

# Геохимическая характеристика магнезиокарбонатитов апатитоносного рудопроявления Муосталаах и месторождения фосфатов Бирикээн (Алданский щит, Ю. Якутия)\*

Ж. Д. Пономарев<sup>1,2</sup>, А. Г. Дорошкевич<sup>1,3,4</sup>,  
И. Р. Прокопьев<sup>1,2</sup>, Д. А. Чеботарев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева

Сибирского отделения Российской академии наук,

Российская Федерация, 630090, Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет,

Российская Федерация, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

<sup>3</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет,

Российская Федерация, 634050, Томск, пр. Ленина, 36

<sup>4</sup> Геологический институт Сибирского отделения Российской академии наук,

Российская Федерация, 670047, Улан-Удэ, Республика Бурятия, ул. Сахьяновой, 6а

**Для цитирования:** Пономарев, Ж. Д., Дорошкевич, А. Г., Прокопьев, И. Р., Чеботарев, Д. А. (2021). Геохимическая характеристика магнезиокарбонатитов апатитоносного рудопроявления Муосталаах и месторождения фосфатов Бирикээн (Алданский щит, Ю. Якутия). *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 66 (2), 349–373.  
<https://doi.org/10.21638/spbu07.2021.209>

Апатитоносное рудопоявление Муосталаах и месторождение фосфатов Бирикээн, располагающиеся на Алданском щите в пределах Нимнырской металлогенической зоны, представляют собой магнезиокарбонатитовые комплексы Селигдарского типа. В работе приведена геохимическая характеристика карбонатитов и ассоциирующих силикатных пород месторождения Бирикээн и рудопоявления Муосталаах, а также сравнение этих объектов с Селигдарским месторождением и магнезиокарбонатитовыми комплексами мира. На основании данных по содержаниям петрогенных компонентов карбонатитов Муосталааха и Бирикээн был сделан вывод, что эти породы относятся к магнезиокарбонатитам, сходным с магнезиокарбонатитами Селигдарского месторождения. Редкоземельные спектры магнезиокарбонатитов и апатитовых пород характеризуются обогащенностью LREE по отношению к HREE со средними отношениями La/Yb(cп), равными 45 и 100 для пород Муосталааха и Бирикээн соответственно. Большинство редкоземельных спектров находится в пределах поля магнезиокарбонатитов мира. Для мультиэлементных спектров карбонатитов и апатитовых пород наблюдаются отрицательные аномалии по Nb, Pb, Sr, Zr, Hf и Ti. Максимумы проявляются для Th и U, а также редкоземельных элементов. Имеет место сильный

\* Геохимические и изотопно-геохимические исследования магнезиокарбонатитов рудопоявления Муосталаах и месторождения Бирикээн выполнены за счет средств проекта РНФ № 19-17-00019, изучение силикатных пород осуществлялось за счет средств проекта НИР № 0330-2016-0002.

разброс значений Th, U, Zr и Hf. Мультиэлементные спектры карбонатитов Муосталааха и Бирикээна в целом схожи со спектрами других магнезиокарбонатитов, в том числе и с Селигдарскими. По результатам изотопных исследований систем Sm/Nd и Rb/Sr было сделано заключение, что первичные расплавы для карбонатитов Муосталааха и Бирикээна были образованы из долгоживущего обогащенного мантийного источника, отделившегося от деплетированной мантии в позднем архее.

*Ключевые слова:* магнезиокарбонатиты, Алданский щит, обогащенный источник, Sr-Nd-изотопная характеристика, редкоэлементный состав пород.

## 1. Введение и постановка проблемы

В последние десятилетия наблюдается возрастание потребностей разных отраслей промышленности в редких и редкоземельных элементах, что обуславливает необходимость увеличения минерально-сырьевой базы и изучения новых месторождений (Андреев, 2014). Апатитоносное рудопроявление Муосталаах и месторождение фосфатов Бирикээн, располагающиеся на Алданском щите (Ю. Якутия) в пределах Нимнырской металлогенической зоны, представляют собой магнезиокарбонатитовые комплексы Селигдарского типа и являются перспективными источниками редкоземельного, а также фосфатного сырья (Минаков и Лядин, 1976; Боярко, 2005).

До недавнего времени вопрос о генезисе апатит-доломитовых пород Селигдарского месторождения был спорным. В конце 1980-х гг. существовало несколько гипотез, касающихся их происхождения, среди которых наибольшей поддержкой и распространенностью пользовались две: седиментационно-метаморфогенная (Егин и др., 1975) и метасоматическая (Боярко, 1983) гипотезы. Идею о карбонатитовой природе Селигдарских апатитовых руд впервые выдвинул Ф. Л. Смирнов (Смирнов и Энтин, 1976), и впоследствии развили Энтин и др. (1991) и Зайцев и др. (1992). Однако изотопно-геохимические данные, полученные авторами, вошли в противоречие с их карбонатитовой гипотезой. Первичные изотопные отношения стронция и изотопный состав углерода в апатит-доломитовых породах Селигдарского месторождения имели значения, близкие к составу известняков (Зайцев и др., 1992). Это послужило причиной того, что карбонатитовая гипотеза не нашла поддержки среди экспертов по щелочному магматизму в то время.

Современные работы по петрологии апатит-доломитовых пород Селигдарского месторождения уверенно доказали их карбонатитовую природу (Prokoryev et al., 2017; 2018; Doroshkevich et al., 2018). Исследование расплавных включений продемонстрировало, что апатитовые руды Селигдарского месторождения были сформированы из насыщенной флюидами карбонатитовой магмы доломитового состава с присутствием небольшого количества щелочно-солевого и силикатного компонентов (Prokoryev et al., 2017). Возраст Селигдарских карбонатитов по U-Pb-датированию циркона составил  $1880 \pm 13$  млн лет (Prokoryev et al., 2017), что совпадает с настоящей информацией по геодинамике и магматизму Центрально-Алданского рудного региона Алдано-Станового щита (Смелов и др., 2001). Палеопротерозойские Селигдарские доломитовые карбонатиты подверглись интенсивному постмагматическому гидротермально-метасоматическому изменению и метамор-

физму, что отразилось в их минеральной и изотопной эволюции (Doroshkevich et al., 2018). Геохимические данные показывают, что Селигдарские карбонатиты были образованы из обогащенного мантийного источника, который отделился от деплетированной мантии в архее на рубеже 2700–2500 млн лет (Doroshkevich et al., 2018). Доказательство карбонатитового генезиса Селигдарских пород может быть с высокой долей уверенности экстраполировано на породы Бирикээна и Муосталааха, учитывая схожесть этих геологических комплексов с Селигдарским месторождением (см. раздел 5).

На данный момент не была проведена комплексная и прецизионная геохимическая и изотопная характеристика магнезиокарбонатитов Бирикээна и Муосталааха. Рассчитанный Энтином и др. (1989) возраст первичного апатитового оруденения Бирикээна по данным рубидий-стронциевого датирования флогопита составил 1764 млн лет. Однако данная датировка является спорной, так как вследствие значительных гидротермальных и метаморфических преобразований пород Бирикээна имело место изменение изотопного состава стронция (см. раздел 5.2).

В настоящей статье приведены данные по содержаниям и распределению петрогенных и редких компонентов магнезиокарбонатитов и ассоциирующих силикатных пород Муосталааха и Бирикээна. Представлены результаты по исследованию изотопных систем Sm/Nd и Rb/Sr, а также охарактеризован источник вещества магнезиокарбонатитов. В работе также проведено сравнение геохимических характеристик карбонатитов рудопроявления Муосталаах и месторождения Бирикээна с таковыми характеристиками пород Селигдарского месторождения, а также магнезиокарбонатитовыми комплексами мира. Геохимические и изотопные данные по магнезиокарбонатитам Бирикээна и Муосталааха позволят охарактеризовать конкретный механизм образования данных пород. Помимо этого, полученные результаты могут быть использованы при непосредственной промышленной эксплуатации этих месторождений.

## 2. Геологическая изученность

### 2.1. Нимнырская металлогеническая зона

Начиная с 1973 г. до начала 1990-х гг. производственной геологической организацией ГУГПП РС (Я) «Якутскгеология» проводились комплексные разведочные, поисковые, поисково-ревизионные и геолого-съёмочные работы, направленные на обнаружение и описание апатитоносных геологических объектов в пределах Центрально-Алданского и сопредельных с ним рудных районах Алданского щита (Боярко и Сучков, 1989). В результате этих работ была выделена субмеридианальная апатитоносная Нимнырская металлогеническая зона, которая включает в себя более двадцати геологических комплексов апатит-содержащих пород различного генезиса и характеризуется представительным Селигдарским месторождением. Исследуемые в данной работе геологические комплексы Селигдарского типа — апатитоносное рудопроявление Муосталаах и месторождение фосфатов Бирикээна также являются частью Нимнырской металлогенической зоны.

Нимнырская металлогеническая зона простирается примерно на 400 км в длину с севера на юг (рис. 1). Она ограничена Хардагаской депрессией и преиму-

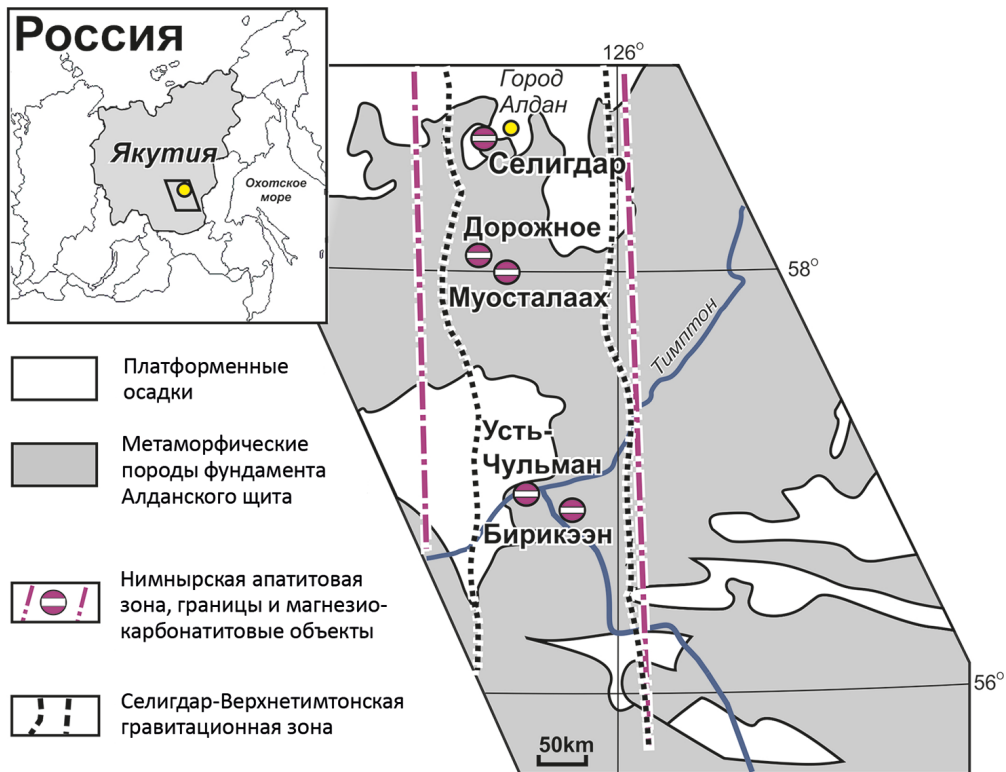


Рис. 1. Расположение апатитоносных магнизокарбонатитовых комплексов Нимнырской металлогенической зоны в пределах Алданского щита. На основе материалов (Энтин и Тянь, 1984; Хомич и Борискина, 2010)

щественно субмеридианальной региональной системой разломов (Энтин и Тянь, 1984), образованной при палеопротерозойском (2200–1800 млн лет) внутриплитном рифтогенезе (Гладкочуб и др., 2012). Помимо этого, Нимнырская металлогеническая зона перекрывается Селигдар-Верхнетимптонской гравитационной аномалией (Хомич и Борискина, 2010). Согласно глубинному сейсмическому зондированию, Селигдар-Верхнетимптонская гравитационная аномальная зона характеризуется тонкой (до 36–38 км) и низкоплотной корой и разделяет Учурский и Западноалданский блоки (с максимальной толщиной коры 42 и 46 км соответственно) внутри Байкал-Алдан-Станового мегаблока (Хомич и Борискина, 2010).

