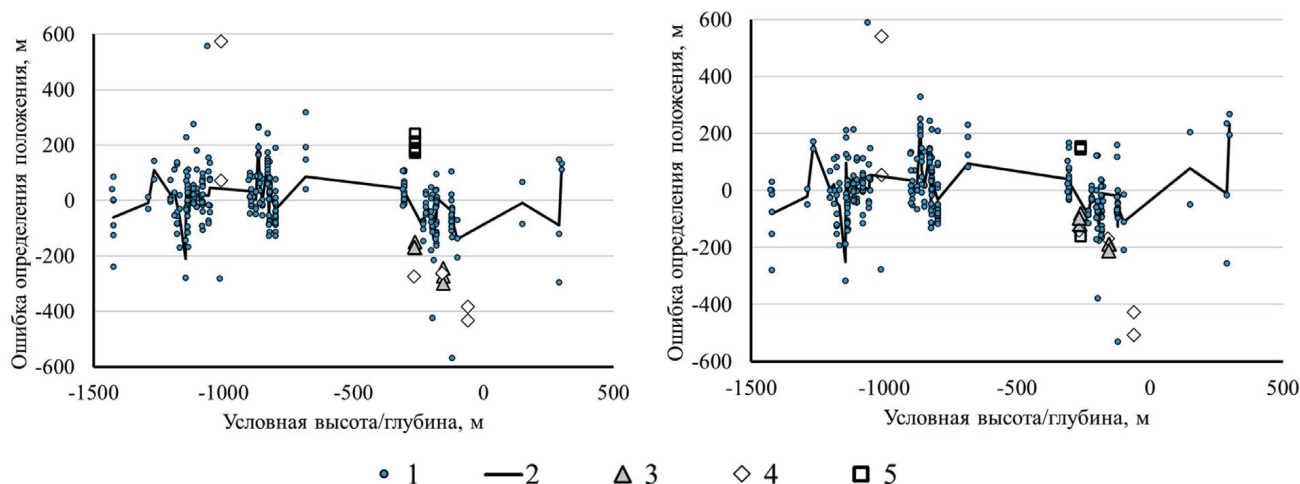
Для построения функции, позволяющей оценить положение лопарита в обобщенном вертикальном разрезе Ловозёрского массива (Герасимовский et al., 1966) по его составу, использован массив данных, любезно предоставленный Л.Н. Когарко, ранее использованный в работе (Kogarko et al., 2002).

Из этого массива были удалены “аномальные анализы”, фигуративные точки которых существенно отстоят от линий зависимости содержаний компонентов:  $Na_2O > 10\%$ ,  $FeO > 0.6\%$ ,  $Nb_2O_5 > 18\%$ ,  $ThO_2 > 1.5\%$ ,  $ThO_2 < 0.3\%$ , а также анализы, сумма которых  $< 98$  или  $> 101\%$ . Таким образом, была получена выборка из 293 анализов, принадлежащих 43 образцам. Анализы были приведены к 100%, затем были рассчитаны коэффициенты корреляции между содержаниями компонентов и высотой образца по обобщенному вертикальному разрезу (табл. 2). Поскольку графики содержаний стронция и ниобия в лопарите, приведенные в работе (Kogarko, 2021), демонстрируют нелинейное возрастание концентраций ниобия и стронция, использованы также логарифмы их концентраций.

На основании этих значений выбраны компоненты, содержание которых значимо на уровне 99%

**Таблица 2.** Коэффициенты корреляции между содержаниями компонентов и высотой образца по обобщенному вертикальному разрезу (298 анализов)

Компонент	R	Компонент	R
LREE <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0.89	Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0.04
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0.88	K <sub>2</sub> O	-0.02
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0.81	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0.01
FeO	-0.62	Na <sub>2</sub> O	0.13
TiO <sub>2</sub>	-0.49	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.21
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0.29	UO <sub>2</sub>	0.23
BaO	-0.25	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.65
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0.24	lg(Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	0.66
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0.20	ThO <sub>2</sub>	0.71
PbO	-0.11	SrO	0.93
CaO	-0.02	lg(SrO)	0.95



**Фиг. 12.** Распределение ошибок определения высоты в зависимости от истинного положения образца в разрезе Ловозерской интрузии по первой (а) и второй (б) формулам. 1 — по единичным анализам (Kogarko et al., 2002); 2 — усреднение по образцам; 3 — по (Пахомовский и др., 2014); 4 — новые данные по лопаритовому малиньиту; 5 — по (Михайлова и др., 2023)

коррелирует с гипсометрическим положением. Следует отметить, что зависимость между гипсометрической высотой образца и концентрациями ниобия и стронция в лопарите проявлена лучше, если эти содержания выражены в логарифмической форме.

