

В. Е. ГУЗЕВ, А. В. МОЛЧАНОВ, Е. И. ХОРОХОРИНА,
В. В. СЕМЕНОВА (ВСЕГЕИ)

Петролого-геохимические характеристики карбонатитов Мальджангарского массива (Анабарский щит)

В работе представлены результаты петролого-геохимического исследования карбонатитов Мальджангарского массива, расположенного в юго-восточной части Билляхской зоны тектонического меланжа (юго-восточная периферия Анабарского щита). Формирование карбонатитов, согласно результатам U-Pb датирования пирохлора (SHRIMP II), произошло около 167 млн лет назад. Установлено, что карбонатиты представлены тремя минеральными типами: кальцитовые, доломитовые и кальцит-доломитовые. Состав карбонатитов эволюционировал от ранних кальцитовых к кальцит-доломитовым и доломитовым. Геохимическое сходство всех разновидностей карбонатитов указывает на то, что исходным для карбонатитов являлся один и тот же расплав. Карбонатиты обогащены широким спектром элементов: LREE, Nb, Sr, As, MREE, Th, Ba, Ta, Y, Zr, Pb и Au. Геохимические особенности карбонатитов хорошо согласуются с минеральным составом. Ведущим и имеющим промышленный интерес полезным компонентом выступают LREE. В качестве попутных компонентов промышленный интерес могут представлять Nb, Ta, Y, P, Sr и Ba. Полученные данные позволяют рассматривать Мальджангарский карбонатитовый массив как источник редкоземельных и редкометалльных элементов.

Ключевые слова: Анабарский щит, Мальджангарский массив, карбонатиты, REE, оруденение

V. E. GUZEV, A. V. MOLCHANOV, E. I. KHOROKHORINA,
V. V. SEMENOVA (VSEGEI)

Petrological and geochemical characteristics of carbonatite in the Maldzhangar massif (Anabar shield)

The paper presents results of the petrological and geochemical study of the Maldzhangar carbonatite located in the southeastern part of the Billyakh zone of tectonic melange (southeastern periphery of the Anabar shield). According to results of the U-Pb pyrochlore dating (SHRIMP II), the carbonatite generated about 167 Ma ago. It is established that the carbonatite is represented by three mineral types: calcite, dolomite and calcite-dolomite. The carbonatite composition evolved from early calcitic to calcite-dolomitic and dolomitic. The geochemical similarity of all the varieties of carbonatite indicates that all of them originated from the same melt. The carbonatite is enriched in a wide range of elements: LREE, Nb, Sr, As, MREE, Th, Ba, Ta, Y, Zr, Pb, and Au. Carbonatite geochemical features closely match the mineral composition. LREEs are the major and useful component of commercial interest. Nb, Ta, Y, P, Sr, and Ba may be of commercial interest as minor components. The data obtained suggest that the Maldzhangar carbonatite massif is a source of rare earth and rare metal elements.

Keywords: Anabar shield, Maldzhangar massif, carbonatite, REE, mineralization

Для цитирования: Гузев В. Е. Петролого-геохимические характеристики карбонатитов Мальджангарского массива (Анабарский щит) / В. Е. Гузев, А. В. Молчанов, Е. И. Хорохорина, В. В. Семенова // Региональная геология и металлогения. — 2022. — № 91. — С. 52–67.
DOI: 10.52349/0869-7892_2022_91_52-67

Введение. Комплексы ультраосновных—щелочных пород и карбонатитов широко развиты на платформах, срединных массивах и в обрамляющих их областях завершённой складчатости [16; 17; 23; 24; 26; 28; 30; 40; 41]. Эти комплексы представлены сложными магматическими и гидротермальными образованиями, часто связанными с глубинными разломами. В северной части Сибирской платформы известны две обособленные провинции ультраосновных—щелочных

пород и карбонатитов — Маймеча-Котуйская (более 20 самостоятельных массивов центрального типа, включая Гулинский, Ыраас, Маган, Ессей и др.) в западном обрамлении Анабарского щита и Уджинская (Томторский, Богдо и Промежуточный массивы) в восточном обрамлении [16]. Эти провинции возникли в разные геологические эпохи и характеризуются различными особенностями структурного и пространственного размещения [3; 10; 22; 27]. Помимо рассматриваемых

провинций, по всему обрамлению восточного Прианабарья известно множество интрузий кимберлит-карбонатитового состава (160–146 млн лет назад) [6; 7; 25]. Этот пик эндогенной активности рассматривается авторами как этап плюмового магматизма на северо-востоке Сибирской платформы. Карбонатиты представляют практический и научный интерес, так как с ними связаны крупнейшие месторождения REE, Ta, Nb, Zr, P, Al, Pt, Cu и других рудных элементов [1; 10; 20; 33–36]. Одним из проявлений карбонатитового магматизма юго-восточной периферии Анабарского щита является Мальджангарский массив, расположенный в юго-восточной части Билляхской зоны тектонического меланжа. Впервые массив был обнаружен в 1980-е годы [19], позднее его изучением занимался ряд исследователей [2; 4; 5; 12; 13; 18]. В настоящей работе приводится петролого-геохимическая характеристика карбонатитов Мальджангарского массива, а также сделаны

предположения о закономерностях локализации рудной минерализации в пределах интрузии.

Геологическое положение и строение Мальджангарского карбонатитового массива. Анабарский щит представляет собой выступ докембрийского кристаллического фундамента, расположенный на севере Сибирской платформы, который имеет сложное строение и подразделен на ряд террейнов, различающихся составом слагающих их комплексов и историей геологического развития. В структуре Анабарского щита выделены три крупных террейна: Маганский (тоналит-трондьемит-гнейсовый), Далдынский (эндербит-гнейсовый) и Хапчанский (гранулит-парагнейсовый). Образование главных структурных элементов Анабарского щита обусловлено коллизией террейнов, которые ограничены Котуйканской, Маганской и Билляхской зонами тектонического меланжа [14].

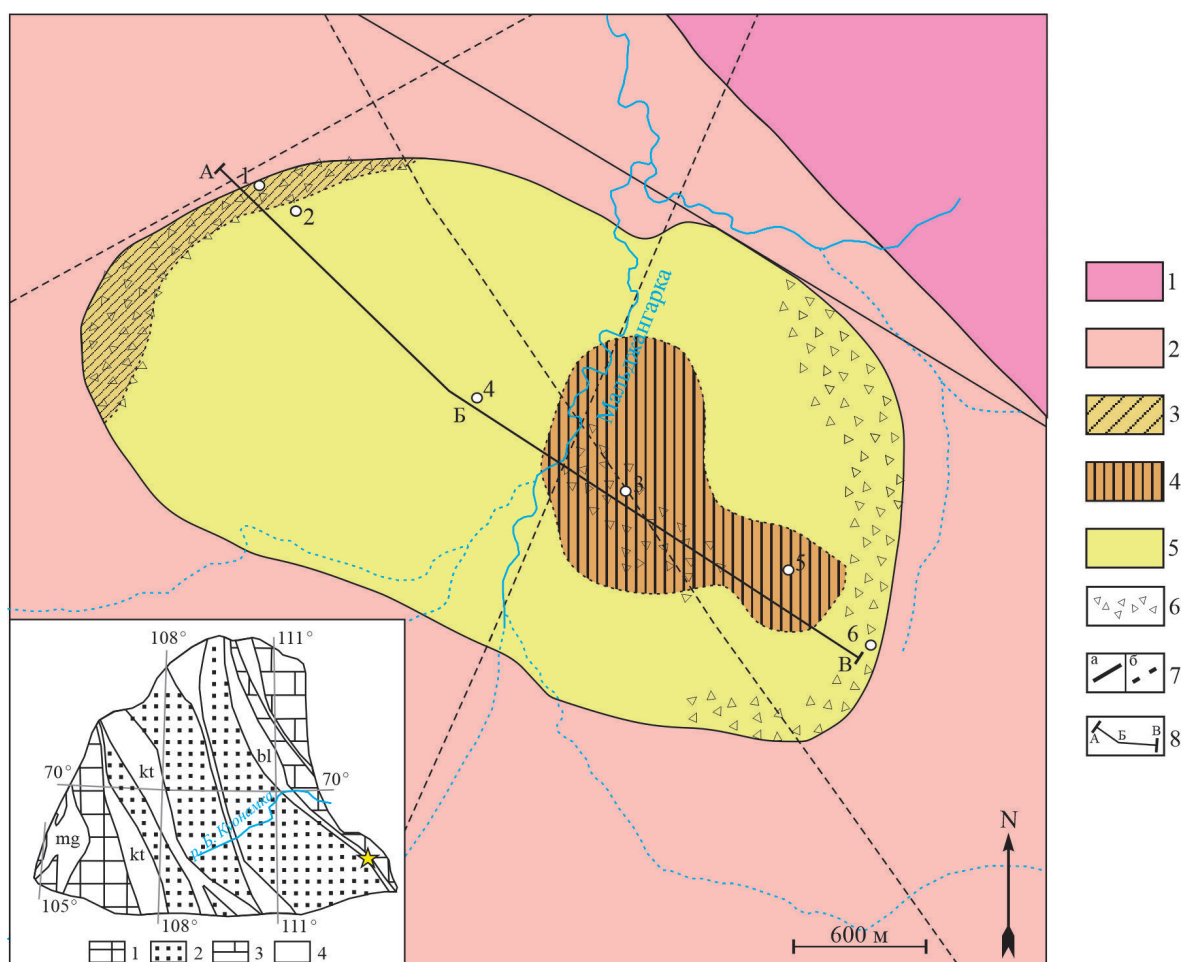


Рис. 1. Схема геологического строения Мальджангарского карбонатитового массива (по материалам [18] с дополнениями авторов)

1 – протерозойские метаморфические породы эйминской толщи; 2 – раннепротерозойские метаморфические породы верхнеламуйского комплекса (Билляхская зона тектонического меланжа); 3 – кальцитовые карбонатиты; 4 – доломитовые карбонатиты; 5 – кальцит-доломитовые карбонатиты; 6 – зоны брекчирования; 7 – разрывные нарушения (а – достоверные, б – потенциальные); 8 – линия разреза А–Б–В. Белыми кружками показаны скважины и их номера.