Кристаллический фундамент в пределах Центрально-Алданского рудного региона содержит тела изверженных пород, метаморфизованных в различной степени. Архейские и раннепротерозойские гнейсы представлены амфиболовыми, биотит-амфиболовыми, диопсид-амфиболовыми, двупироксен-амфиболовыми и графитсодержащими разновидностями, а также содержат линзы и пласты кальцифиров и карбонатных пород. Породы Центрального Алдана подверглись позднепалеопротерозойскому региональному метаморфизму эпидот-амфиболитовой и амфиболитовой фаций. Затем последовал этап низкотемпературного ретроградного метаморфизма. Осадки Сибирской платформы, перекрывающие

докембрийские гнейсы, состоят из кембрийских осадочных пород, которые представлены преимущественно песчаниками, известняками и конгломератами (Смелов и др., 2001).

## 2.2. Апатитоносное рудопроявление Муосталаах

Апатитовое рудопроявление Муосталаах расположено на водоразделе одноименного ручья — правого притока р. Хардагас, который, в свою очередь, является притоком р. Большой Нимныр (правый приток р. Алдан). В районе участка была выполнена геологическая съемка масштаба 1:50 000 (Кострыкина и др., 1963; 1964), в ходе которой были обнаружены апатит-доломитовые породы. В 1975 г. рудопроявление Муосталаах исследовалось В. С. Минаковым (Минаков и Лядин, 1976).

В геологическом строении апатитового проявления Муосталаах принимают участие архейские граниты и гранито-гнейсы, раннепротерозойские апатит-доломитовые карбонатиты и четвертичные отложения (рис. 2).

Гранито-гнейсы слагают большую часть площади и представлены аляскиновыми, диопсидовыми, реже биотитовыми и амфиболовыми разновидностями гранитов с реликтами биотитовых, биотит-роговообманковых, роговообманково-диопсидовых и диопсидовых гнейсов, а также диопсидовых пород. Граниты, не содержащие реликтов, отмечаются в виде полосы северо-западного простирания, проходящей через весь участок.

Апатитоносные магнезиокарбонатиты располагаются в виде крупноглыбовых развалов (размер глыб достигает 3–5 м<sup>3</sup>) на водоразделе ручья Муосталаах и его левого безымянного притока. Их свалы прослеживаются при ширине 150–250 м на расстояние 750–800 м в субширотном направлении. С юга они сменяются аляскиновыми гранитами, а в остальных направлениях перекрываются торфяно-болотистыми отложениями, среди которых отмечаются единичные находки

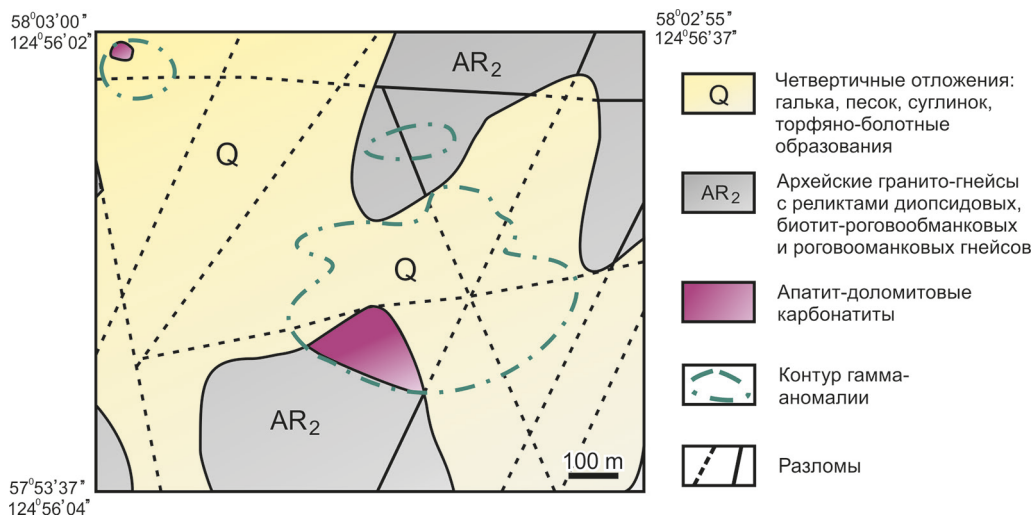


Рис. 2. Схематическая геологическая карта апатитового рудопроявления Муосталаах. По материалам ГУГГП РС (Я) «Якутскгеология», модифицированным по (Энтин и Тянь, 1984)

апатита на расстоянии до 1 км от центра развалов магнезиокарбонатитов. Контур свалов руд в незаболоченной части повторяется гамма-аномалией (Минаков и Лядин, 1976). Тело апатит-доломитовых пород было вскрыто при проведении буровых работ, показавших их минимальную мощность 180 м. На юге отмечен их четкий контакт с аляскистыми гранитами субширотного простирания (Минаков и Лядин, 1976).

Помимо апатитоносных магнезиокарбонатитов на территории рудопроявления Муосталаах были найдены пространственно ассоциирующие апатит-содержащие силикатные скаполит-клинопироксеновые породы, геохимические особенности которых также будут описаны в рамках данной статьи.

По результатам датирования пород рудопроявления Муосталаах U-Pb-методом SHRIMP-II были получены датировки  $1906 \pm 6$  млн лет и  $1930 \pm 7$  млн лет для магнезиокарбонатитов и скаполит-клинопироксеновых пород соответственно (Prokoryev et al., 2019).

### *2.3. Месторождение фосфатов Бирикээн*

Месторождение фосфатов Бирикээн расположено в бассейне одноименного ручья (правого притока р. Тимптон) и его притока (Правого Бирикээна) в Нерюнгринском улусе Республики Саха-Якутия (30 км к северо-востоку от г. Нерюнгри). Данное месторождение было обнаружено при поисковых работах на уран, организованных ПГО «Приленскгеология». Последующие геологоразведочные работы были проведены ФГУП «Алдангеология» (Боярко и Сучков, 1990).

Основное рудное тело месторождения сложено породами фосфатоносной карбонат-фторапатитовой кайнозойской коры выветривания, которые были образованы в результате гипергенного преобразования нижележащих апатит-доломитовых карбонатитов раннепротерозойского возраста. Вмещающие толщи представлены метаморфическими образованиями: гнейсами и кристаллосланцами, реже кальцифирами, относящимися к федоровской свите раннего архея (Боярко, 1997). Вмещающие метаморфические породы насыщены инъекциями позднеархейско-раннепротерозойских гранитоидов, переходящих в сплошные поля. Рудное тело апатитоносных магнезиокарбонатитов локализовано в зоне тектонического нарушения северо-западного простирания, имеющей ширину от 300 м до 1.8 км и протяженность свыше 10 км (рис. 3). На северо-западном фланге апатитоносное тело перекрывается горизонтально залегающими юрскими континентальными осадками (песчаниками). Мощность разреза площадной коры выветривания составляет от 30 до 210 м, а в зонах разрывных нарушений — до 250 м и более. В пределах месторождения была выделена обогащенная фосфатами ленточная залежь общей протяженностью 9.2 км и шириной от 150 до 620 м. Ее верхняя кромка ограничена дневной поверхностью, а нижняя — глубиной распространения коры выветривания. Мощность самой фосфатоносной залежи по данным бурения составляет от 77 до 196 м, достигая в отдельных пересечениях 225 м (Боярко, 2005).

Помимо описанных выше магнезиокарбонатитов и продуктов их выветривания на территории Бирикээнского месторождения также были обнаружены пространственно ассоциирующие силикатные апатит-содержащие скаполит-клино-



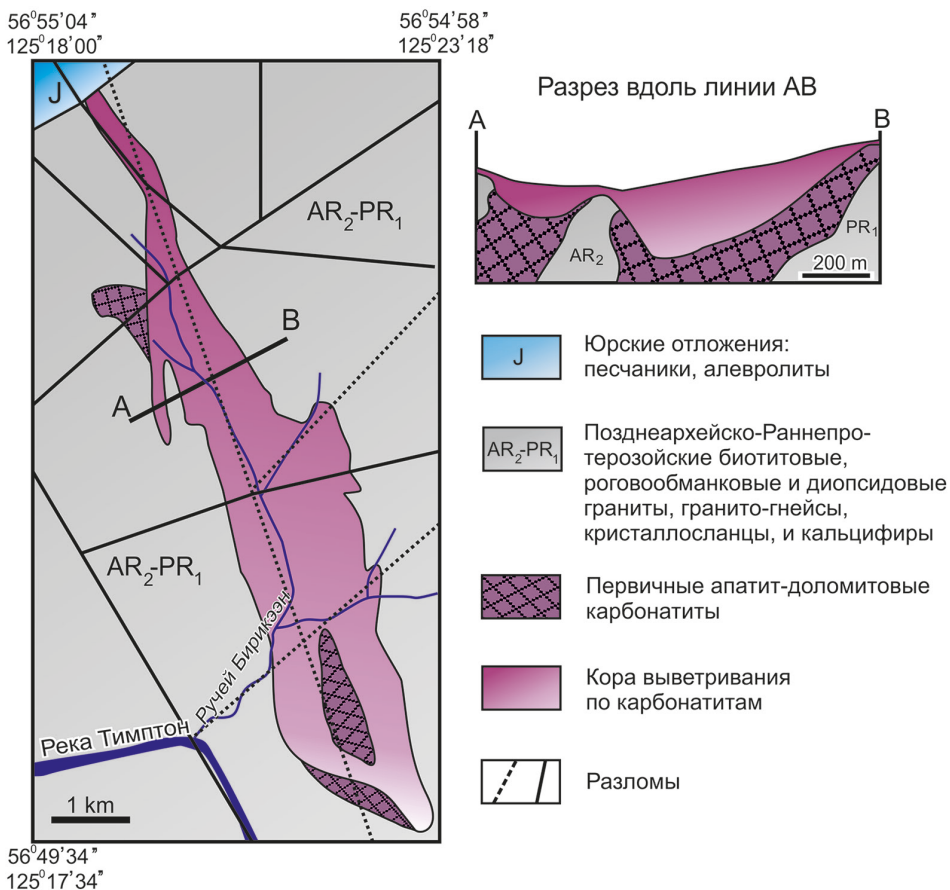


Рис. 3. Схематическая геологическая карта и разрез через апатит-доломитовое рудное тело Бирикээнского месторождения фосфатов. По материалам (Боярко, 2005)

пироксеновые породы, подобные указанным ранее для рудопроявления Муосталаах.