С использованием надстройки статистического анализа MS Excel построены два уравнения для оценки положения образца в обобщенном вертикальном разрезе от контакта с эвдиалитовым комплексом ( $H^*$ ):

$$H^* = 917 - 20 \cdot \text{TiO}_2 - 66 \cdot \text{FeO} - 48 \cdot \text{REE}_2\text{O}_3 + 69 \cdot \lg(\text{Nb}_2\text{O}_5) + 269 \cdot \text{ThO}_2 + 1451 \cdot \lg(\text{SrO}), \quad (1)$$

$$H^* = 1863 - 28 \cdot \text{TiO}_2 - 63 \cdot \text{LREE}_2\text{O}_3 + 84 \cdot \lg(\text{Nb}_2\text{O}_5) + 1557 \cdot \lg(\text{SrO}), \quad (2)$$

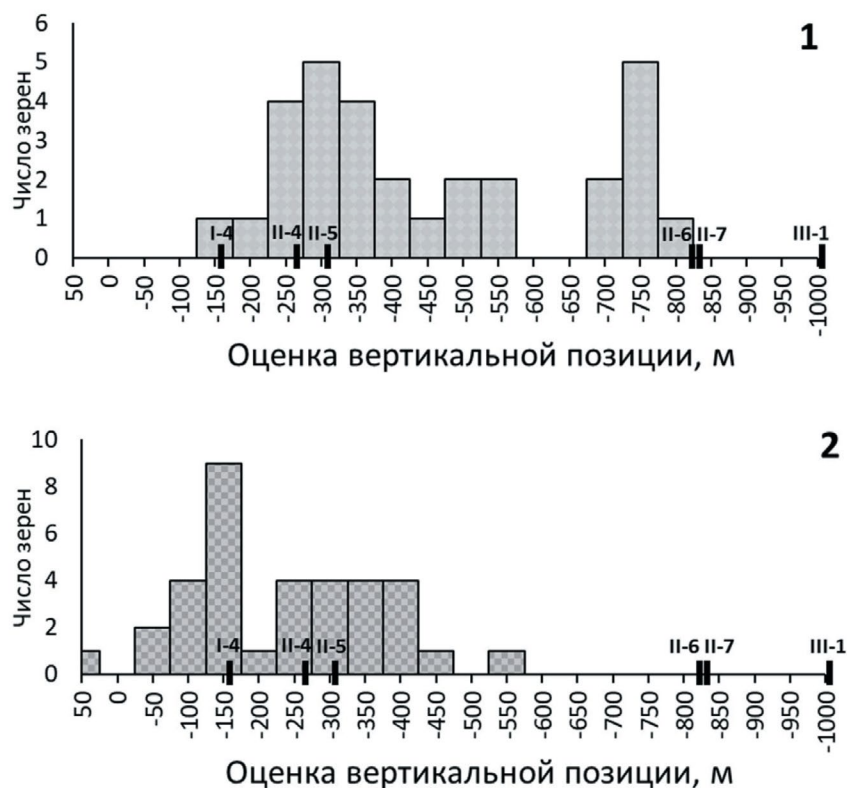
где  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{REE}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ,  $\text{ThO}_2$  и  $\text{SrO}$  — массовые проценты содержания соответствующих компонентов в анализе, нормированном к 100%, в LREE включены La, Ce, Pr и Nd<sup>8</sup>.