На врезке приведена тектоническая схема Анабарского щита: 1–3 – террейны: 1 – Маганский, 2 – Далдынский, 3 – Хапчанский; 4 – зоны тектонического меланжа (mg – Маганская, kt – Котуйканская, bl – Билляхская). Желтой звездочкой отмечена изучаемая территория

Билляхская зона тектонического меланжа, разделяющая Хапчанский и Далдынский террейны, прослежена в северо-западном направлении на расстоянии 250 км, а ширина достигает 30 км. Формирование Билляхской зоны тектонического меланжа на основании датировок циркона (U-Pb SHRIMP II метод) происходило 1985–1970 млн лет назад [15]. Зона приурочена к системе сближенных разрывных нарушений с тектоническими блоками и пластинами, сложенными метаморфитами верхнеанабарской и хапчанской серий. Региональные разломы определяют структурный план изучаемой территории, а также контролируют позднеюрский карбонатитовый магматизм, с которым генетически связано редкоземельное и редкометалльное оруденение [2]. Одним из проявлений такого магматизма является Мальджангарский карбонатитовый массив, расположенный в юго-восточной части Билляхской зоны тектонического меланжа. Формирование массива по результатам U-Pb изотопного датирования пироклора произошло около 167 млн лет назад [13]. Следует отметить, что вблизи рассматриваемой интрузии выделено девять геофизических аномалий, интерпретируемых как нескрытые эрозией карбонатитовые массивы, что существенно увеличивает потенциал территории как источника редкометалльных и редкоземельных элементов [18].

Мальджангарский карбонатитовый массив располагается в бассейне р. Мальджангарка (правый приток р. Дюкен). В плане интрузия имеет овальную форму, несколько вытянутую в северо-западном направлении на 4,1 км при ширине 2,3 км (рис. 1). На современном эрозионном срезе массив образует пологую возвышенность в центре округлой заболоченной депрессии [19]. Коренные выходы, за исключением приконтактных частей, практически отсутствуют, что существенно осложняет его изучение. Интрузия прорывает метаморфический верхнелаптепский мигматит-гнейсовый комплекс (2000–1850 млн лет): чередование биотитовых, биотит-амфиболовых и биотит-гранатовых гнейсов и сланцев с повсеместно проявленной мигматизацией [6].

Мальджангарский массив характеризуется концентрически-зональным строением — центральная часть сложена карбонатитами с реликтами кварц-полевошпатовых пород с эгирином; краевые зоны — породами кварц-гематитового и кварц-карбонат-микроклин-гематитового состава [18]. Породы массива прорваны более поздними телами альнеитов: маломощные (0,2–0,5 м) жилы (до 30 м), хонолиты (до 15 м) и трубки взрыва (до 20 м). В экзоконтактной зоне массива отмечены проявления фенитизации [18]. По минеральному и химическому составу в работах предшественников карбонатиты разделяются на кальцитовые, доломитовые, анкеритовые и сидеритовые [2; 4]. Существуют и переходные разновидности.

Методика исследований. Аналитические исследования были выполнены в Центральной

аналитической лаборатории ФГБУ «ВСЕГЕИ» (г. Санкт-Петербург). В основу статьи положены результаты исследования каменного материала Мальджангарского карбонатитового массива, собранного Амакинской геологоразведочной экспедицией в 2003–2004 гг. в ходе детальных геологических работ, включая малоглубинное разведочное бурение (шесть скважин глубиной до 100 м). Также использована коллекция магматических пород и метасоматитов, собранных сотрудниками Анабарской партии отдела металлогении и геологии месторождений полезных ископаемых ФГБУ «ВСЕГЕИ» во время полевых работ в 2003–2007 гг., в ходе выполнения договорных работ с Амакинской ГРЭ АК «АЛРОСА».

Минералого-петрографическое изучение исходных горных пород и гидротермально-метасоматических образований проводилось на основе тщательного микроскопического анализа 269 прозрачно-полированных шлифов (ППШ) на микроскопе Leica DM 2500. Детальное исследование рудной минерализации проводилось на приборе CamScan MV 2300 с энергодисперсионным микроанализатором LINK Pentafet (Oxford Instr.).

Химический состав главных петрогенных окислов в наиболее представительных образцах определен рентгеноспектральным флуоресцентным методом (XRF) на приборе ARL-9800 (12 обр.). Определение химического состава редких и редкоземельных элементов произведено масс-спектрометрическим методом с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) на приборе ELAN-6100 DRC (269 обр.). Статистические расчеты выполнялись с использованием программных средств MS Excel, StatSoft Statistica 6 и ArcGis.

Петрографо-минералогическая характеристика карбонатитов. Карбонатиты Мальджангарского массива характеризуются средне-мелкозернистой гипидиоморфнозернистой, гранобластовой, с элементами аллотриоморфнозернистой и панидиоморфнозернистой микроструктурами и массивной, полосчатой текстурами. По минеральному составу карбонатиты подразделяются на три типа: кальцитовые (рис. 2, а), доломитовые (рис. 2, в, г) и кальцит-доломитовые (рис. 2, б). Кальцитовые доломиты состоят преимущественно из кальцита и апатита (5–10 %). Доломитовые карбонатиты представлены доломитом (до 90 %) и отличаются от кальцитовых повышенным содержанием апатита (до 20 %). Кальцит-доломитовые карбонатиты являются наиболее распространенными разновидностями пород, которые состоят из кальцита (10–50 %), доломита (10–50 %) и апатита (5–10 %).

Карбонатиты демонстрируют близость состава, как по второстепенным, так и по аксессуарным и рудным минералам. Второстепенные минералы представлены калиевым полевым шпатом, биотитом, кварцем, актинолитом, стронцианитом, хлоритом, баритом, флогопитом, эгирином,

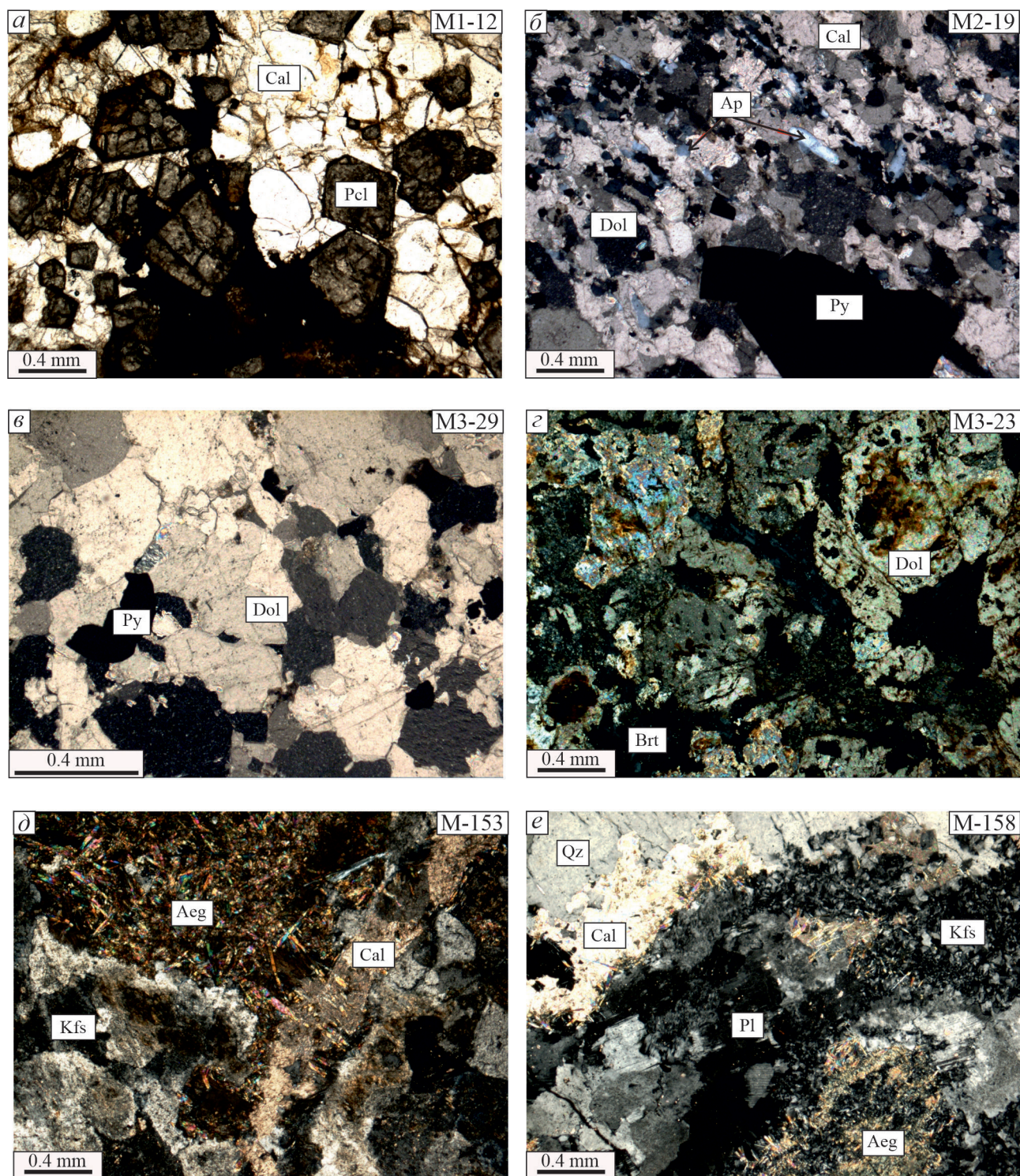


Рис. 2. Микрофотографии основных разновидностей карбонатов и гидротермально-метасоматических образований (с анализатором), принимающих участие в строении Мальджангарского массива

a – кальцитовые карбонаты; *б* – кальцит-доломитовые карбонаты; *в, г* – доломитовые карбонаты; *д, е* – околоинтрузивная фенитизация. Dol – доломит, Cal – кальцит, Ap – апатит, Pcl – пироксеноид, Py – пирит, Brt – барит, Kfs – калиевый полевой шпат, Qz – кварц, Aeg – эгирин, Pl – плагиоклаз