### 3. Минералого-петрографическая характеристика

#### 3.1. Магнезиокарбонатиты

Подробное минералого-петрографическое исследование магнезиокарбонатитов Бирикээн и Муосталааха было проведено в работе (Прокопьев et al., 2019). Исследуемые карбонатиты представляют собой средне-крупнозернистые породы с преимущественно сериальной структурой. Первичные магматические породообразующие минералы представлены доломитом (мелкозернистый матрикс, 75–80 об.%) и фторапатитом (гипидиоморфные вкрапленники, 5–15 об.%). К числу второстепенных и аксессуарных минералов относятся магнетит, титанит, циркон и бадделейт. Монацит-(Ce), гематит, кальцит, кварц, барит, ангидрит, торит, рутил-(Nb), сидерит, карбонаты и гидрокарбонаты REE — (анкилит-(Ce)?), а также такие

сульфиды, как пирит, халькопирит, антимонит, буланжерит и борнит, являются продуктами поздней гидротермальной минерализации. Гипергенные минералы представлены оксидами и гидроксидами Fe и Mn. Кора выветривания месторождения Бирикээн состоит преимущественно из карбонат-фторапатита. Метаморфическая минеральная ассоциация включает в себя хлорит, мусковит, амфибол, эпидот и тальк. Для магнезиокарбонатитов Муосталааха и Бирикээна характерно наличие редкоземельной минерализации. Концентрация легких лантаноидов, таких как La, Ce, Pr и Nd, происходит во фторапатите и монаците-(Ce).

Минеральный состав доломитовых карбонатитов Муосталааха и Бирикээна в целом соответствует минеральному составу месторождений Селигдар и Усть-Чульман (Prokoryev et al., 2017; 2018) и отражает особенности минералогии магнезиокарбонатитов Центрально-Алданской провинции.

### **3.2. Скаполит-клинопироксеновые породы**

В пределах рудопроявления Муосталаах и на месторождении Бирикээн наблюдаются схожие между собой по петрографическим характеристикам и минеральному составу скаполит-клинопироксеновые субщелочные основные породы, смежные с описанными выше карбонатитами (Prokoryev et al., 2019).

Главными породообразующими минералами данных пород являются клинопироксен и скаполит. Последний, вероятно, развивался по первичному плагиоклазу. Клинопироксен и скаполит составляют приблизительно 80% от всего объема пород в различных пропорциях. Апатит является повсеместным типичным второстепенным минералом и занимает порядка 10% от общего объема породы. Среди прочих минералов в различных количествах встречаются альбит, амфибол, калиевый полевой шпат, эпидот, титанит, ильменит, торит, циркон, барит, кальцит, хлорит и кварц. Скаполит-клинопироксеновые породы характеризуются средне-крупнозернистой аллотриоморфной структурой и высокой степенью преобразования вторичными процессами, а также деформированностью (Prokoryev et al., 2019).

Подобно магнезиокарбонатитам, в скаполит-клинопироксеновых породах Муосталааха и Бирикээна установлены повышенные содержания редкоземельных элементов, концентраторами которых являются алланит-(Ce) и фторапатит, содержащие до 23.73 и 1.59 мас. % суммы оксидов  $Ce_2O_3$ ,  $La_2O_3$ ,  $Pr_2O_3$  и  $Nd_2O_3$  соответственно (Prokoryev et al., 2019).

## **4. Методы исследований**

Содержание петрогенных компонентов магнезиокарбонатитов и скаполит-клинопироксеновых пород Муосталааха и Бирикээна было определено на основе рентгенофлуоресцентного анализа в ИГМ СО РАН с использованием рентгенофлуоресцентного спектрометра ARL 9900XP (Termo Fisher Scientific). Всего было исследовано 8 образцов: 6 магнезиокарбонатитов и 2 скаполит-клинопироксеновые породы. Анализы были проведены на 15 компонентов:  $Na_2O$ ,  $MgO$ ,  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $P_2O_5$ ,  $SO_3$ ,  $K_2O$ ,  $CaO$ ,  $TiO_2$ ,  $V_2O_5$ ,  $Cr_2O_3$ ,  $MnO$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $NiO$ ,  $BaO$ , и потери при прокаливании по третьему классу точности с нижними границами определяемых содержаний 0.1 составили 0.00n %.



Содержания редких элементов были определены в Центре коллективного пользования ИГМ СО РАН методом ICP-MS на масс-спектрометре высокого разрешения ELEMENT (Finnigan Mat) с ультразвуковым распылителем U-5000AT+. Пределы обнаружения редкоземельных и высокозарядных элементов составляют от 0.005 до 0.1 мкг/г, точность анализа — в среднем 2–7 отн. %. Было проанализировано 11 образцов: 6 магнезиокарбонатитов, 2 скаполит-клинопироксеновые породы, а также 2 мономинеральные апатитовые породы и карбонат-фторапатит.

Изотопный состав Nd и Sr в магнезиокарбонатитах месторождения Бирикээн и рудопроявления Муосталаах был измерен с использованием многоканального термоионизационного масс-спектрометра Finnigan MAT 262 (RPQ) в статическом режиме по методике, описанной Т. Б. Баяновой (2004) в Геологическом институте Кольского научного центра (Апатиты, Россия). Было проанализировано 6 образцов: 4 магнезиокарбонатита, мономинеральная апатитовая порода и карбонат-фторапатит. Холодное внутрилабораторное загрязнение составило 0.05 нг для Rb, 0.2 нг для Sr, 0.06 нг для Sm и 0.3 нг для Nd. Точность определения концентраций Sm и Nd  $\pm 0.2\%$  ( $2\sigma$ ), Rb и Sr  $\pm 0.5\%$  ( $2\sigma$ ). Результаты анализа стандартного образца BCR-1 (5 измерений): [Sr] = 336.7 мкг/г, [Rb] = 47.46 мкг/г, [Sm] = 6.47 мкг/г, [Nd] = 28.13 мкг/г,  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr} = 0.4062$ ,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.705036 \pm 22$ ,  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0.1380$ ,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512642 \pm 14$ . За период измерений Sr полученное значение  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  в стандарте SRM-987 соответствовало  $0.710241 \pm 15$  ( $2\sigma$ , 10 измерений). Измеренные отношения  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  нормализованы к  $^{148}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.251578$ , что соответствует отношению  $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ , и приведены к  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.511860$  в Nd стандарте La Jolla. Качество измерений контролировалось изотопными стандартами, за период исследования средневзвешенные значения отношения  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  по стандарту La Jolla (15 измерений) составили  $0.511833 \pm 15$  ( $2\sigma$ ). Одностадийный модельный возраст  $T_{\text{Nd}}(\text{DM})$  рассчитан относительно деплетированной мантии (DM) ( $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0.2136$  и  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.51315$ ), величины  $\epsilon_{\text{Nd}}$  определены относительно CHUR ( $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0.1967$ ,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512638$ ) (Sun and McDonough, 1989).

## 5. Геохимическая характеристика

### 5.1. Геохимия петрогенных и рассеянных элементов

Содержания основных петрогенных компонентов магнезиокарбонатитов и скаполит-клинопироксеновых пород рудопроявления Муосталаах и месторождения Бирикээн представлены в табл. 1. В табл. 2 приведены содержания редких элементов по магнезиокарбонатитам и скаполит-клинопироксеновым породам рудопроявления Муосталаах; для месторождения Бирикээн приведены данные по магнезиокарбонатитам, мономинеральным апатитовым породам, карбонат-фторапатиту и скаполит-клинопироксеновым породам.

Согласно схеме классификации, предложенной в работе (Woolley and Kempe, 1989), фигуративные точки составов относительно «свежих» карбонатитов рудопроявления Муосталаах и месторождения Бирикээн располагаются в поле магнезиокарбонатитов. Большинство точек составов ложатся в поле магнезиокарбонатитов Селигдарского месторождения (рис. 4). Переходные к коре выветривания

Таблица 1. Концентрации петрогенных компонентов в карбонатах и скаполит-клинопироксеновых породах Муосталаах и Бирикээн (мас. %)

	Муосталаах				Бирикээн			
	Карбонаты		Ср-Срх породы		Карбонаты		Ср-Срх породы	
	14/156	14/143	14/156.5	Му-4-2	Бир2в-17	Бир5-17	Бир9-17	Бир6-17
SiO <sub>2</sub>	1.51	11.54	11.89	49.37	1.30	2.47	1.08	46.48
TiO <sub>2</sub>	0.01	0.02	0.01	0.10	0.02	0.02	0.01	0.56
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.44	0.60	1.03	13.98	0.39	0.50	0.23	13.60
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.42	1.45	1.80	4.86	0.50	1.16	0.30	5.52
MnO	0.92	0.46	0.54	0.21	0.32	0.26	0.09	0.13
MgO	19.82	17.91	16.95	6.32	13.80	19.32	0.40	10.98
CaO	29.61	26.27	27.73	18.12	38.49	30.78	55.03	11.04
Na <sub>2</sub> O	< 0.05	< 0.05	< 0.05	1.94	< 0.05	< 0.05	< 0.05	0.47
K <sub>2</sub> O	0.05	0.07	0.03	1.41	0.02	0.02	0.02	2.84
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.04	0.03	2.45	0.36	1.85	0.74	0.15	2.25
BaO	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.21	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.32
SO <sub>3</sub>	< 0.05	< 0.05	0.25	0.59	0.11	0.04	0.16	0.35
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.02
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
NiO	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
LOI	46.32	41.21	36.43	2.31	42.89	44.16	42.92	4.66
Total	100.15	99.55	99.11	99.79	99.70	99.48	100.38	99.24

породы месторождения Бирикээн, представляющие собой практически мономинеральные апатитовые обособления с подчиненным количеством карбонат-фторapatита, характеризуются преобладанием CaO над MgO и FeOtot. Однако ввиду практически полного отсутствия карбонатов в этих породах классифицировать их с помощью вышеуказанной схемы не представляется возможным. Тем не менее следует учитывать их генетическую связь с первичными магнезиокарбонатами.