<sup>8</sup> Зависимость между составом кумулятивного минерала и положением образца породы в вертикальном разрезе определяется процессами внутрикамерного фракционирования расплава, который находился в равновесии с этим минералом в момент осаждения и был частично захвачен в межзерновое пространство при формировании осадка. Поскольку связь между составом расплава и степенью фракционирования нелинейна (см., напр., (Арискин и Бармина, 2000), полученные уравнения представляют только аппроксимацию зависимостей, их коэффициенты не несут геологического смысла.

Первое уравнение включает все элементы, содержания которых значимо коррелированы с положением в вертикальном разрезе, второе уравнение не включает элементы с низким содержанием, что, по нашему мнению, должно способствовать большей устойчивости получаемых оценок при использовании анализов, выполненных в разных лабораториях.

Сопоставление ошибок оценки, полученных с использованием двух уравнений, показало близкие результаты (фиг. 12). При использовании единичных анализов первое уравнение дает оценки высоты, отличающиеся от истинной в среднем на 76 м, а второе — на 80 м, при этом для первого уравнения 95%, а для второго 94% оценок отклоняются от истинного значения не более чем на 200 м, отклонение менее чем на 100 м фиксируется в 74 и 68% случаев соответственно. Усреднение результатов анализов в пределах образца приводит к уменьшению средней ошибки до 59 и 64 м соответственно.

Для проверки применимости функций к анализам, выполненным в других лабораториях, взяты средние составы лопарита из рудного, подстилающего и перекрывающего слоев, разрабатываемых Ловозерским ГОК, горизонтов I-4 и II-4 из работы (Пахомовский и др., 2014). Выполненные по первой формуле оценки высоты отличаются от истинных на 150—298 м (среднее 217), тогда как по второй — на 81—212 м (среднее 148), а также 6 анализов из работы (Михайлова и др., 2013), для которых эти различия составили в среднем 118 по первой формуле и 108 — по второй, и 4 анализа из рудного малиньита, выполненных в ИГЕМ РАН,



**Фиг. 13.** Распределение зерен лопарита из россыпи по оценке вертикальной позиции источника (высотные отметки уровней от границы с эвдиалитовым комплексом). 1 – лопарит-1, 2 – лопарит-2. Черные отметки на осях показывают положение маркирующих горизонтов.

для них среднее отклонение составило 164 и 73 м соответственно. Таким образом, первая функция, учитывающая больше компонентов, дает лучшие результаты только на анализах, выполненных в той же лаборатории, тогда как для анализов, выполненных в разных лабораториях, использование второй функции оказывается предпочтительным. Вторым выводом состоит в том, что нужно усреднять несколько анализов по одному образцу или кристаллу, но даже при этом реальная точность оценки составляет порядка 100 м.

По этой методике были рассчитаны оценки положения зерен лопарита-1 и лопарита-2, выделенных из россыпи. Были исключены анализы, сумма которых не попадала в диапазон 98–101%, анализы с высокими содержаниями натрия, железа и тория ( $\text{Na}_2\text{O} > 10\%$ ,  $\text{FeO} > 0.6\%$ ,  $\text{ThO}_2 > 1.5\%$ ), и с аномально-низкими содержаниями тория ( $\text{ThO}_2 < 0.3\%$ ), оставшиеся анализы были приведены к 100%. В качестве оценки вертикальной позиции источника для каждого из зерен принято как среднее арифметическое из величин  $H^*$ , рассчитанных по единичным анализам по формуле (2).

Полученные оценки показаны в ESM 1 и ESM 2. Полученные данные об уровнях поступления лопарита в россыпь представлены на фиг. 13.

Анализ полученных гистограмм распределения показывает, что хотя большинство зерен лопарита обоих типов происходит из горизонтов на 100–400 м ниже контакта с эвдиалитовым комплексом, но форма распределения существенно различается, что свидетельствует о множественности источников. Так, главный максимум распределения как лопарита-1, так и лопарита-2, может быть соотнесен с разрабатываемым “малиньтовым горизонтом” II-4, занимающим положение –265...–268 м и горизонтом II-5—310 м от контакта с эвдиалитовым комплексом (Герасимовский и др., 1966). Максимум 150 м, наблюдаемый для лопарита-2, можно соотнести с “уртитовым горизонтом” I-4, занимающим положение –156...–158 м по обобщенному разрезу, причем лопарита-1 с этого уровня мало. Зато для лопарита-1 наблюдается дополнительный максимум около –700...–800 м, который можно соотнести с нижними горизонтами второй серии

II-6 и II-7, находящихся на уровнях –825 и –835 м, ни один из которых не разрабатывается.