целестином и рибекитом; акцессорные минералы — пироксеном (фторкальциопироксен), монацитом, цирконом, бадделеитом, бастнезитом, ферротритом, колумбитом, рутилом, титанитом и магнетитом; рудные минералы — пиритом, халькопиритом, галенитом и сфалеритом [2; 4; 5; 13; 18]. Кальцит и доломит составляют основную массу породы в виде пластинчатых зерен неправильной формы размером от долей мм до нескольких см. Апатит представлен удлиненными, призматическими зернами (0,2–6,0 мм), реже в виде отдельных овальных кристаллов размером от 0,1 до 2,0 мм, а также встречаются скопления более мелких зерен. Минерал приурочен к контактам кальцита и доломита. Пироксен представлен фенокристаллами кубической, тетраэдрической и псевдогексагональной формы, размером от 0,2 до 2,0 мм, реже встречается в виде обломочных, дезинтегрированных, иногда округлых зерен до 1,0 мм. В проходящем свете кристаллы пироксена полупрозрачные до непрозрачных с красно-коричневым цветом. Монацит образует как отдельные кристаллы размером от 0,1 до 0,3 мм, так и многочисленные сноповидные и игольчатые агрегаты. Бастнезит характеризуется звездчатыми и ежевидными формами (до 0,1 мм), которые приурочены к отчетливо заметным пустотам и залеченным трещинам в кальците и доломите. Барит развивается по трещинам в кальците и доломите в виде тонкозернистых агрегатов (до 1,0 мм) с редкими более крупными таблитчатыми и призматическими зернами (до 3,0 мм), с отчетливой спайностью по двум направлениям. Эгирин представлен бесцветными с пятнистой светло-зеленой окраской призматическими и игольчатыми зернами (до 0,3 мм). Биотит встречается в виде отдельных чешуек (0,03–2,0 мм), рассеянных в основной массе породы. Чешуйки биотита таблитчатой формы часто смяты и деформированы, цвет зеленовато-коричневый, с плеохроизмом до светло-желтого, почти бесцветного. По периферии кристаллов биотит замещается хлоритом. Халцедоновидный кварц с концентрически-зональным строением размером от долей до 2,0 мм развивается по трещинам и пустотам в основной массе породы. Сульфиды (пирит, халькопирит) образуют зерна (0,1–6,0 мм) неправильной формы, реже с ровными отдельными гранями, близкие к кубической форме. Магнетит распространен в породе в виде изометрических, иногда таблитчатых, игольчатых зерен, достигающих 4,0 мм в поперечнике. В минерале наблюдаются включения рутила.

Во вмещающих породах и экзоконтактах интрузии развиты ореолы фенитизации. Фениты, замещающие метаморфиты верхнелапидарского мигматит-гнейсового комплекса, представляют собой светло-серые, светло-розовые, зеленоватые разнозернистые породы, часто сохраняющие реликтовый текстурно-структурный рисунок исходной породы. Основными породообразующими минералами фенитов выступают калиевый полевой шпат (ортоклаз, микроклин), альбит,

рибекит, эгирин и кварц (рис. 2, д, е). В меньшем количестве отмечаются биотит, апатит, титанит, магнетит и пирит.

Петрогеохимическая характеристика карбонатитов. Содержания петрогенных и редких элементов в наиболее представительных карбонатитах Мальджангарского массива приведены в табл. 1. Согласно классификационной диаграмме [40], кальцитовые карбонатиты относятся к кальциокарбонатитам, кальцит-доломитовые карбонатиты по своему составу варьируют от магнезиокарбонатитов до феррокарбонатитов, а фигуративные точки доломитовых карбонатитов ложатся в поле магнезиокарбонатитов (рис. 3).

По содержанию большинства петрогенных элементов карбонатиты Мальджангарского массива значимо не различаются между собой, за исключением вариаций CaO и MgO. В кальцитовых карбонатитах содержания CaO и MgO составляют 48,9–50,4 масс. % и 1,96–3,83 масс. % соответственно при содержаниях $\text{SiO}_2 = 2,16\text{--}4,29$ масс. %, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 0,13\text{--}0,41$ масс. %, $\text{MnO} = 0,43\text{--}0,94$ масс. % и $\text{TiO}_2 = 0,09\text{--}0,19$ масс. %. Кальцит-доломитовые карбонатиты характеризуются низкими содержаниями $\text{Al}_2\text{O}_3 = 0,14\text{--}1,40$ масс. %, $\text{MnO} = 0,19\text{--}0,62$ масс. % и $\text{TiO}_2 = 0,11\text{--}0,42$ масс. %, при вариации CaO от 41,6 до 42,1 масс. %, MgO от 6,82 до 8,04 масс. % и SiO_2 от 3,54 до 7,50 масс. %. В доломитовых карбонатитах содержания CaO и MgO составляют 29,6–32,5 масс. % и 13,9–15,7 масс. % соответственно при содержаниях $\text{SiO}_2 = 3,20\text{--}7,56$ масс. %, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 0,23\text{--}0,74$ масс. %, $\text{MnO} = 0,43\text{--}0,78$ масс. % и $\text{TiO}_2 = 0,06\text{--}0,45$ масс. %. Магнезиальность ($\text{Mg}^\#$) кальцитовых карбонатитов варьирует от 0,30 до 0,37, кальцит-доломитовых — от 0,48 до 0,65, доломитовых — от 0,67 до 0,77. Для всех разновидностей карбонатитов присущи вариации содержания P_2O_5 и $\text{FeO}_{\text{общ}}$, отражающие переменное количество апатита и рудных минералов. Содержание K_2O в кальцитовых карбонатитах до 0,43 масс. %, Na_2O менее 0,43 мас. %; в кальцит-доломитовых и доломитовых карбонатитах содержания K_2O достигают 0,24 и 0,15 масс. %, Na_2O — 0,41 и 1,13 мас. % соответственно. Отношение $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ для среднего состава кальцитовых карбонатитов равно 2, для кальцит-доломитовых — 0,8, доломитовых — 0,5.

Графики распределения редкоземельных и редких элементов в карбонатитах Мальджангарского массива, несмотря на незначительные вариации спектров, тождественны для всех рассматриваемых образцов (рис. 4). Наблюдается преобладание LREE над MREE (La/Sm от 7,59 до 27,0) и значительное преобладание LREE над HREE (La/Yb от 60,0 до 5282) при суммарном содержании REE от 848 до 38 646 ppm (рис. 4, а). В подавляющем большинстве изученных образцов слабо проявлена отрицательная Eu-аномалия ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0,67\text{--}0,96$), в то время как образцы 9 и 10 характеризуются наличием слабо