Нормализованные на хондрит REE-спектры магнезиокарбонатитов рудопроявления Муосталаах и месторождения Бирикээн имеют схожую конфигурацию (рис. 5), однако содержание REE в карбонатитах Муосталааха меньше, чем в таковых из Бирикээна. Наибольшие содержания REE наблюдаются в мономинеральных апатитовых породах месторождения Бирикээн. REE-спектры скаполит-клинопироксеновых (Scp-Cpx) пород практически идентичны карбонатитам. Для всех образцов характерна обогащенность LREE (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd) по отношению к HREE (Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) со средними отношениями La/Yb(cп) (нормализованными на хондрит), равными 45 и 100 для магнезиокарбонатитов Муосталааха и Бирикээна соответственно. В области LREE наблюдается плавное снижение содержаний от La к Nd, затем следует более резкая регрессия от Nd к Yb, в области HREE спектры выполаживаются.

На рис. 6 представлены мультиэлементные спектры магнезиокарбонатитов и скаполит-клинопироксеновых (Scp-Cpx) пород рудопроявления Муосталаах, а также спектры магнезиокарбонатитов, скаполит-клинопироксеновых пород, апатитовых пород и карбонат-фторapatита месторождения Бирикээн. Как видно из графика, спектры различных карбонатитов и апатитовых пород по большей части имеют схожую конфигурацию, однако прослеживается заметный разброс содержаний редких элементов для различных образцов. В частности, наблюдается заметная вариация содержаний таких подвижных элементов, как Th и U. Для концентраций Zr и Hf также характерна сильная вариативность.

Как и в случае REE, наибольшие концентрации высокозарядных элементов наблюдаются в мономинеральных апатитовых породах месторождения Бирикээн. Для подавляющего числа спектров прослеживаются отрицательные аномалии по Nb, Pb, Sr, Zr, Hf и Ti. Максимумы проявляются для Th и U, а также редкоземельных элементов: La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu и HREE.

Для спектров скаполит-клинопироксеновых пород характерна обогащенность крупноионными литофильными элементами, в случае Бирикээнских пород прослеживается отчетливая обогащенность Nb и Ta, а также Zr, Hf и Ti по сравнению с карбонатитами. По содержаниям REE и отрицательной аномалии по Sr скаполит-клинопироксеновые породы схожи с карбонатитами и апатитовыми породами. Следует отметить, что спектры скаполит-клинопироксеновых пород Муосталааха имеют схожую конфигурацию со спектрами карбонатитов и мономинеральных апатитовых пород.

На диаграммах спектров REE и мультиэлементной диаграмме (рис. 5, 6) нанесены поля первичных магнезиокарбонатитов из таких магматических комплексов, как Тамазерт, Морокко (Mourtada et al., 1997), Шава и Дорова, Зимбабве (Harmer and Gittins, 1998), Неваниа, Индия (Viladkar, 1998), Спитскоп, ЮАР (Harmer, 1999), Веселое и Пограничное, Россия (Doroshkevich et al., 2007a; 2007b), Уэкасско Лэйк

Таблица 2. Содержание редких элементов (ppm)

	Муосталаах				Биржээн						Са-Ғ-Ар
	Карбонагиты		Ср-Срх поро́ды	Карбонагиты			Ср-Срх поро́ды	Мономинеральные Ар поро́ды			
	14/156	14/143		14/156.5	Му-4-2	Бир5в-17		Бир5-17	Бир9-17	Бир6-17	
Ti	12.1	11.8	16.1	532	60	79	< 10	3632	68	23	43
V	1.85	6.5	23	42	16.7	20	11.7	125	76	77	23
Cr	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	3.8	< 3	4.9	3.5	< 3	3.4
Mn	5282	3798	4210	1828	2492	2154	830	1161	2025	61	111
Co	0.93	1.18	1.97	7.30	0.86	1.15	0.25	10.6	3.3	0.72	0.43
Ni	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3
Cu	11.3	5	8.6	5.5	11.7	15	12.5	7.5	9.4	< 5	8.5
Zn	25	5.3	6.5	124	6.6	6.6	6.9	91	61	5.9	5.5
Rb	0.85	0.69	0.76	63	< 0.5	0.72	< 0.5	113	1.15	< 0.5	0.92
Sr	24	23	85	441	135	74	457	388	360	877	355
Y	17.8	21	69	8.2	18.8	20	24	29	62	194	1.52
Zr	2.6	1.21	14.4	42	4.4	100	0.64	750	6.1	15.3	1.43
Nb	0.97	0.14	0.32	2.6	0.65	0.22	0.11	42	2.5	0.9	0.57
Mo	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	0.7	< 0.5	< 0.5
Cs	< 0.1	< 0.1	< 0.1	1.63	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0.54	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Ba	3.7	4.1	6.3	1582	21	11.7	54	2402	305	69	255
La	27	93	388	50	229	134	410	140	651	1269	6

Ce	43	187	732	96	466	306	814	357	1200	2997	17
Pr	5.2	20	87	10.9	61	39	84	49	148	375	1.53
Nd	18	72	290	38	221	144	278	192	508	1409	5.6
Sm	3.2	10.3	40	5.1	27	19.6	29	28	60	210	0.82
Eu	0.66	2	6.7	0.8	5.3	3.9	5.2	5.2	11.9	39	0.14
Gd	2.9	7.3	29	3.5	15.3	11.6	16.4	16.8	37	130	0.51
Tb	0.43	0.75	2.7	0.38	1.27	1.02	1.37	1.67	3.2	12.3	0.05
Dy	2.2	3.2	11.6	1.69	4	4	4.9	6.3	11.8	45	0.27
Ho	0.43	0.59	2	0.3	0.65	0.59	0.83	0.99	1.9	6.8	0.05
Er	1.16	1.69	5.3	0.78	1.59	1.67	2.3	2.6	5.1	16.8	0.13
Tm	0.16	0.24	0.65	0.12	0.20	0.23	0.35	0.35	0.72	1.8	0.02
Yb	0.99	1.34	3.8	0.88	1.14	1.4	2.3	2.2	4.6	10	0.13
Lu	0.15	0.21	0.54	0.12	0.18	0.21	0.33	0.3	0.63	1.3	0.02
Hf	0.08	0.05	0.18	1.65	0.08	1.22	<0.05	12.8	0.18	0.19	0.05
Ta	0.09	<0.05	<0.05	0.15	0.06	0.06	0.06	7.5	0.12	0.18	0.09
Pb	3.7	<1	8.5	9.7	2.3	2.5	4.2	12.1	14.7	11.6	1.38
Th	0.81	0.24	71	8.9	13.9	16.3	2.2	68	70	318	0.95
U	0.36	0.33	7.5	1.37	1.65	3.1	1.02	5.3	95	18.6	68

*Примечание.* Приведены данные по карбонатитам и скаполит-клинопироксеновым породам Муосталаха, а также по карбонатитам, мономинеральным апатитовым породам, скаполит-клинопироксеновым породам и карбонат-фторапатиту (Ca-F-Ар) из месторождения Бирикээн.

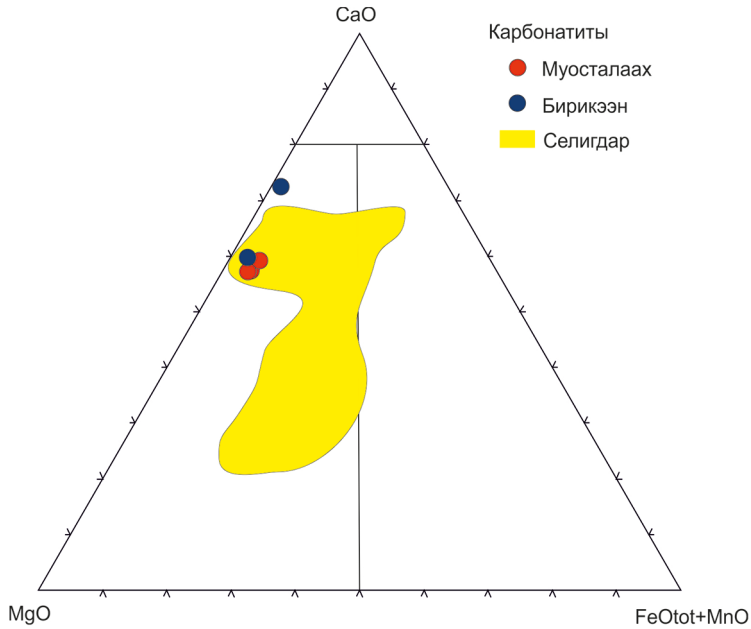


Рис. 4. Классификация карбонатов рудопроявления Муосталаах и месторождения Бирикээн с использованием тройной диаграммы компонентов CaO-MgO-FeOtot + MnO (масс.%) согласно международной классификации, предложенной в (Woolley and Kempe, 1989). Диаграмма разделена на три поля, соответствующих кальциокарбонатам, магниокарбонатам и феррокарбонатам. Поле Селигдарских карбонатов нанесено на основе данных из работы (Doroshkevich et al., 2018)

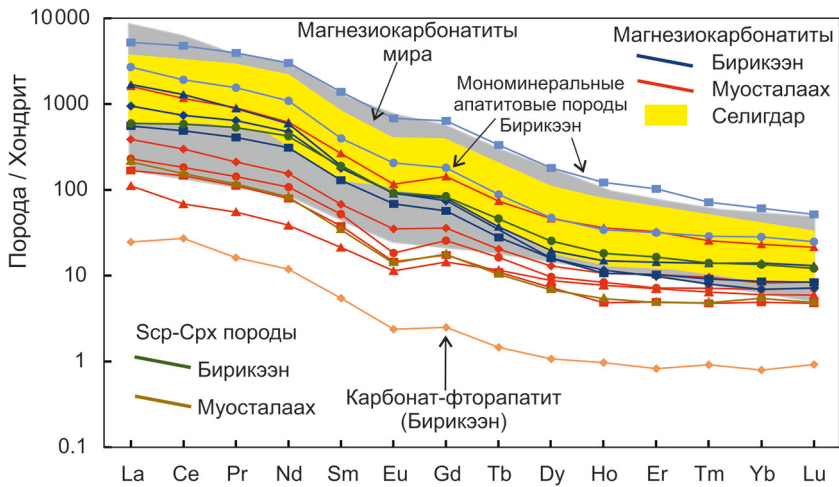


Рис. 5. Нормированные на хондрит содержания REE пород рудопроявления Муосталаах и месторождения Бирикээн. Нормировочные значения хондрита взяты из (Sun and McDonough, 1989). Отображены стандартное поле магниокарбонатов из работ (Mourtada et al., 1997; Harmer and Gittins, 1998; Viladkar, 1998; Harmer, 1999; Doroshkevich et al., 2007a; 2007b; Agashev et al., 2008; Chakhmouradian et al., 2009) и поле Селигдарских карбонатов из (Doroshkevich et al., 2018)