Зерна лопарита, высота для которых оценивается как 500–650 м, с этими горизонтами соотнесены быть уже не могут, следовательно, это рассеянный аксессуарный лопарит. Лопарита, который можно было бы соотнести с более низкими горизонтами, в россыпи не обнаружено. Почти нет и лопарита, который бы соотносился с эвдиалитовым комплексом, несмотря на то, что именно в этом районе в лопаритовом комплексе обнаружено промышленно значимое лопаритовое оруденение.

## ВЫВОДЫ

1. Лопаритовые россыпи северного обрамления Ловозерского массива тесно связаны с проявлениями коренной минерализации массива, что подтверждается наличием рудоносной гальки нефелиновых сиенитов, низкой окатанностью обломочного материала и близкими типоморфными особенностями лопарита из коренных пород и россыпей.

2. Лопарит является россыпеобразующим минералом и представлен двумя типами зерен, отличающихся друг от друга по морфологическим и химическим характеристикам. Лопарит-1 представляет собой высвобожденные из пород идиоморфные кристаллы, тогда как лопарит-2 представлен ксеноморфными зернами лопарита и их обломками.

3. Гипергенные изменения зерен лопарита в россыпи проявлены в частичном дроблении зерен и появлении на зернах плотных корочек, состоящих из агрегатов каолинита и гидрослюд с окислами железа.

4. Источником лопарита послужила верхняя часть дифференцированного комплекса, причем главная основная часть зерен может быть соотнесена с промышленно-рудоносными горизонтами, наряду с этим, значимый вклад дают и горизонты с не промышленной минерализацией и аксессуарно-рассеянный в породах дифференцированного комплекса лопарит.

5. Лопарит Сергеваньской россыпи присутствует в гравитационно обогатимых классах, содержит в своем составе высокие содержания РЗЭ, Sr и Nb + Ta и доступен для добычи открытым способом, что имеет важное промышленное значение для диверсификации сырьевых источников Ловозёрского ГОКа.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках гос. задания ИГЕМ РАН.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Арзамасцев А.А., Арзамасцева Л.В., Жирова А.М., Глазнев В.Н. Модель формирования Хибино-Ловозерского рудоносного вулканоплутонического комплекса // Геология рудн. месторождений. 2013. № 5. С. 397–414.
- Арзамасцев А.А., Арзамасцева Л.В., Травин А.В., Беляцкий Б.В., Шаматрина А.М., Антонов А.В., Ларионов А.Н., Родионов Н.В., Сергеев С.А. Длительность формирования полифазной магматической системы палеозойских щелочных комплексов центральной части Кольского полуострова: U-Pb, Rb-Sr, Ar-Ar данные // Докл. РАН. 2007. Т. 413. № 5. С. 666–670.
- Арискин А.А., Бармина Г.С. Моделирование фазовых равновесий при кристаллизации базальтовых магм. М.: Наука, 2000. 363 с.
- Буссен И.В., Сахаров А.С. Петрология Ловозерского щелочного массива. Л.: Наука, ЛО, 1972. 296 с.
- Буссен И.В., Сахаров А.С. Геология Ловозерских тундр. Л.: Наука, 1967. 144 с.
- Веселовский Н.Н., Сахаров А.С., Савченко Е.Э., Войтеховский Ю.Л. Зональность в распределении лопарита Ловозерского щелочного массива // Щелочной магматизм северо-восточной части Балтийского щита. Апатиты, изд. КНЦ АН СССР. 1990. С. 79–84.
- Герасимовский В.И., Волков В.П., Когарко Л.Н., Поляков А.И., Саприкина Т.В., Балашов Ю.А. Геохимия Ловозерского щелочного массива. М.: Наука, 1966. 392 с.
- Глазнев В.Н., Жирова А.М., Раевский А.Б. Новые данные о глубинном строении Хибинского и Ловозерского массивов, Кольский полуостров // Докл. РАН. 2008. Т. 422. № 3. С. 391–393.
- Евзеров В.Я. Роль древних кор выветривания в формировании антропогенных отложений и связанных с ними месторождений северо-восточной части Балтийского щита // Литология и полез. ископ. 1978. № 1. С. 50–58.
- Зартман Р.Э., Когарко Л.Н. Изотопный состав свинца апатитовых нефелиновых сиенитов и редкометалльных руд Ловозерского массива (Кольский полуостров, Россия) // Докл. РАН. 2014. Т. 454. № 1. С. 77. <https://doi.org/10.7868/S0869565214010241>
- Когарко Л.Н. Проблемы генезиса гигантских редкометалльных месторождений Кольского полуострова // Российская Арктика: геологическая история, минерагения, экология. СПб.: ВНИИОкеангеология, 2002. С. 773–787.
- Когарко Л.Н. Новый геохимический критерий редкометального оруденения гигантской Ловозерской интрузии (Кольский полуостров) // Докл. РАН. Геохимия. 2004. Т. 394. № 3. С. 377–379.
- Когарко Л.Н., Вильямс Т., Осокин Е.Д. Эволюция состава лопарита Ловозерского массива // Геохимия. 1996. № 4. С. 294–297.
- Когарко Л.Н., Крамм У., Грауэрт Б. Новые данные о возрасте и генезисе щелочных пород Ловозерского массива (изотопия рублидия и стронция) // Докл. АН СССР. 1983. Т. 268. № 4. С. 970–972.