Таблица 1

Химический состав карбонатитов Мальджангарского массива

Элементы	Образцы											
	Кальцитовые				Кальцит-доломитовые				Доломитовые			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Содержание петрогенных оксидов, % масс.												
SiO ₂	3,94	2,16	4,29	3,20	7,50	4,20	3,54	6,48	4,97	4,21	7,56	3,20
TiO ₂	0,09	0,13	0,17	0,19	0,42	0,15	0,24	0,11	0,06	0,45	0,36	0,27
Al ₂ O ₃	0,30	0,41	0,28	0,13	1,40	0,29	0,18	0,14	0,26	0,74	0,58	0,23
Fe ₂ O ₃	1,94	3,32	1,74	2,48	0,95	4,72	3,47	2,70	3,64	2,19	3,08	2,51
FeO	2,74	4,71	1,29	2,46	2,78	3,28	2,75	1,52	2,74	1,82	2,63	3,74
MnO	0,72	0,43	0,94	0,58	0,34	0,56	0,19	0,62	0,53	0,78	0,72	0,43
MgO	2,32	3,83	1,96	3,29	7,49	8,04	6,82	7,03	14,1	15,7	13,9	15,6
CaO	49,64	50,40	48,96	50,31	41,64	42,02	42,14	41,83	29,58	31,26	32,54	31,06
Na ₂ O	0,07	0,25	0,43	0,29	0,15	0,24	0,31	0,41	0,53	0,22	0,06	1,13
K ₂ O	0,28	0,43	0,35	0,38	0,20	0,16	0,19	0,24	0,08	0,12	0,07	0,15
P ₂ O ₅	1,78	3,50	0,98	4,32	2,10	3,27	3,02	2,96	3,74	3,26	3,55	4,01
LOI	35,96	30,45	38,12	32,03	34,18	32,74	37,01	35,92	39,54	38,75	34,51	36,96
Сумма	99,78	100,0	99,51	99,66	99,15	99,67	99,86	99,96	99,77	99,50	99,56	99,29
F	0,21	0,35	0,26	0,14	0,19	0,09	0,17	0,23	0,28	0,42	0,15	0,13
Содержание элементов-примесей, ppm												
Be	1,27	3,73	1,38	3,99	1,98	4,50	1,78	1,88	7,15	5,12	1,96	17,5
Sc	23,0	11,7	14,5	21,4	8,84	21,9	63,4	7,62	15,6	12,9	8,36	28,0
V	74,1	33,6	15,0	110	16,7	47,6	153	86,6	41,8	26,9	20,5	31,8
Cr	36,0	2,51	4,94	114	2,13	7,43	31,0	1,12	7,52	8,27	3,44	12,0
Co	17,2	8,92	5,23	19,3	4,77	12,7	5,02	5,93	9,44	4,08	5,44	13,8
Ni	22,8	10,7	4,27	72,5	1,94	2,95	3,25	2,61	2,58	1,45	2,00	18,1
Cu	23,6	6,17	2,84	92,2	3,06	1,32	1,94	1,79	3,96	3,45	4,36	28,7
Zn	71,2	49,0	140	258	122	186	115	83,5	89,4	86,1	39,0	197
Rb	44,7	17,2	24,8	45,5	2,65	19,5	54,9	11,6	18,1	46,5	27,3	28,9
Sr	10 600	125 000	52 200	9200	13 300	13 200	1120	19 200	3090	3050	4070	935
Y	16,1	157	42,4	18,6	86,3	96,2	10,9	98,7	37,2	88,9	44,4	20,0
Zr	85,1	65,0	16,6	85,0	81,9	143	142	133	46,4	85,2	35,7	88,8
Nb	263	22,3	10,7	198	4930	2170	231	727	2150	6060	3100	975
Ba	9950	88 200	26 100	16 400	4440	8990	2020	5610	9950	8490	7350	9470
La	3190	14300	7500	1610	1000	1670	474	1030	257	315	289	211
Ce	4970	9100	5700	2360	1920	2710	727	1650	540	677	585	388
Pr	439	5250	2710	220	202	270	68,1	160	59,2	77,1	65,6	44,7
Nd	1290	7900	6170	632	666	858	210	496	212	282	234	155
Sm	118	980	285	65,5	72,6	99,8	20,9	54,8	29,8	41,5	29,6	18,4
Eu	26,0	199	53,4	15,6	19,1	26,9	5,03	14,9	9,34	13,4	8,56	4,92
Gd	65,3	685	209	37,5	53,2	67,3	20,3	40,8	24,1	38,8	25,4	14,1
Tb	3,39	36,3	9,88	2,53	5,30	6,34	1,04	4,09	2,60	4,49	2,57	1,38
Dy	13,4	162	47,1	9,45	23,1	27,0	3,04	20,2	11,0	22,4	12,0	5,87
Ho	0,86	9,86	2,44	0,76	3,18	3,84	0,45	3,27	1,63	3,37	1,85	0,79
Er	2,16	18,4	5,38	1,81	8,00	9,68	1,10	8,93	3,62	8,37	4,29	1,88
Tm	0,17	0,93	0,29	0,17	0,84	0,96	0,15	1,21	0,40	0,95	0,44	0,22
Yb	0,66	3,87	1,42	1,09	4,08	5,29	0,95	5,97	2,26	5,21	2,46	1,47
Lu	0,11	0,64	0,18	0,14	0,49	0,66	0,09	0,74	0,34	0,67	0,35	0,21
Ta	1,32	1,18	1,04	0,26	6,26	1,33	0,46	38,2	5,15	13,9	17,2	2,88
Pb	36,6	270	51,0	44,6	21,7	43,5	9,52	24,7	32,3	15,1	11,8	12,9
Th	99,4	1220	278	123	111	107	34,4	75,2	53,1	157	97,9	22,1
U	0,48	2,48	0,92	0,34	5,56	7,73	0,63	30,9	2,04	4,49	4,79	1,28
ΣREE	10 119	38 646	22 694	4956	3978	5756	1532	3491	1153	1490	1261	848
La/Sm	27,0	14,6	26,3	24,6	13,8	16,7	22,7	18,8	8,62	7,59	9,76	11,5
La/Yb	4833	3695	5282	1477	245	316	499	172	114	60,0	117	143
Eu/Eu*	0,91	0,74	0,67	0,96	0,94	1,00	0,75	0,96	1,07	1,02	0,95	0,93

Примечание. Eu/Eu* = EuN/√(SmN*GdN). Mg# = MgO/(MgO + FeO_{общ} + MnO), мол. кол-ва. 1 – обр. M1/26, 2 – обр. M1/28, 3 – обр. M1/29, 4 – обр. M1/31, 5 – обр. M2/19, 6 – обр. M2/21, 7 – обр. M2/26, 8 – обр. M2/30, 9 – обр. M3/4, 10 – обр. M3/7, 11 – обр. M3/10, 12 – обр. M3/12.

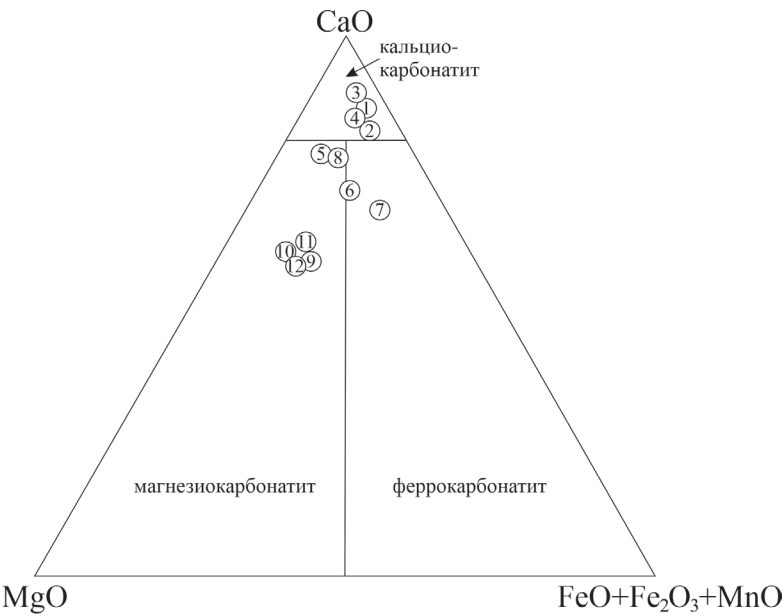


Рис. 3. Классификация и номенклатура карбонатитов [38]

Кальцитовые карбонатиты: 1 – обр. М1/26, 2 – обр. М1/28, 3 – обр. М1/29, 4 – обр. М1/31. Кальцит-доломитовые карбонатиты: 5 – обр. М2/19, 6 – обр. М2/21, 7 – обр. М2/26, 8 – обр. М2/30. Доломитовые карбонатиты: 9 – обр. М3/4, 10 – обр. М3/7, 11 – обр. М3/10, 12 – обр. М3/12

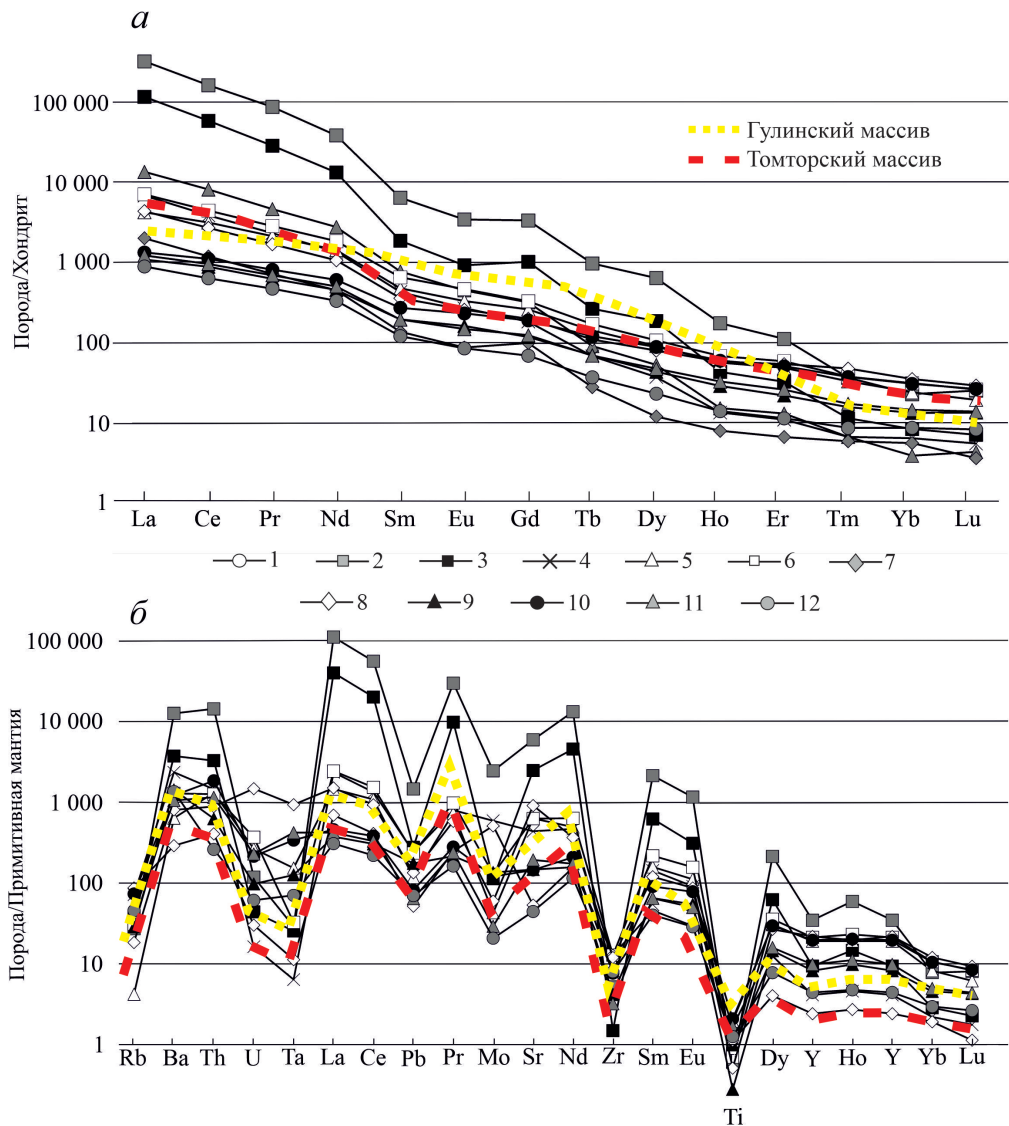


Рис. 4. Нормированные распределения редкоземельных (а) и редких элементов (б) в карбонатитах Мальджангарского массива. Нормировано по данным [29]