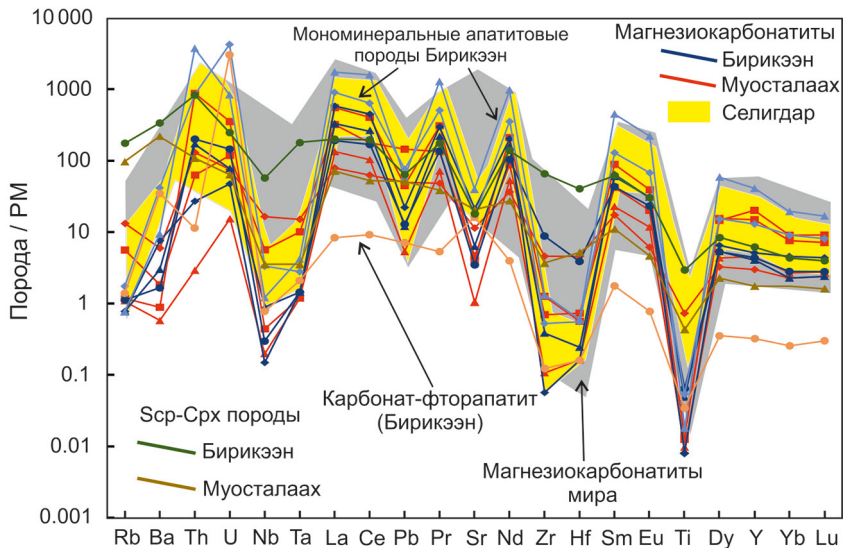


Рис. 6. Нормированные на примитивную мантию содержания редких элементов пород рудопроявления Муосталаах и месторождения Бирикээн. Нормировочные значения примитивной мантии взяты из (Sun and McDonough, 1989). Отображены стандартное поле магнезиокарбонатов из (Mourtada et al., 1997; Harmer and Gittins, 1998; Viladkar, 1998; Harmer, 1999; Doroshkevich et al., 2007a; 2007b; Agashev et al., 2008; Chakhmouradian et al., 2009) и поле Селигдарских карбонатов из (Doroshkevich et al., 2018)

(Chakhmouradian et al., 2009) и Снэйп Лэйк, Канада (Agashev et al., 2008); помимо этого также показано поле Селигдарских магнезиокарбонатов (Doroshkevich et al., 2018).

Большинство спектров REE карбонатов рудопроявления Муосталаах и месторождения Бирикээн находятся в пределах поля магнезиокарбонатов. Однако имеет место значительный разброс содержаний REE для разных образцов вследствие вариаций количества апатита, что наглядно видно при их сравнении с полем карбонатов Селигдара. Мультиэлементные спектры карбонатов Муосталааха и Бирикээн схожи со спектрами других магнезиокарбонатов, в том числе с Селигдарскими.

## 5.2. Источники вещества магнезиокарбонатов рудопроявления Муосталаах и месторождения Бирикээн

Численные характеристики изотопного состава Sr и Nd магнезиокарбонатов Муосталааха и Бирикээна приведены в табл. 3. Расчеты проводились с использованием абсолютного возраста 1906 млн лет, полученного по U-Pb-датированию карбонатов Муосталааха. Эта датировка была экстраполирована на породы Бирикээна вследствие их схожести с рудопроявлением Муосталаах (см. раздел 1).

Начальные отношения  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(i)}$ , рассчитанные на возраст 1906 млн лет, характеризуются широкой вариацией значений. На рис. 7 изображен график в координатах  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(i)} - 1/\text{Sr}$ , из которого виден заметный дисбаланс изотопного со-

Таблица 3. Изотопный состав Sr и Nd магнизиокарбонатов Муосталаах и Бирикээнэ

Порода	Возраст (млн лет)	Rb (ppm)	Sr (ppm)	$^{87}\text{Rb}/$ $^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/$ $^{86}\text{Sr}$	$\pm 2\sigma$	I (Sr)	$\epsilon_{\text{Sr}}(\text{T})$	Sm (ppm)	Nd (ppm)	$^{147}\text{Sm}/$ $^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/$ $^{144}\text{Nd}$	$\pm 2\sigma$	$\epsilon_{\text{Nd}}(0)$	$\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T})$	T(DM)
Карбонатит (Муосталаах)	1906	0.4	30.2	0.03423	0.7084	5	0.707457	73.97	120.2	914.2	0.07951	0.51073	2	-37.24	-8.61	2736
	1906	0.5	11.5	0.12674	0.71066	8	0.707182	70.08	31.7	232	0.08252	0.51078	3	-36.28	-8.39	2742
Карбонатит (Бирикээн)	1906	0.1	52.9	0.00563	0.70873	5	0.708571	89.83	84.6	676.6	0.07554	0.51082	4	-35.5	-5.89	2561
	1906	0.3	42.5	0.02149	0.71094	7	0.710351	115.18	61.9	433.5	0.08629	0.51086	3	-34.76	-7.78	2731
Мономин. Ар порода (Бирикээн)	1906	0.4	127.1	0.01023	0.70707	5	0.706784	64.39	183.1	1614.8	0.06853	0.51068	3	-38.18	-6.85	2581
	1906	1.6	400.3	0.01123	0.70816	6	0.707853	79.6	598	4186.6	0.08635	0.5109	3	-33.92	-6.95	2681

Примечание. Также приведены данные для мономинеральной апатитовой породы и карбонат-фторапатиту (СаF-Ар) месторождения Бирикээн.

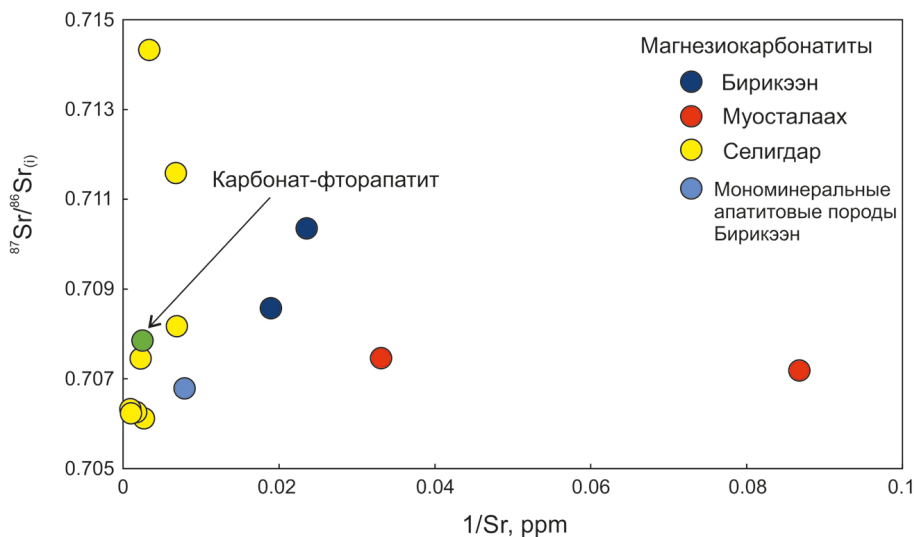


Рис. 7. Вариация значений  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(i)}$  в зависимости от содержаний Sr (ppm) в магниокарбонатах рудопроявления Муосталаах и месторождения Бирикээн. Желтым цветом показаны значения для Селигдарских карбонатов (Doroshkevich et al., 2018)

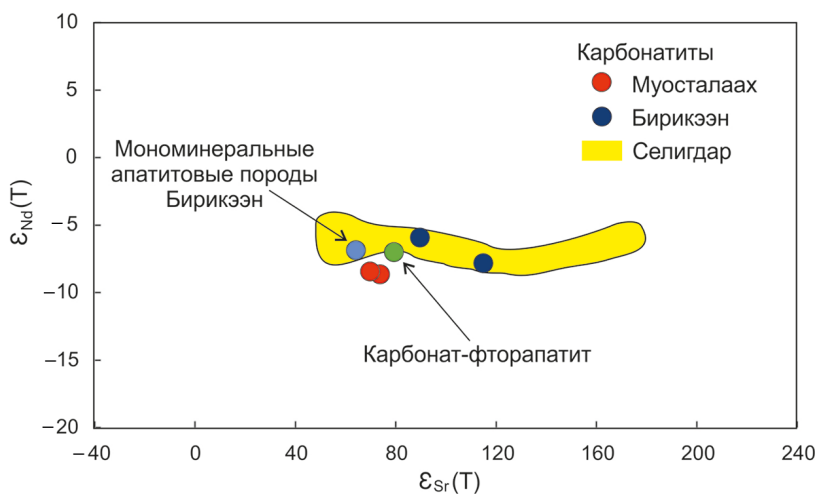


Рис. 8. Изотопный состав Nd и Sr магниокарбонатов рудопроявления Муосталаах и месторождения Бирикээн в координатах  $\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T})$ - $\epsilon_{\text{Sr}}(\text{T})$ . Желтым цветом обозначено поле Селигдарских карбонатов (Doroshkevich et al., 2018)

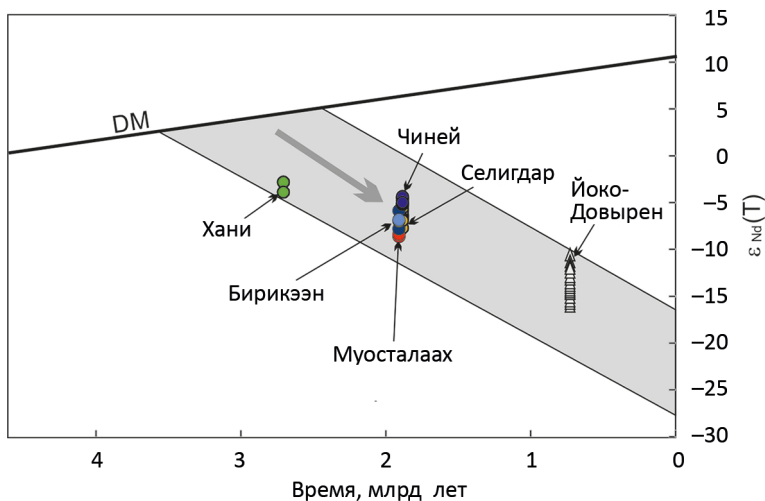


Рис. 9. Эволюция изотопного состава Nd магнезиокарбонатитов рудопроявления Муосталаах и месторождения Бирикээн. Также показаны данные по изотопному составу карбонатитов Селигдарского месторождения (Doroshkevich et al., 2018), лампроитов Хани (Владыкин и др., 2005), габброидов массива Чиней (Гонгальский и др., 2008) и пород Йоко-Довыренской расщелинной интрузии (Арискин и др., 2015). Обобщенный тренд эволюции изотопного состава перечисленных пород показан стрелкой внутри серого поля, построенного по крайним точкам комплексов Хани и Йоко-Довырен

става Sr. Значения  $\epsilon_{Nd}(t)$  имеют более узкий диапазон (рис. 8). На рис. 9 продемонстрирована эволюция значений  $\epsilon_{Nd}(t)$  во времени для карбонатитов рудопроявления Муосталаах и месторождения Бирикээн. Согласно расчетам модельного возраста, источник вещества исследуемых пород отделился от деплетированной мантии в позднем архее. В частности, для магнезиокарбонатитов месторождения Бирикээн модельный возраст составил 2500–2700 млн лет; карбонатиты рудопроявления Муосталаах характеризуются меньшим разбросом значений:  $T_{Nd}(DM) \approx 2700$  млн лет.