- 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.
- 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., Зайцев В.А.* Минеральный состав редкометалльных россыпей Ловозерского массива // Геология рудн. месторождений. 2022. № 5. С. 485—497.
- Левченко Е.Н., Лаломов А.В., Григорьева А.В., Зайцев В.А.* Минералого-технологическое исследование лопаритовых россыпей Ловозерского массива // Обогащение руд. 2023. № 1. С. 29—37. <https://doi.org/10.17580/or.2023.01.05>
- Михайлова Ю.А., Малыгина А.В., Пахомовский Я.А., Базай А.В., Калашиников А.О.* Лопарит аллювиального участка Ловозерского эвдиалитового месторождения // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2018. № 15. С. 246—250.
- Пахомовский Я.А., Иванюк Г.Ю., Яковенчук В.Н.* Лопарит-(Ce) в породах ловозерского расслоенного комплекса гор Карнасурт и Кедыквырпахк // Записки РМО. 2014. Т. 143. № 1. С. 68—87.
- Пеков И.В.* Ловозерский массив: история исследования, пегматиты, минералы. М.: ТО “Земля”, 2001. 464 с.
- Пожиленко В.И., Гавриленко Б.В., Жиров Д.В., Жабин С.В.* Геология рудных районов Мурманской области. Апатиты: Изд. Кольского научного центра РАН, 2002. 359 с.
- Родионов Н.В., Лепехина Е.Н., Антонов А.В., Капитонов И.Н., Балашова Ю.С., Беляцкий Б.В., Арзамасцев А.А., Сергеев С.А.* U-Pb SHRIMP-II возраст титанита и время образования апатит-нефелиновой минерализации Хибинского и Ловозерского щелочных массивов (Кольский полуостров) // Геология и геофизика. 2018. Т. 59. № 8. С. 1195—1210.
- Семенов Е.И.* Минералогия Ловозерского щелочного массива. М.: Наука, 1972. 307 с.
- Сук Н.И., Котельников А.Р., Ковальский А.М.* Составы минералов лопаритсодержащих пород Ловозерского щелочного массива и физико-химические условия образования минеральных парагенезисов // Вестник КРАУНЦ. Науки о земле. 2012. № 1. Вып. 19. С. 41—58.
- Чефранов Р.М., Лаломов А.В., Чефранова А.В.* Поисково-ориентированная методика численного прогнозирования редкометалльных россыпей ближнего сноса на примере Ловозерского россыпного района // Геология руд. месторождений. 2023. № 2. С. 138—151. <https://doi.org/10.31857/S0016777023020016>
- Chakhmouradian A.R., Mitchell R.H.* New data on pyrochlore- and perovskite-group minerals from the Lovozero alkaline complex, Russia // Eur. J. Mineral. 2002. V. 14. P. 821—836.
- Kogarko L.N.* Geochemistry of Super-Large Deposits of Eastern Fennoscandia (Kola Peninsula) // Geochemistry International 2021. V. 59. Iss. 11. P. 1063—1076.
- Kogarko L.N., Williams C.T., Woolley A.R.* Chemical evolution and petrogenetic implications of loparite in the layered, agpaitic Lovozero complex, Kola peninsula, Russia // Mineralogy and Petrology. 2002. V. 74. P. 1—24.
- Kogarko L.N., Williams C.T., Woolley A.R.* Compositional evolution and cryptic variation in pyroxenes of the peralkaline Lovozero intrusion, Kola Peninsula, Russia // Mineral. Mag. 2006. V. 70(4). P. 347—359.
- Kogarko, L.N., Nielsen, T.F.D.* Compositional variation of eudialyte-group minerals from the Lovozero and Ilímaussaq complexes and on the origin of peralkaline systems // Minerals. 2021. V. 11. P. 548. <https://doi.org/10.3390/min11060548>
- Mikhailova J., Pakhomovsky Ya, Selivanova E., Kompanchenko A.* Polymineralic Inclusions in Loparite-(Ce) from the Lovozero Alkaline Massif (Kola Peninsula, Russia) // Hydrothermal Association in Miniature. Minerals. 2023. V. 13. P. 715. <https://doi.org/10.3390/min13060715>
- Mitchell R.H., Chakhmouradian A.R.* Composition variation of loparite from the Lovozero alkaline complex, Russia // The Canadian Mineralogist. 1996. V. 34. P. 977—990.
- Mitchell R.H., Wu F.Y., Yang Y.H.* In situ U-Pb, Sr and Nd isotopic analysis of loparite by LA-(MC)-ICP-MS // Chemical Geology. 2011. V. 280 (1—2). P. 191—199. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2010.11.008>
- Shubin I.I., Filina M.I., Kogarko L.N.* Evolution of Pyroxenes of the Lovozero Rare Metal Deposit (Lower Zone) // Geochemistry International. 2021. V. 59. № 1. P. 92—98.