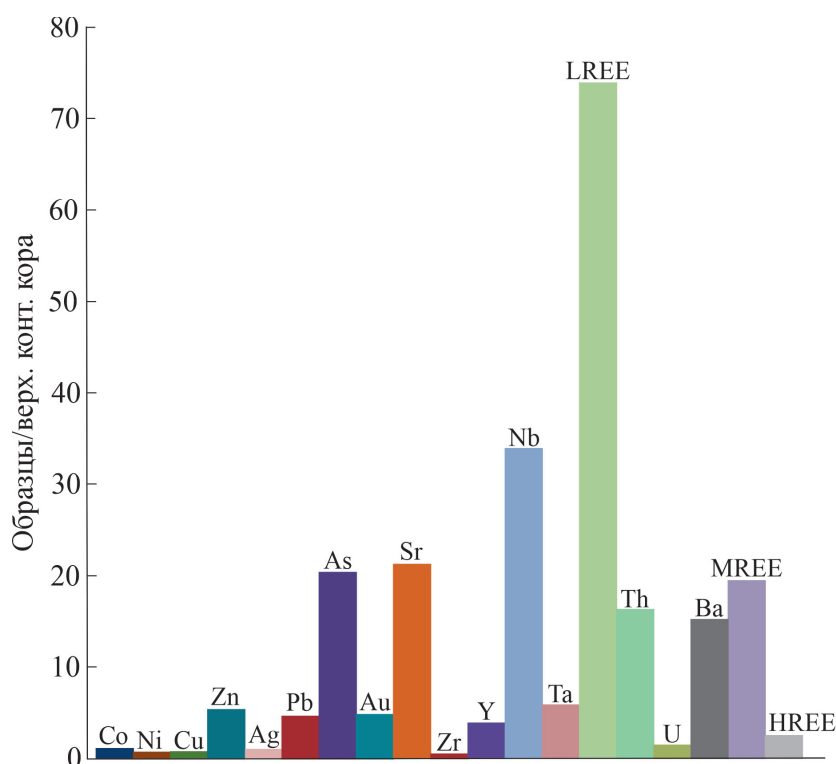


Рис. 5. Распределение основных микроэлементов в карбонатах Мальджангарского массива, нормированных по отношению к средним значениям для верхней коры [37]

Таблица 2
Общие статистические параметры основных микроэлементов Мальджангарского карбонатитового массива

Элемент	Минимальное	Максимальное	Медиана	Среднее значение	Стандартное отклонение
Co	1,37	104	10,0	12,9	11,4
Ni	1,06	116	6,81	12,3	16,8
Cu	1,02	211	5,88	12,5	19,9
Zn	18,6	4050	153	278	419
Ag	0,018	2,88	0,12	0,22	0,31
Pb	7,88	1300	44,4	77,8	123
As	3,87	494	26,4	40,7	44,9
Au	0,002	0,21	0,006	0,012	0,02
Sr	326	125 000	3430	6737	11 498
Zr	3,95	952	82,8	110	107
Y	6,23	346	59,4	80,3	69,9
Nb	10,7	6060	506	881	1 071
Ta	0,10	186	1,31	8,68	21,6
LREE	551	102 450	3599	9624	14 448
MREE	23,2	2072	170	244	231
HREE	0,94	57,3	10,2	12,3	10,8
Th	11,7	2480	110	168	210
U	0,13	37,7	2,17	3,85	5,08
Ba	999	88 200	7030	10 182	12 181

Примечание. Среднее значение – в г/т, n = 269

выраженной положительной Eu-аномалией ($Eu/Eu^* = 1,02–1,07$). В распределении редких элементов (рис. 4, б) наблюдаются пики по Ba, Th, La, Ce, Pr, Nd и отрицательные аномалии по U, Ta, Pb, Mo, Zr и Ti.

В изучаемых образцах Zr/Nb отношение (0,01–2,9) варьирует в небольшом диапазоне и близко к «среднему карбонатиту» [21]. Отношение Ti/Eu (3,9–329) значительно ниже, чем в примитивной мантии, а Y/Ho (15,9–30,2) в целом близко к мантийным. Отношение Rb/Sr (0,0001–0,05) чрезвычайно низкое, Sm/Nd отношение (0,05–0,15) близко к среднекоровым значениям.

Карбонатиты Мальджангарского массива обогащены достаточно широким спектром элементов (LREE, Nb, Sr, As, MREE, Th, Ba, Ta, Y, Zn, Pb, Au) (рис. 5), по сравнению со средними значениями верхней коры [37]. Среднее содержание микроэлементов приведено в табл. 2.

LREE, как правило, наиболее распространенная группа металлов в карбонатах Мальджангарского массива, их максимальные содержания достигают 10,2 %. Среднее значение LREE составляет 9624 г/т, а медиана – 3599 г/т. При этом концентрации MREE и HREE низкие (до 2072 г/т MREE и 57,3 г/т HREE), при среднем содержании 244 и 12,3 г/т соответственно. Среднее значение содержаний Y составляет 80,3 г/т, и около 37,5 % образцов имеют значение выше среднего. Концентрации Ta составляют от 0,10 до 186 г/т, при среднем значении – 8,68 г/т.

Таблица 3

Коэффициенты корреляции основных микроэлементов Малъжангарского карбонатитового массива

	Co	Ni	Cu	Zn	Ag	Pb	As	Au	Sr	Zr	Y	Nb	Ta	LREE	MREE	HREE	Th	U
Co	1	0,40	0,50	0,19	0,37	0,19	0,30	0,15	0,03	-0,07	0,06	-0,05	0,03	0,20	0,19	0,11	0,20	0,16
Ni	0,40	1	0,45	0,04	0,03	0,04	0,02	0,03	-0,15	-0,01	-0,12	-0,11	-0,04	0	-0,03	-0,09	-0,07	-0,06
Cu	0,50	0,45	1	0,15	0,14	0,05	0,06	0,05	-0,13	0,04	-0,03	-0,05	0,02	0,01	0,02	0,04	-0,02	-0,02
Zn	0,19	0,04	0,15	1	0,14	0,38	0,40	0,43	-0,08	-0,02	0,04	-0,09	0,02	0,24	0,31	0,07	0,36	0,34
Ag	0,37	0,03	0,14	0,14	1	0,13	0,08	0,14	0,17	-0,06	0,05	0,03	-0,03	0,05	0,05	0,06	0,07	0,03
Pb	0,19	0,04	0,05	0,38	0,13	1	0,28	0,24	-0,05	0,05	0,21	0,02	-0,02	0,11	0,26	0,23	0,31	0,21
As	0,30	0,02	0,06	0,40	0,08	0,28	1	0,28	0,04	0,09	0,44	0,05	-0,04	0,78	0,80	0,46	0,68	0,30
Au	0,15	0,03	0,05	0,43	0,14	0,24	0,28	1	-0,04	-0,07	-0,04	-0,12	0,03	0,24	0,20	-0,06	0,27	0,15
Sr	0,03	-0,15	-0,13	-0,08	0,17	-0,05	0,04	-0,04	1	0,06	0,08	0,07	-0,01	0,07	0,07	0,07	0,02	0,09
Zr	-0,07	-0,01	0,04	-0,02	-0,06	0,05	0,09	-0,07	0,06	1	0,26	-0,02	0,04	0,04	0,21	0,25	0,18	0,05
Y	0,06	-0,12	-0,03	0,04	0,05	0,21	0,44	-0,04	0,08	0,26	1	0,25	0,03	0,40	0,74	0,99	0,59	0,17
Nb	-0,05	-0,11	-0,05	-0,09	0,03	0,02	0,05	-0,12	0,07	-0,02	0,25	1	0,24	-0,05	0,08	0,26	0,21	0,26
Ta	0,03	-0,04	0,02	0,02	-0,03	-0,02	-0,04	0,03	-0,01	0,04	0,03	0,24	1	-0,11	-0,05	0,06	0,16	0,66
LREE	0,20	0	0,01	0,24	0,05	0,11	0,78	0,24	0,07	0,04	0,40	-0,05	-0,11	1	0,81	0,39	0,63	0,15
MREE	0,19	-0,03	0,02	0,31	0,05	0,26	0,80	0,20	0,07	0,21	0,74	0,08	-0,05	0,81	1	0,74	0,81	0,26
HREE	0,11	-0,09	0,04	0,07	0,06	0,23	0,46	-0,06	0,07	0,25	0,99	0,26	0,06	0,39	0,74	1	0,59	0,21
Th	0,20	-0,07	-0,02	0,36	0,07	0,31	0,68	0,27	0,02	0,18	0,59	0,21	0,16	0,63	0,81	0,59	1	0,46
U	0,16	-0,06	-0,02	0,34	0,03	0,21	0,30	0,15	0,09	0,05	0,17	0,26	0,66	0,15	0,26	0,21	0,46	1

Примечание. Закрашенные квадраты: 0,2–0,4 – слабая прямая (положительная) корреляционная связь, 0,4–0,6 – умеренная прямая (положительная) корреляционная связь, 0,6–0,8 – сильная прямая (положительная) корреляционная связь, 0,8–1,0 – тесная прямая (положительная) корреляционная связь

Химический состав минералов из карбонатитов Мальджангарского массива, масс. %

Монацит											
Номер образца	Анализ	O	P	Ca	La	Ce	Pr	Nd	Y	Th	Сумма
М3/17	16	29,47	12,31	1,15	12,07	28,94	1,67	12,06	1,26	1,07	100
	18	29,35	12,23	1,02	12,18	29,03	1,92	12,18	1,15	0,94	
	19	29,26	12,48	1,05	12,46	29,36	1,53	12,15	1,09	0,62	

Ферротит								
Номер образца	Анализ	Si	Fe	Zr	Nd	Th	O	Сумма
М2/27	24	5,97	4,87	5,43	1,61	62,31	19,81	100
	27	6,04	4,42	4,86	0,94	63,95	19,79	

Пирит						
Номер образца	Анализ	Fe	Zr	Ni	Co	Сумма
М2/29	7	44,16	54,06	1,10	0,68	100
	11	44,29	55,03	0,46	0,22	