## 6. Обсуждение результатов

Сопоставление геохимических данных по распределению редкоземельных и редких элементов магнезиокарбонатитов Муосталааха и Бирикээна показало, что исследуемые породы имеют конфигурацию редкоземельных и мультиэлементных спектров, схожую с таковой для магнезиокарбонатитов мира и Селигдарского месторождения в частности.

Широкая вариация изотопного состава Sr может быть объяснена интенсивным воздействием постмагматических процессов на первичные магнезиокарбонатиты Бирикээна и Муосталааха. Отрицательные значения  $\epsilon_{Nd}(t)$  свидетельствует об обогащенной природе источника вещества.

Динамика изменения значений  $\epsilon_{Nd}(t)$  для карбонатитов Муосталааха и Бирикээна продемонстрировала практически аналогичный процесс изотопной эволю-

ции источника вещества, что и для Селигдарского месторождения (Doroshkevich et al., 2018). Схожий тип изотопной эволюции Nd имеют магматические комплексы Алданского щита, такие как палеопротерозойская габбровая расслоенная интрузия Чиней (Гонгальский и др., 2008), неоархейский лампроитовый комплекс Хани (Владыкин и др., 2005) и неопротерозойский Йоко-Довыренский массив (Арискин и др., 2015). Таким образом, можно с уверенностью предполагать наличие единого обогащенного источника для описанных выше пород. Период неоархея можно принять за точку отсчета в эволюции вещества для вышеперечисленных пород, отделившегося от деплетированной мантии с учетом T(DM) для этих пород. Приблизительно через 600–800 млн лет источник вещества стал значительно обогащенным (со значениями  $\epsilon_{Nd}(t)$  до –8 на период 2200–2000 млн лет) вследствие того, что первичное Sm/Nd отношение в источнике ниже, чем в деплетированной мантии. Плавление этого источника в палеопротерозое привело к образованию первичных магм как для пород Селигдара, так и для Муосталааха и Бирикээна.

Учитывая гипотезу о взаимосвязи карбонатитового магматизма с мантийным метасоматозом и современные представления об источнике углерода в мантии (Hornle et al., 2002; Когарко и Зартман, 2011; Giuliani et al., 2014), можно предположить, что формирование этого источника было связано с воздействием на литосферную мантию метасоматического карбонатного агента, извлеченного из материала древних зон субдукции в ранние периоды корообразующих явлений на Сибирском кратоне (Rosen et al., 2002).

Считается, что первичные магнезиокарбонатитовые расплавы реагируют со вмещающими мантийными породами, формируя верлитовые комплексы и изменяя состав в сторону обогащения CaO по отношению к MgO (Dalton and Wood, 1993). Учитывая преимущественно магнезиокарбонатитовую природу пород Бирикээна и Муосталааха, можно предположить, что первичный доломитовый расплав не успел прореагировать с вмещающими мантийными породами и сохранил свой изначальный химический состав благодаря быстрому подъему к поверхности по зонам растяжения и повышенной проницаемости коры. Данный вывод подтверждается наличием Селигдар-Верхнетимптонской отрицательной гравитационной аномалии — области пониженной плотности коры, перекрывающей Нимнырскую металлогеническую зону (Хомич и Борискина, 2010), в пределах которой располагаются рудопроявление Муосталаах, месторождения Бирикээн и Селигдар.

## 7. Заключение

Геохимические исследования карбонатитов апатитоносного рудопроявления Муосталаах и месторождения фосфатов Бирикээн продемонстрировали, что данные породы имеют схожие геохимические характеристики с таковыми для пород Селигдара и магнезиокарбонатитов мира. Магнезиокарбонатиты Муосталааха и Бирикээна, так же как Селигдарские породы, были образованы из единого обогащенного долгоживущего мантийного источника.

### Литература

Андреев, М.Н. (2014). Анализ современного состояния добычи и обогащения редкоземельных металлов в России. *Записки горного института*, 207, 9–11.

- Арискин, А. А., Данюшевский, Л. В., Конников, Э. Г., Маас, Р., Костицын, Ю. А., Мак-Нил, Э., Меф-фре, С., Николаев, Г. С., Кислов, Е. В. (2015). Довыренский интрузивный комплекс (Северное Прибайкалье, Россия): изотопно-геохимические маркеры контаминации исходных магм и экстремальной обогащенности источника. *Геология и геофизика*, 56, 528–556.
- Баянова, Т. Б. (2004). *Возраст реперных геологических комплексов Кольского региона и длительность процессов магматизма*. Москва: Наука.
- Боярко, Г. Ю. (1983). *Геолого-геохимические особенности Селигдарского месторождения апатита*. Дисс. ... канд. геол.-минерал. наук. Томский политехнический институт.
- Боярко, Г. Ю. (1997). Коры выветривания Бирикээнской группы фосфатных месторождений (Южная Якутия). Важнейшие промышленные типы россыпей и месторождений кор выветривания, технология оценки и освоения. В: *XI Международное совещание по геологии россыпей и месторождений кор выветривания*. Москва: ИГЕМ.
- Боярко, Г. Ю. (2005). Бирикээнское месторождение фосфатов. *Известия Томского политехнического университета*, 308 (1), 34–39.
- Боярко, Г. Ю., Сучков, В. Н. (1989). Перспективы апатитоносности Центрально-Алданского района. В: Л. П. Карсаков, Г. В. Роганов, Р. Я. Скляров, под ред., *Месторождения агрохимического сырья на юге Дальнего Востока*. Владивосток: ДВО АН СССР, 7–23.
- Боярко, Г. Ю., Сучков, В. Н. (1990). Фосфаты Южной Якутии. В: В. А. Абрамов, под ред., *Проблемы геологии, геофизики и полезных ископаемых Алдано-Станового геоблока*. Якутск: ПГО «Якутск-геология», 127–131.
- Владыкин, Н. В., Морикуо, Т., Миузаки, Т. (2005). Геохимия изотопов Sr и Nd щелочных и карбонатитовых комплексов Сибири и Монголии и некоторые геодинамические следствия. В: Н. В. Владыкин, под ред., *Проблемы источников глубинного магматизма и плюмы*. Иркутск; Петропавловск-Камчатский: Изд-во Института географии СО РАН, 13–29.
- Гладкочуб, Д. П., Донская, Т. В., Эрнст, Р., Мазукабзов, А. М., Скляров, Е. В., Писаревский, С. А., Вингейт, М., Седерлунд, У. (2012). Базитовый магматизм Сибирского кратона в протерозое: обзор основных этапов и их геодинамическая интерпретация. *Геотектоника*, 4, 28–41.
- Гонгальский, Б. И., Суханов, М. К., Гольцман, Ю. В. (2008). Sm-Nd изотопная система Чинейского анортозит-габброноритового плутона (Восточное Забайкалье). В: *Проблемы геологии рудных месторождений, минералогии, петрологии и геохимии*. Москва: ИГЕМ РАН, 57–60.
- Егин, В. И., Кичигин, Л. Н., Крук, Н. И. (1975). Апатитовое оруденение Центрального Алдана. В: В. К. Маршинцев, под ред., *Фосфаты Якутии*. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 75–80.
- Зайцев, А. И., Энтин, А. Р., Ненашев, Н. И., Лазебник, К. А., Тянь, О. А. (1992). *Геохронология и изотопная геохимия карбонатитов Якутии*. Якутск: ЯНЦ СО РАН.
- Когарко, Л. Н., Зартман, Р. Э. (2011). Новые данные о возрасте Гулинской интрузии и проблема связи щелочного магматизма Маймечка-Котунской провинции с Сибирским суперплумом (данные по изотопии U-Th-Pb системы). *Геохимия*, 5, 462–472.
- Кострыкина, А. Н., Маклецов, Ю. М., Сорокин, В. Т. (1963). *Геологическое строение и полезные ископаемые бассейнов среднего и верхнего течений р.р. Большой и Малый Нимныр (листы О-51-70-Г, О-51-71-В, О-51-82-Б)*. [отчет] ГПП «Южякутгеология», Якутск.
- Кострыкина, А. Н., Сорокин, В. Т., Червоный, Ф. И. (1964). *Геологическое строение и полезные ископаемые бассейнов среднего и верхнего течений р.р. Б. и М. Нимныр (листы О-51-70-В; О-51-71-Г; О-51-82-А; О-51-83-А, -Б)*. [отчет] ГПП «Южякутгеология», Якутск.
- Минаков, В. С., Лядин, В. И. (1976). *Отчет по геологическому доизучению ранее заснятой в м-бе 1:50 000 площади в бассейне среднего течения р. Бол. Нимныр (листы О-51-70-Б, -В, -Г; О51-71-В, -Г)*. [отчет] ГПП «Алдангеология», Алдан.
- Смелов, А. П., Зедгенизов, А. Н., Тимофеев, В. Ф. (2001). Алдано-Становой щит. В: Л. М. Парфенов, М. И. Кузьмин, под ред., *Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия)*. Москва: МАИК Наука/Интерпериодика, 81–104.
- Смирнов, Ф. Л., Энтин, А. Р. (1976). Алданский щит — новая перспективная апатитоносная провинция. *Советская геология*, 9, 52–61.
- Хомич, В. Г., Борискина, Н. Г. (2010). Структурная позиция крупных золоторудных районов Центрально-Алданского и Аргунского супертеррейнов. *Геология и геофизика*, 51 (6), 849–862.
- Энтин, А. Р., Зайцев, А. И., Лазебник, К. А., Ненашев, Н. И., Мартынцев, В. К., Тянь, О. А. (1991). *Карбонатиты Якутии: (Вещественный состав, минералогия)*. Якутск: ЯНЦ СО РАН.