## LOPARITE IN PLACERS OF THE LOVOZERO PLACER CLUSTER ON THE EXAMPLE OF THE SERGEVAN SITE

V. Grigorieva<sup>1,\*</sup>, A. V. Lalomov<sup>1,\*\*</sup>, V. A. Zaitsev<sup>2</sup>, D. A. Lalomov<sup>3</sup>,

A.V. Cefranova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences, Staromonetny lane, 35, Moscow, 119017 Russia*

<sup>2</sup> *Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of the Russian Academy of Sciences, Kosygin str., 19, Moscow, 119991 Russia*

<sup>3</sup> *LLC Geodevice Technologies, O. Bergholz Street, 36, St. Petersburg, 192148 Russia*

\*E-mail: grig357@mail.ru

Loparite is the main placer-forming mineral in placers located along the periphery of the Lovozero alkaline massif. The article presents new materials for the study of loparite from samples taken during field work at the Sergevan site of the Revda placer, located near the northern frame of the massif. The mineral was extracted from the heavy fraction of a technological sample weighing about 30 kg. The paper presents the results of a study of the morphology, features of the chemical composition and internal structure of loparite from placers, as well as its relationship with the bedrock of the massif. It was determined that loparite in the placer is represented by two types of grains: “loparite-1” – large (0.25–0.75 mm) twins of crystals of regular crystallographic forms; “loparite-2” – smaller (0.05–0.20 mm) fragments of irregular shape. The work studied the mineralogical features of each type of grains and revealed their relationship with the bedrock mineralization. The study of the typomorphic features of placer loparite makes it possible to develop an optimal technological scheme for the enrichment of placers to expand the rare metal resource base of Russia

*Keywords:* loparite, Lovozero massif, morphology, rare earth elements (REE), chemical composition, zoning, primary sources