Фторкальциопирохлор									
Номер образца	Анализ	F	Na	Ca	Ti	O	Nb	Th	Сумма
М3/21	21	3,25	8,42	11,59	0,61	30,13	51,25	0,21	100
	22	3,52	8,73	11,72	0,57	30,04	50,96	0,36	
	23	3,48	8,16	11,28	0,38	30,27	51,08	0,14	

Бастнезит											
Номер образца	Анализ	Ce	La	Nd	O	F	Fe	Ca	Y	Th	Сумма
М4/16	46	39,46	19,24	3,91	24,82	7,68	1,27	1,57	0,84	1,21	100
	47	40,07	19,35	3,52	25,68	7,62	1,04	1,08	0,75	0,89	

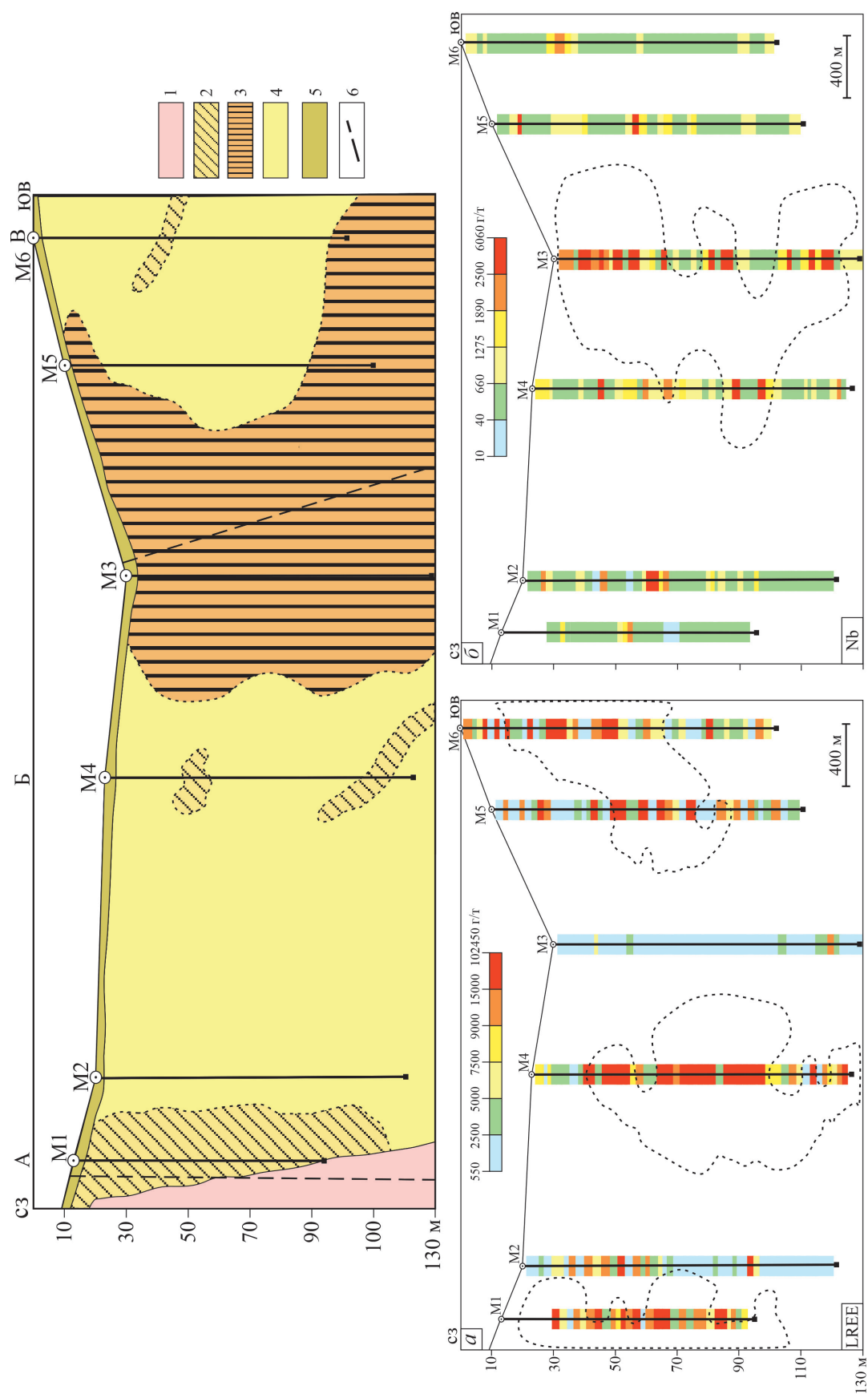
Колумбит						
Номер образца	Анализ	Nb	Fe	O	U	Сумма
М3/21	32	54,42	16,14	29,07	0,37	100
	37	53,61	16,65	28,95	0,79	

Среднее значение содержаний Nb составляет 881 г/т, и около 30,8 % образцов имеют значение выше среднего. Карбонатиты обогащены Sr и Ba (до 125 000 и 88 200 г/т соответственно) с большими вариациями Sr/Ba (0,28–11,2), что характерно для метасоматических образований. Zr показывает среднее значение 110 г/т, варьируя от 3,95 до 952 г/т.

Содержание Ag низкое – в среднем 0,22 г/т, где около 26,8 % выборки выше среднего значения. Среднее содержание Au также низкое, 0,012 г/т, при этом менее 15,2 % образцов равномерно распределяются выше этого значения. Концентрации As составляют от 3,87 до 494 г/т. Среднее значение As составляет 40,7 г/т, а медиана – 26,4 г/т. Содержания Co варьируют

от 1,37 до 104 г/т (в среднем 12,9 г/т), Ni – от 1,06 до 116 г/т (в среднем 12,3 г/т), Cu – от 1,02 до 211 г/т (в среднем 12,5 г/т), Zn – от 18,6 до 4050 г/т (в среднем 278 г/т), Pb – от 7,88 до 1300 г/т (в среднем 77,8 г/т), U – от 0,13 до 37,7 г/т (в среднем 3,85 г/т). Th присутствует всегда, иногда и в высоких концентрациях – до 2480 г/т (в среднем 168 г/т), где около 31,6 % выборки выше среднего значения. В данную выборку не попадают содержания P из-за ограниченного количества проанализированных проб, тем не менее в некоторых образцах концентрация P₂O₅ достигает 20 %.

REE проявляют высокую корреляцию с такими элементами как As, Y и Th (табл. 3), что можно объяснить тем, что они тесно ассоциируют в соб-



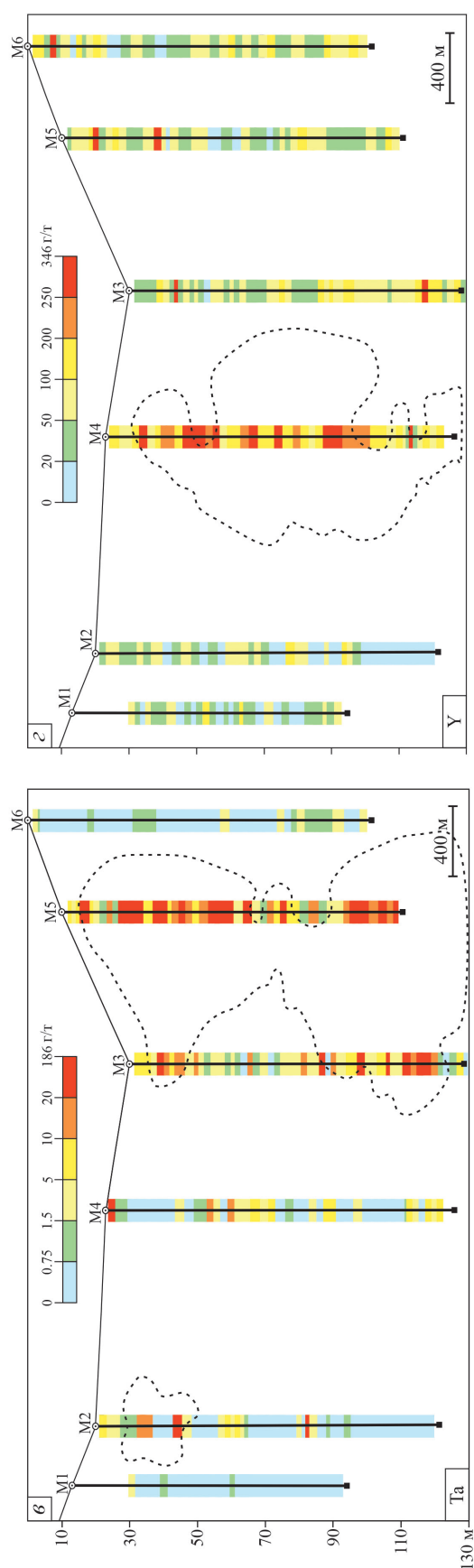


Рис. 6. Схематический геологический разрез Мальджангарского карбонатного массива с контурами распределения элементов: LREE (а), Nb (б), Ta (в) и Y (г). 1 – раннепротерозойские метаморфические породы верхнекамбрийского комплекса; 2 – кальцитовые карбонаты; 3 – доломитовые карбонаты; 4 – кальцит-доломитовые карбонаты; 5 – четвертичные и неоген-четвертичные отложения; 6 – потенциальные разрывные нарушения. Пунктирной линией показаны геохимические аномалии

ственных минералах (монацит, бастнезит) и обнаружены в виде примеси в ферроторите (табл. 4). Y также демонстрирует сильную корреляцию с REE и Th, так как встречается в монаците и бастнезите. Ta – показывает сильную корреляцию с U и слабую корреляцию с Nb. Сильная положительная корреляция между Ta и U ($r = 0,66$) отражает тесную связь U с танталсодержащим минералом – колумбитом. Th демонстрирует сильную корреляцию с REE, As и Y, так как обнаружен в виде примеси в монаците и бастнезите. Au не коррелирует с большинством элементов, за исключением умеренной корреляции с Zn и слабой корреляции со Pb, As, REE и Th. Несмотря на то, что Co и Ni обнаружены в низких концентрациях, они представлены в виде примеси в пирите. Sr, Zr, Ag, Pb и Nb не коррелируют с другими элементами, так как эти элементы находятся в различных минералах или встречаются в виде примесей.