- Энтин, А. Р., Зайцев, А. И., Тян, О. А., Королев, А. А., Ольховик, Ю. А., Ольштынский, С. П. (1989). Признаки участия глубинных источников в генезисе апатитовых руд селигдарского типа. *Докл. АН СССР*, 108 (2), 457–460.
- Энтин, А. Р., Тян, О. А. (1984). Докарбонатитовый этап формирования апатитовых месторождений Селигдарского типа (Алдан). В: *Платформенный магматизм Якутии и его металлогения*. Якутск: Якут. фил. СО АН СССР, 27.
- Agashev, A. M., Pokhilenko, N. P., Takazawa, E., McDonald, J. A. and Vavilov, M. A. (2008). Primary melting sequence of a deep (> 250 km) lithospheric mantle as recorded in the geochemistry of kimberlite-carbonatite assemblages, Snap Lake dyke system, Canada. *Chemical Geology*, 255 (3), 317–328. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.07.003>
- Chakmouradian, A. R., Böhm, C. O., Demèny, A., Reguir, E. P., Hegner, E., Creaser, R. A., Halden, N. M. and Yang, P. (2009). “Kimberlite” from Wekusko Lake, Manitoba: actually a diamond-indicator-bearing dolomite carbonatite. *Lithos*, 112 (S), 347–357. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.03.039>
- Dalton, J. A. and Wood, B. J. (1993). The compositions of primary carbonate melts and their evolution through wallrock reaction in the mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 119, 511–525. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(93\)90059-1](https://doi.org/10.1016/0012-821X(93)90059-1)
- Doroshkevich, A. G., Wall, F. and Ripp, G. S. (2007a). Magmatic graphite in dolomite carbonatite at Pogranichnoe, North Transbaikalia, Russia. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 153, 339–353. <http://dx.doi.org/10.1007/s00410-006-0150-z>
- Doroshkevich, A. G., Wall, F. and Ripp, G. S. (2007b). Calcite-bearing dolomite carbonatite dykes from Veseloe, North Transbaikalia, Russia and possible Cr-rich mantle xenoliths. *Mineralogy and Petrology*, 90, 19–49. <http://dx.doi.org/10.1007/s00710-006-0165-1>
- Doroshkevich, A. G., Prokopyev, I. R., Izokh, A. E., Klemd, R., Ponomarchuk, A. V., Nikolaeva, I. V. and Vladikin, N. V. (2018). Isotopic and trace element geochemistry of the Seligdar magnesio-carbonatites (South Yakutia, Russia): Insights regarding the mantle evolution beneath the Aldan-Stanovoy shield. *Journal of Asian Earth Sciences*, 154, 354–368. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2017.12.030>
- Giuliani, A., Phillips, D., Kamenetsky, V. S., Fiorentini, M. L., Farquhar, J. and Kendrick, M. A. (2014). Stable isotope (C, O, S) compositions of volatile-rich minerals in kimberlites: a review. *Chemical Geology*, 374, 61–83. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2014.03.003>
- Harmer, R. E. and Gittins, J. (1998). The case for primary, mantle-derived carbonatite magma. *Journal of Petrology*, 39, 1895–1903. <https://doi.org/10.1093/ptro/39.11-12.1895>
- Harmer, R. E. (1999). The petrogenetic association of carbonatite and alkaline magmatism: constraints from the Spitskop Complex, South Africa. *Journal of Petrology*, 40, 525–548. <https://doi.org/10.1093/ptro/40.4.525>
- Hoernle, K., Tilton, G. R., Le Bas, M. J. and Garbe-Schönberg, D. (2002). Geochemistry of oceanic carbonatites compared with continental carbonatites: mantle recycling of oceanic crustal carbonate. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 142 (5), 520–542. <http://dx.doi.org/10.1007/s004100100308>
- Mourtada, S., Le Bas, M. J. and Pin, C. (1997). Petrogenesis of Mg-carbonatites from Tamazert in the Moroccan High Atlas. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences — Series IIA — Earth and Planetary Science*, 325, 559–564. [https://doi.org/10.1016/S1251-8050\(97\)89455-4](https://doi.org/10.1016/S1251-8050(97)89455-4)
- Prokopyev, I. R., Doroshkevich, A. G., Ponomarchuk, A. V. and Sergeev, S. A. (2017). Mineralogy, age and genesis of apatite-dolomite ores at the Seligdar apatite deposit (Central Aldan, Russia). *Ore Geology Reviews*, 81, 296–308. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.10.012>
- Prokopyev, I. R., Doroshkevich, A. G., Redina, A. A. and Obukhov, A. V. (2018). Magnetite-apatite dolomitic rocks of Ust-Chulman (Aldan shield, Russia). *Mineralogy and Petrology*, 112 (4), 257–266. <http://dx.doi.org/10.1007/s00710-017-0534-y>
- Prokopyev, I. R., Doroshkevich, A. G., Sergeev, S. A., Ernst, R. E., Ponomarev, J. D., Redina, A. A., Chebotarev, D. A., Nikolenko, A. M., Dultsev, V. F., Moroz, T. N. and Minakov, A. V. (2019). Petrography, mineralogy and SIMS U-Pb geochronology of 1.9–1.8 Ga carbonatites and associated alkaline rocks of the Central-Aldan magnesio-carbonatite province (South Yakutia, Russia). *Mineralogy and Petrology*, 113, 329–352. <http://dx.doi.org/10.1007/s00710-019-00661-3>
- Rosen, O. M., Serenko, V. P., Spetsius, Z. V., Manakov, A. V. and Zinchuk, N. N. (2002). Yakutian Kimberlite Province: position in the structure of the Siberian craton and composition of the upper and lower crust. *Russian Geology and Geophysics*, 43, 1–24.

- Sun, S.-S. and McDonough, W.F. (1989). Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geological Society London Special Publications*, 42 (1), 313–345. <http://dx.doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>
- Viladkar, S. G. (1998). Carbonatite occurrences in Rajasthan, India. *Petrology*, 6 (3), 272–283.
- Woolley, A. R. and Kempe, D. R. C. (1989). Carbonatites: nomenclature, average chemical composition and element distribution. In: K. Bell, ed., *Carbonatites: Genesis and Evolution*, London: Unwin Hyman, 1–46.

Статья поступила в редакцию 17 сентября 2019 г.  
Статья рекомендована в печать 26 февраля 2021 г.

Контактная информация:

Пономарев Жан Дмитриевич — [jean1995sib@gmail.com](mailto:jean1995sib@gmail.com)  
Дорошкевич Анна Геннадьевна — [doroshkevich@igm.nsc.ru](mailto:doroshkevich@igm.nsc.ru)  
Прокопьев Илья Романович — [prokop@igm.nsc.ru](mailto:prokop@igm.nsc.ru)  
Чеботарев Дмитрий Александрович — [chebotarev@igm.nsc.ru](mailto:chebotarev@igm.nsc.ru)

**Geochemical characteristics of magnesiocarbonatites from Muostalaah apatite occurrence and Birikeen apatite deposit (Aldan-Stanovoy shield, South Yakutia, Russia)\***

J. D. Ponomarev<sup>1,2</sup>, A. G. Doroshkevich<sup>1,3,4</sup>,  
I. R. Prokopyev<sup>1,2</sup>, D. A. Chebotarev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3, pr. Akademika Koptyuga, Novosibirsk, 630090, Russian Federation

<sup>2</sup> Novosibirsk State University, 2, ul. Pirogova, Novosibirsk, 630090, Russian Federation

<sup>3</sup> National Research Tomsk State University, 36, pr. Lenina, Tomsk, 634050, Russian Federation

<sup>4</sup> Geological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 6a, ul. Sakhyanovoi, Ulan-Ude, 670047, Russian Federation

**For citation:** Ponomarev, J. D., Doroshkevich, A. G., Prokopyev, I. R., Chebotarev, D. A. (2021). Geochemical characteristics of magnesiocarbonatites from Muostalaah apatite occurrence and Birikeen apatite deposit (Aldan-Stanovoy shield, South Yakutia, Russia). *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 66 (2), 349–373. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2021.209> (In Russian)

Apatite-bearing ore occurrence Muostalaah and phosphate deposit Birikeen are magnesiocarbonatite complexes of the Seligdar type, located within the Nimnyrskaya submeridional metallogenic domain in the Aldan-Stanovoy shield in South Yakutia, Russia. This study presents geochemical characteristics of carbonatites and adjacent apatite-bearing silicate rocks of the Birikeen apatite deposit and Muostalaah apatite occurrence. Comparison of these complexes with the Seligdar deposit and other magnesiocarbonatite complexes of the world was made. Based on the chemical analysis of the petrogenic components of the Muostalaah and Birikeen carbonatites, it was concluded that these rocks belong to magnesiocarbonatites, similar to the magnesiocarbonatites of the Seligdar deposit. The chondrite-normalized REE spectra of magnesiocarbonatites and apatite rocks are characterized by LREE enrichment relative to HREE with average La/Yb(cn) ratios of 45 and 100 for the Muostalaah and Birikeen rocks,

\* Geochemical and isotope-geochemical studies of magnesiocarbonatites of the Muostalaah ore occurrence and the Birikeen deposit were carried out at the expense of the RSF project 19-17-00019, the study of silicate rocks was carried out at the expense of the research project 0330-2016-0002.

respectively. Most of the REE patterns are within the field of the world magnesiocarbonatites. The trace-elements abundances of carbonatites and apatite rocks record negative Nb, Pb, Sr, Zr, Hf and Ti anomalies and Th, U and REE enrichment. Concentrations of Th, U, Zr, and Hf are characterized by a wide spread of values. The trace-element patterns of the Birikeen and Muostalaah carbonatites are generally similar to the patterns of the world magnesiocarbonatites, including Seligdar rocks. Based on the results of isotopic studies of the Sm/Nd and Rb/Sr systems, it was concluded that the primary melts for the Muostalah and Birikeen carbonatites were formed from a long-lived enriched mantle source that separated from the depleted mantle in the Late Archean.

*Keywords:* magnesiocarbonatites, Aldan-Stanowoy shield, enriched source, Sr-Nd isotopic characteristics, REE composition of rocks.

## References

- Agashev, A. M., Pokhilenko, N. P., Takazawa, E., McDonald, J. A. and Vavilov, M. A. (2008). Primary melting sequence of a deep (> 250 km) lithospheric mantle as recorded in the geochemistry of kimberlite-carbonatite assemblages, Snap Lake dyke system, Canada. *Chemical Geology*, 255 (3), 317–328. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.07.003>
- Andreev, M. N. (2014). Analysis of the current state of production and enrichment of rare earth metals in Russia. *Notes of the Mining Institute*, 207, 9–11. (In Russian)
- Ariskin, A. A., Danyushevsky, L. V., Konnikov, E. G., Maas, R., Kostitsyn, Y. A., McNeill, A., Meffre, S., Nikolaev, G. S. and Kislov, E. V. (2015). The Dovyren intrusive complex (Northern Baikal Region, Russia): isotope-geochemical markers of contamination of parental magmas and extreme enrichment of the source. *Geology and Geophysics*, 56, 528–556. (In Russian)
- Bayanova, T. B. (2004). *Age of Reference Geological Complexes of the Kola Peninsula and Duration of the Magmatic Processes*. Moscow: Nauka Publ. (In Russian)
- Boyarko, G. Y. (1983). *Geological and Geochemical Features of the Seligdar Apatite Deposits*. PhD thesis. Tomsk Polytechnic Institute. (In Russian)
- Boyarko, G. Y. and Suchkov, V. N. (1989). Prospects for apatite in the Central Aldan region. In: L. P. Karsakov, G. V. Roganov, R. J. Skljarov, ed., *Agrochemical deposits on south of the Far East*. Vladivostok, 7–23. (In Russian)
- Boyarko, G. Y. and Suchkov, V. N. (1990). Phosphates of South Yakutia. In: V. A. Abramov, ed., *Problems of geology, geophysics and minerals of Aldan-Stanovoy geoblock*. Yakutsk: PGO “Yakutskgeologiya” Publ., 127–131. (In Russian)
- Boyarko, G. Y. (1997). Weathering crust of the Birikeen group of phosphate deposits (South Yakutia). The most important industrial types of alluvial deposits and deposits of weathering crust, technology for assessment and development. In: *XI International meeting on the geology of placers and deposits of weathering crust*. Moscow: IGEM Publ., 48. (In Russian)
- Boyarko, G. Y. (2005). Birikeen phosphate deposit. *Izvestiia of Tomsk Polytechnic University*, 308 (1), 34–39.
- Chakhmouradian, A. R., Böhm, C. O., Demény, A., Reguir, E. P., Hegner, E., Creaser, R. A., Halden, N. M. and Yang, P. (2009). “Kimberlite” from Wekusko Lake, Manitoba: actually a diamond-indicator-bearing dolomite carbonatite. *Lithos*, 112 (S), 347–357. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.03.039>
- Dalton, J. A. and Wood, B. J. (1993). The compositions of primary carbonate melts and their evolution through wallrock reaction in the mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 119, 511–525. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(93\)90059-1](https://doi.org/10.1016/0012-821X(93)90059-1)
- Doroshkevich, A. G., Wall, F. and Ripp, G. S. (2007a). Magmatic graphite in dolomite carbonatite at Pogranichnoe, North Transbaikalia, Russia. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 153, 339–353. <http://dx.doi.org/10.1007/s00410-006-0150-z>
- Doroshkevich, A. G., Wall, F. and Ripp, G. S. (2007b). Calcite-bearing dolomite carbonatite dykes from Veseloe, North Transbaikalia, Russia and possible Cr-rich mantle xenoliths. *Mineralogy and Petrology*, 90, 19–49. <http://dx.doi.org/10.1007/s00710-006-0165-1>
- Doroshkevich, A. G., Prokopyev, I. R., Izokh, A. E., Klemm, R., Ponomarchuk, A. V., Nikolaeva, I. V. and Vladikin, N. V. (2018). Isotopic and trace element geochemistry of the Seligdar magnesiocarbonatites