Распределение LREE, Nb, Ta и Y (рис. 6) в пределах Мальджангарского массива показывает, что минерализация не сгруппирована в сплошное рудное тело. В результате были выявлены три крупные аномалии LREE (рис. 6, а), первая из которых расположена в центральной части массива вдоль скв. М4 (до 6,60 %) и прослеживается на глубину более 130 м. Вторая аномалия сконцентрирована в северо-западной части массива с максимальными значениями (до 10,2 %) на глубине 60 м. Третья аномалия на юго-востоке простирается в восточном направлении, с концентрацией до 8,10 %. Nb сконцентрирован в крупной аномалии, которая расположена в центральной части массива (между скважинами М3 и М4) со значениями до 6060 г/т (рис. 6, б). Крупная аномалия Ta протягивается вдоль скважин М3 и М5 с концентрациями до 186 г/т и прослеживается на глубину (более 115 м) (рис. 6, в). Еще одна небольшая аномалия (мощностью около 20 м) расположена в северо-западной части массива вдоль скв. М2 с более низкими содержаниями: до 39 г/т. Y имеет только одну крупную аномалию вдоль скв. М4 с концентрациями до 346 г/т (в среднем 165 г/т), которая совпадает с аномалией LREE (рис. 6, г). В юго-восточной части массива концентрация Y не превышает 100 г/т, за исключением нескольких точек – до 329 г/т.

Обсуждение результатов и выводы. Карбонаты Мальджангарского массива представлены тремя минеральными типами: кальцитовые, доломитовые и кальцит-доломитовые. Проведенные исследования не позволили установить описанные

в работах предшественников [2; 4] анкеритовые и сидеритовые карбонатиты. Предполагается, что состав карбонатитов эволюционировал от ранних кальцитовых к кальцит-доломитовым и доломитовым. Во вмещающих породах и экзоконтактах интрузии наблюдаются ореолы фенитизации. Геохимия изученных карбонатитов в целом соответствует критериям отнесения их к первичным карбонатитовым расплавам, описанных [31; 41], которые включают в себя высокие La/Yb , Ca/Al и низкие Ti/Eu . Отношения Y/No и Sm/Nd близки к мантийным. Высокие содержания Nb, Ta и LREE в карбонатитах указывают на низкую степень частичного плавления вещества мантийного источника и возможное изменение субстрата мантийным метасоматозом [9]. В то же время отношения Nb/La и Sm/Nd в изученных образцах отражают вероятную контаминацию их расплавов коровым материалом [32]. Значение Eu/Eu^* варьирует и достигает минимальных значений 0,67, что свойственно для поздних гидротермальных стадий карбонатитообразования. Для пород массива зафиксировано фракционированное распределение REE со значительным преобладанием LREE над HREE. Сходные, хорошо выдержанные спектры распределения REE свидетельствуют о близких составах их первичных источников.

Судя по спектрам распределения редких и редкоземельных элементов, карбонатиты Мальджангарского массива по составу схожи с карбонатитами Томторского и Гулинского массивов. Это сходство подтверждает возможную роль плюм-литосферного взаимодействия в формировании карбонатитосодержащих магматических комплексов в пределах рассматриваемого региона. Формирование карбонатитов в широком временном интервале (в позднем рифее, девоне, на рубеже палеозоя и мезозоя, а также в поздней юре) свидетельствует о неоднократной плюмовой активности на северо-востоке Сибирской платформы.

Полученные геохимические данные демонстрируют, что внедрение карбонатитового расплава привело к перераспределению в породах интрузии целого ряда химических элементов, и, как результат, к формированию положительных и отрицательных геохимических ореолов. Карбонатиты обогащены широким спектром элементов: LREE, Nb, Sr, As, MREE, Th, Ba, Ta, Y, Zn, Pb и Au. Ведущим и имеющим промышленный интерес полезным компонентом выступают LREE, поскольку их содержания достигают 10 %. Основными REE-минералами являются монацит и бастнезит. В качестве попутных компонентов промышленный интерес могут представлять Nb, Ta, Y, P, Sr и Ba. Обогащение Nb в карбонатитах в значительной степени связано с минералами группы пироклора. Состав изученных зерен пироклора соответствует фторкальциопироклору [13], практически без какой-либо зональности и примеси REE и Sr, что может служить указанием на его кристаллизацию в раннюю магматическую высокотемпературную стадию формирования карбонатитов массива. Повышен-

ные содержания фосфора связаны с присутствием апатита, а колумбит — главный рудный минерал тантала. Вышесказанное позволяет предполагать рассматриваемую интрузию благоприятной для выявления комплексного редкоземельного и редкометалльного оруденения в пределах одноименного потенциального ураноносного торий-редкоземельно-редкометалльного узла [12].

1. Вильямс Т., Когарко Л. Н. Новые данные о редкометалльной минерализации карбонатитов Гулинского массива (Полярная Сибирь) // Геохимия. — 1996. — № 6. — С. 483–491.

2. Владыкин Н. В., Ходжаев Д. К. Новая провинция рудоносных редкометалльных карбонатитов ЮВ-части Анабарского щита // Геохимия щелочных пород: тезисы докладов XXV международной конференции. — СПб., 2008. — С. 24–26.

3. Владыкин Н. В. Возрастные рубежи формирования щелочно-ультраосновного массива Томтор: результаты геохронологических U–Pb- и ^{40}Ar – ^{39}Ar -исследований / Н. В. Владыкин, А. Б. Котов, А. С. Борисенко, В. В. Ярмолюк, Н. П. Похиленко, Е. Б. Сальникова, А. В. Травин, С. З. Яковлева // Докл. РАН. — 2014. — Т. 454, № 2. — С. 195–199.

4. Владыкин Н. В. Минералого-геохимические особенности карбонатитов Мальджангарского массива, ЮВ часть Анабарского щита // Щелочной магматизм Земли: тезисы докладов XXXIII международной конференции. — М., 2016. — С. 20–23.

5. Владыкин Н. В., Лепехина Е. Н., Антонов А. В. Новый карбонатитовый этап на Анабарском щите // Основные проблемы в учении об эндогенных рудных месторождениях: новые горизонты, ИГЕМ РАН. — 2017. — С. 32–35.

6. Государственная геологическая карта СССР масштаба 1 : 200 000. Серия Анабарская. Лист R-49-XXV, XXVI. Объяснительная записка / Г. М. Музыка, М. С. Машак, А. А. Потуроев, Ивлиев К. А. (ред.). — М., 1978. — 70 с.

7. Граханов С. А., Смелов А. П. Возраст прогнозируемых коренных источников алмазов на севере Якутии // Отечественная геология. — 2011. — № 5. — С. 56–63.

8. Зайцев А. И. О возрасте магматитов Эбеляжского и Орто-Ыаргинского полей (северо-восток Якутской кимберлитовой провинции) // Отечественная геология. — 2006. — № 5. — С. 16–20.

9. Когарко Л. Н. Щелочной магматизм и обогащенные мантийные резервуары. Механизмы возникновения, время появления и глубины формирования // Геохимия. — 2006. — № 1. — С. 5–13.

10. Лазарева Е. В. Главные рудообразующие минералы аномально богатых руд месторождения Томтор (Арктическая Сибирь) / Е. В. Лазарева, С. М. Жмодик, Н. Л. Добрецов, А. В. Толстов, Б. Л. Щербов, Н. С. Карманов, Е. Ю. Герасимов, А. В. Брянская // Геология и геофизика, 2015. — Т. 56, № 6. — С. 1080–1115.

11. Малич К. Н. Результаты датирования ториянита и бадделита карбонатитов Гулинского массива (Россия) / К. Н. Малич, В. В. Хиллер, И. Ю. Баданина, Е. А. Белосусов // Докл. РАН. — 2015. — Т. 464, № 4. — С. 464–467.

12. Молчанов А. В. Перспективы промышленной ураноносности севера Центральной Сибири (на примере Анабарского щита и Таймыро-Североземельской складчато-надвиговой области) / А. В. Молчанов, В. Ф. Прокурнин, А. В. Гавриш, Ф. Д. Лазарев, Д. К. Ходжаев // Региональная геология и металлогения. — 2007. — № 32. — С. 88–103.