- (South Yakutia, Russia): Insights regarding the mantle evolution beneath the Aldan-Stanovoy shield. *Journal of Asian Earth Sciences*, 154, 354–368. <https://doi.org/10.1016/j.jseaeas.2017.12.030>
- Egin, V.I., Kichigin, L.N. and Kruk, N.I. (1975). Apatite mineralization of Central Aldan. In: V.K. Marshintzev, ed., *Phosphates of Yakutia*. Yakutsk: YAF SB AS USSR Publ., 75–80. (In Russian)
- Entin, A. R. and Tyan, O. A. (1984). Before-carbonatite step of formation of apatite deposits of Seligdar type (Aldan). In: *Platform magmatism of Yakutia and its metallogeny*. Yakutsk, 27. (In Russian)
- Entin, A. R., Zaitzev, A. I., Tyan, O. A., Korolev, A. A., Ol'hovik, Y. A. and Olshtynskij, S. P. (1989). Signs of participation of deep sources in the genesis of Seligdar-type apatite ores. *Reports of AS USSR*, 108 (2), 457–460. (In Russian)
- Entin, A. R., Zaitzev, A. I., Lazebnik, K. A., Nenashev, N. I., Martynceev, V. K. and Tyan, O. A. (1991). *Carbonatites of Yakutia: mineralogy and composition*. Yakutsk: Yakutsk Scientific Center of SB RAS Publ. (In Russian)
- Giuliani, A., Phillips, D., Kamenetsky, V. S., Fiorentini, M. L., Farquhar, J. and Kendrick, M. A. (2014). Stable isotope (C, O, S) compositions of volatile-rich minerals in kimberlites: a review. *Chemical Geology*, 374, 61–83. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2014.03.003>
- Gladkochub, D. P., Donskaya, T. V., Ernst, R., Mazukabzov, A. M., Sklyarov, E. V., Pisarevsky, S. A., Wingate, M. and Söderlund, U. (2012). Proterozoic basic magmatism of the Siberian craton: main stages and their geodynamic interpretation. *Geotectonics*, 4, 28–41. (In Russian)
- Gongalsky, B. I., Suchanov, M. K. and Goltzman, Y. V. (2008). Sm-Nd system of Chinese anorthosite-gabbro-norite pluton (East Transbaikalia). In: *Problems of Ore Geology Deposits, Mineralogy, Petrology and Geochemistry*. Moscow: IGEM RAS Publ., 57–60. (In Russian)
- Harmer, R. E. and Gittins, J. (1998). The case for primary, mantle-derived carbonatite magma. *Journal of Petrology*, 39, 1895–1903. <https://doi.org/10.1093/петрол/39.11-12.1895>
- Harmer, R. E. (1999). The petrogenetic association of carbonatite and alkaline magmatism: constraints from the Spitskop Complex, South Africa. *Journal of Petrology*, 40, 525–548. <https://doi.org/10.1093/петрол/40.4.525>
- Hoernle, K., Tilton, G. R., Le Bas, M. J. and Garbe-Schönberg, D. (2002). Geochemistry of oceanic carbonatites compared with continental carbonatites: mantle recycling of oceanic crustal carbonate. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 142 (5), 520–542. <http://dx.doi.org/10.1007/s004100100308>
- Khomich, V. G. and Boriskina, N. G. (2010). Structural position of large gold ore districts in the Central Aldan (Yakutia) and Argun (Transbaikalia) superterrane. *Geology and Geophysics*, 51 (6), 849–862. (In Russian)
- Kogarko, L. N. and Zartman, R. E. (2011). New data on the age of the Guli intrusion and implications for the relationships between alkaline magmatism in the Maymecha-Kotuy province and the Siberian superplume: U-Th-Pb isotopic systematics. *Geochemistry*, 5, 462–472. (In Russian)
- Kostrykina, A. N., Maklekov, Y. M. and Sorokin, V. T. (1963). *Geological structure and minerals of the basins of the middle and upper reaches of the river Big and Small Nimmir (sheets O-51-70-G, O-51-71-B, O-51-82-B)*. [report] MGE “Yuzhyakutgeologii”, Yakutsk. (In Russian)
- Kostrykina, A. N., Sorokin, V. T. and Chervonyj, F. I. (1964). *Geological structure and minerals of the basins of the middle and upper reaches of the river B. and M. Nimmir (sheets O-51-70-B; O-51-71-G; O-51-82-A; O-51-83-A, -B)*. [report] MGE “Yuzhyakutgeologii”, Yakutsk. (In Russian)
- Minakov, V. S. and Ljadin, V. I. (1976). *Report on the geological exploration of the area previously captured in the 1:50 000 area in the basin of the middle reaches of the river. Big Nimmir (sheets O-51-70-B, -V, -G; O51-71-B, G)*. [report] MGE “Aldangeologija”, Aldan. (In Russian)
- Mourtada, S., Le Bas, M. J. and Pin, C. (1997). Petrogenesis of Mg-carbonatites from Tamazert in the Moroccan High Atlas. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences — Series IIA — Earth and Planetary Science*, 325, 559–564. [https://doi.org/10.1016/S1251-8050\(97\)89455-4](https://doi.org/10.1016/S1251-8050(97)89455-4)
- Prokopyev, I. R., Doroshkevich, A. G., Ponomarchuk, A. V. and Sergeev, S. A. (2017). Mineralogy, age and genesis of apatite-dolomite ores at the Seligdar apatite deposit (Central Aldan, Russia). *Ore Geology Reviews*, 81, 296–308. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.10.012>
- Prokopyev, I. R., Doroshkevich, A. G., Redina, A. A. and Obukhov, A. V. (2018). Magnetite-apatite dolomitic rocks of Ust-Chulman (Aldan shield, Russia). *Mineralogy and Petrology*, 112 (4), 257–266. <http://dx.doi.org/10.1007/s00710-017-0534-y>
- Prokopyev, I. R., Doroshkevich, A. G., Sergeev, S. A., Ernst, R. E., Ponomarev, J. D., Redina, A. A., Chebotarev, D. A., Nikolenko, A. M., Dultsev, V. F., Moroz, T. N. and Minakov, A. V. (2019). Petrography, min-

- eralogy and SIMS U-Pb geochronology of 1.9–1.8 Ga carbonatites and associated alkaline rocks of the Central-Aldan magnesiocarbonatite province (South Yakutia, Russia). *Mineralogy and Petrology*, 113, 329–352. <http://dx.doi.org/10.1007/s00710-019-00661-3>
- Rosen, O.M., Serenko, V.P., Spetsius, Z.V., Manakov, A.V. and Zinchuk, N.N. (2002). Yakutian Kimberlite Province: position in the structure of the Siberian craton and composition of the upper and lower crust. *Russian Geology and Geophysics*, 43, 1–24.
- Smelov, A.P., Zedgenizov, A.N. and Timofeev, V.F. (2001). Aldan-Stanovoy shield. In: L.M. Parfenov, M.I. Kuz'min, ed., *Tectonics, Geodynamics and Metallogeny of the Sakha Republic (Yakutia)*. Moscow: MAIK Nauka/Interpeiodica Publ., 81–104. (In Russian)
- Smirnov, F.L. and Entin, A.R. (1976). Aldan shield — a new prospective apatite-bearing province. *Soviet geology*, 9, 52–61. (In Russian)
- Sun, S.-S. and McDonough, W.F. (1989). Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geological Society London Special Publications*, 42 (1), 313–345. <http://dx.doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>
- Viladkar, S.G. (1998). Carbonatite occurrences in Rajasthan, India. *Petrology*, 6 (3), 272–283.
- Vladykin, N.V., Morikyo, T. and Miuzaki, T. (2005). Sr and Nd isotopes geochemistry of alkaline and carbonatite complexes of Siberia and Mongolia and some geodynamic consequences. In: N.V. Vladykin, ed., *Problems of sources of deep magmatism and plumes*. Irkutsk; Petropavlovsk-Kamchatsky: Institute of Geography of SB RAS Publ., 13–29. (In Russian)
- Woolley, A.R. and Kempe, D.R.C. (1989). Carbonatites: nomenclature, average chemical composition and element distribution. In: K. Bell, ed., *Carbonatites: Genesis and Evolution*, London: Unwin Hyman, 1–46.
- Zaitzev, A.I., Entin, A.R., Nenashev, N.I., Lazebnik, K.A. and Tyan, O.A. (1992). *Geochronology and isotope geochemistry of carbonatites from Yakutia*. Yakutsk: Yakutsk Scientific Center of SB RAS Publ. (In Russian)

Received: September 17, 2019

Accepted: February 26, 2021

#### Contact information:

Jean D. Ponomarev — [jean1995sib@gmail.com](mailto:jean1995sib@gmail.com)

Anna G. Doroshkevich — [doroshkevich@igm.nsc.ru](mailto:doroshkevich@igm.nsc.ru)

Ilya R. Prokopyev — [prokop@igm.nsc.ru](mailto:prokop@igm.nsc.ru)

Dmitry A. Chebotarev — [chebotarev@igm.nsc.ru](mailto:chebotarev@igm.nsc.ru)