13. Молчанов А. В. Мальджангарский карбонатитовый массив (Анабарский щит): возраст магматизма и оруденения (U-Pb и Re-Os изотопные системы) / А. В. Молчанов, В. Е. Гүзев, Е. Н. Лепехина, Р. Ш. Крымский, А. В. Антонов, Б. В. Беляцкий, Е. И. Хорохорина // Геология и геофизика. — 2022. — Т. 63, № 12. — С. 85–99.
 14. Розен О. М. Изотопно-геохимические и возрастные характеристики раннепротерозойских террейнов, коллизионных зон и связанных с ними анортозитов на северо-востоке Сибирского кратона / О. М. Розен, Д. З. Журавлев, М. К. Суханов, Е. В. Бибииков, В. И. Злобин // Геология и геофизика. — 2000. — Т. 41, № 2. — С. 163–180.
 15. Смелов А. П. Возраст и продолжительность формирования Билляской зоны Тектонического меланжа, Анабарский щит / А. П. Смелов, А. Б. Котов, Е. Б. Сальникова, В. П. Ковач, В. И. Березкин, А. А. Кравченко, В. Н. Добрецов, С. Д. Великославинский, С. З. Яковлева // Петрология. — 2012. — Т. 20, № 3. — С. 315–330.
 16. Фролов А. А., Толстов А. В., Белов С. В. Карбонатитовые месторождения России. — М.: НИИ-Природа. — 2003. — 494 с.
 17. Фролов А. А. Карбонатиты и кимберлиты (взаимоотношения, минерагения, прогноз) / А. А. Фролов, А. В. Лапин, А. В. Толстов, Н. Н. Зинчук, С. В. Белов, А. А. Бурмистров. — М.: НИИПрирода. — 2005. — 540 с.
 18. Ходжаев Д. К. Рудоносность Мальджангарского карбонатитового массива (Анабарский щит, Республика Саха — Якутия) / Д. К. Ходжаев, А. В. Молчанов, Н. Е. Морозова, И. В. Рыбакова, А. С. Ивановский // Региональная геология и металлогения. — 2007. — № 32. — С. 103–107.
 19. Шахотко Л. И., Багдасаров Ю. А. Новый карбонатитовый массив Анабарского щита // ДАН СССР. — 1983. — Т. 273, № 1. — С. 186–189.
 20. Anenburg M., Broom-Fieldley S., Chen W. Formation of rare earth deposits in carbonatites // *Elements*. — 2021. — Vol. 17. — Pp. 327–332.
 21. Chakhmouradian A. R. High-field-strength elements in carbonatitic rocks: geochemistry, crystal chemistry and significance for constraining the sources of carbonatites // *Chemical Geology*. — 2006. — Vol. 235. — Pp. 138–160.
 22. Dalrymple B. G., Czamanske G. K., Fedorenko V. A., Simonov O. N., Lanphere M. A., Likhachev A. P. A reconnaissance $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronological study of ore-bearing and related rocks, Siberian Russia // *Geochim Cosmochim Acta*. — 1995. — Vol. 59. — No. 10. — Pp. 2071–2083.
 23. Ernst R. E., Bell K. Large igneous provinces (LIPs) and carbonatites // *Mineralogy and Petrology*. — 2010. — Vol. 98. — Pp. 55–76.
 24. Foley S. F., Fischer T. P. An essential role for continental rifts and lithosphere in the deep carbon cycle // *Nature Geoscience*. — 2017. — Vol. 10. — Pp. 897–902.
 25. Griffin W. L., Ryan C. G., Kaminsky F. V., O'Reilly S. Y., Natapov L. M., Win T. T., Kinny P. D., Ilupin I. P. The Siberian lithosphere traverse: mantle terranes and the assembly of the Siberian Craton // *Tectonophysics*. — 1999. — Vol. 310. — No. 1–4. — Pp. 1–35.
 26. Humphreys-Williams E. R., Zahirovic S. Carbonatites and global tectonics // *Elements*. — 2021. — Vol. 17. — Pp. 339–344.
 27. Kogarko L. N., Zartman R. E. A Pb isotope investigation of the Guli massif, Maymecha-Kotuy alkaline-ultramafic complex, Siberian flood basalt province, Polar Siberia // *Mineralogy and Petrology*. — 2007. — Vol. 89. — Pp. 113–132.
 28. Kogarko L. N., Veselovskiy R. V. Geodynamic origin of carbonatites from the absolute palaeotectonic reconstructions // *Journal of Geodynamics*. — 2019. — Vol. 125. — Pp. 13–21.
 29. McDonough W. F., Sun S.-S. Composition of the Earth // *Chemical Geology*. — 1995. — Vol. 120. — Pp. 223–253.
 30. Pirajno F., Santosh M. Rifting, intraplate magmatism, mineral systems and mantle dynamics in central-east Eurasia: An overview // *Ore Geology Reviews*. — 2014. — Vol. 63. — Pp. 265–295.
 31. Rudnick R. L., McDonough W. F., Chappell B. W. Carbonatite metasomatism in the northern Tanzanian mantle: Petrographic and geochemical characteristics // *Earth Planet. Sci. Lett.* — 1993. — Vol. 114. — Pp. 463–475.
 32. Rudnick A. W. Composition of the continental crust // *Treatise on Geochemistry*. Vol. 3. The crust. Eds: H. D. Holland, K. K. Turekian — Amsterdam: Elsevier, 2002. — Pp. 1–64.
 33. Smith M. P., Campbell L. S., Kynicky J. A review of the genesis of the world class Bayan Obo Fe-REE-Nb deposits, Inner Mongolia, China: multistage processes and outstanding questions // *Ore Geology Reviews*. — 2015. — Vol. 64. — Pp. 459–476.
 34. Stoppa F., Pirajno F., Schiazza M., Vladyskin N. V. State of the art: Italian carbonatites and their potential for critical-metal deposits // *Gondwana Research*. — 2016. — Vol. 37. — Pp. 152–171.
 35. Vladyskin N. V. Potassium alkaline lamproite-carbonatite complexes: petrology, genesis, and ore reserves // *Russian Geology and Geophysics*. — 2009. — Vol. 50. — Pp. 1119–1128.
 36. Wang Z.-Y., Fan H.-R., Zhou L., Yang K.-F., She H.-D. Carbonatite-related REE deposits: an overview // *Minerals*. — 2020. — Vol. 10. — Pp. 965–995.
 37. Wedepohl K. H. The Composition of the Continental Crust // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. — 1995. — No. 7. — Vol. 59. — Pp. 1217–1232.
 38. Woolley A. R., Kempe D. R. C. Carbonatites: nomenclature, average chemical composition and element distribution // *Carbonatites: genesis and evolution*. — London, 1989. — Pp. 1–46.
 39. Woolley A. R., Kjarsgaard B. A. Carbonatite occurrences of the world: map and database // *Geol. Surv. Can. Open File*. — 2008. — 5796. — Pp. 1–21.
 40. Woolley A. R., Bailey D. K. The crucial role of lithospheric structure in the generation and release of carbonatites: geological evidence // *Mineralogical Magazine*. — 2012. — Vol. 76. — No. 2. — Pp. 259–270.
 41. Yaxley G. M., Green D. H. Experimental demonstration of refractory carbonate-bearing eclogite and siliceous melt in the subduction regime // *Earth Planet. Sci. Lett.* — 1994. — Vol. 128. — Pp. 313–325.
-
1. Vil'yams T., Kogarko L. N. Novye dannye o redko-metal'noj mineralizatsii karbonatitov Gulinskogo massiva (Polyarnaya Sibir'). *Geochemistry International*, 1996, no. 6, pp. 483–491. (In Russian).
 2. Vladyskin N. V., Hodzhaev D. K. Novaya provinciya rudonosnyh redkometal'nyh karbonatitov YUV-chasti Anabarskogo shchita. Geohimiya shchelochnyh porod: tezisy dokladov XXV mezhdunarodnoy konferecii. St. Petersburg, 2008, pp. 24–26. (In Russian).
 3. Vladyskin N. V., Kotov A. B., Borisenko A. S., Yarmolyuk V. V., Pohilenko N. P., Sal'nikova E. B., Travin A. V., Yakovleva S. Z. Vozrastnye rubezhi formirovaniya shchelochno-ul'traosnovnogo massiva Tomtor: rezul'taty geohronologicheskikh U–Pb- i ^{40}Ar – ^{39}Ar -issledovaniy. *Doklady Earth Sciences*, 2014, vol. 454, no. 2, pp. 195–199. (In Russian).
 4. Vladyskin N. V. Mineralogo-geohimicheskie osobennosti karbonatitov Mal'dzhangarskogo massiva, YUV chast' Anabarskogo shchita. Shchelochnoj magmatizm Zemli: tezisy dokladov XXXIII mezhdunarodnoy konferecii. Moscow, 2016, pp. 20–23. (In Russian).
 5. Vladyskin N. V., Lepikhina E. N., Antonov A. V. Novyy karbonatitovyy etap na Anabarskom shchite. Osnovnye problemy v uchenii ob endogennyh rudnyh mestorozhdeniyah: novye gorizonty, IGEN RAN. 2017, pp. 32–35. (In Russian).
 6. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta SSSR masshtaba 1 : 200 000. Seriya Anabarskaya. R-49-XXV, XXVI. Ob'yasnitel'naya zapiska [Geological map of the map of the USSR. Scale 1 : 200 000. Anabarskaya series, sheets R-49-XXV, XXVI.

Explanatory note]. Eds.: G. M. Muzyka, M. S. Mashchak, A. A. Poturoev, K. A. Ivliev (eds.). Moscow, 1978, 70 p.

7. Grahano S. A., Smelov A. P. Vozrast prognozirovemykh korenykh istochnikov almazov na severe YAKUTII. *Otechestvennaya geologiya*, 2011, no. 5. pp. 56–63. (In Russian).

8. Zajcev A. I. O vozraste magmatitov Ebelyahskogo i Orto-Yarginskogo polej (severo-vostok YAKUTSKOJ kimberlitovoj provincii). *Otechestvennaya geologiya*, 2006, no. 5, pp. 16–20. (In Russian).

9. Kogarko L. N. Shchelochnoj magmatizm i obogashchenye mantijnye rezervuary. Mekhanizmy vozniknoveniya, vremya poyavleniya i glubiny formirovaniya. *Geochemistry International*, 2006, no. 1, pp. 5–13. (In Russian).

10. Lazareva E. V., Zhmodik S. M., Dobrecov N. L., Tolstov A. V., Shcherbov B. L., Karmanov N. S., Gerasimov E. Yu., Bryanskaya A. V. Glavnye rudoobrazuyushchie mineraly anomal'no bogatykh rud mestorozhdeniya Tomtor (Arkticheskaya Sibir'). *Russian Geology and Geophysics*, 2015, vol. 56, no. 6, pp. 1080–1115. (In Russian).

11. Malich K. N., Hiller V. V., Badanina I. Yu., Belousov E. A. Rezul'taty datirovaniya torianita i baddeleita karbonatitov Gulinskogo massiva (Rossiya). *Doklady Earth Sciences*, 2015, vol. 464, no. 4, pp. 464–467. (In Russian).

12. Molchanov A. V., Proskurnin V. F., Gavrilsh A. V., Lazarev F. D., Hodzhaev D. K. Perspektivy promyshlennoj uranonosnosti severa Central'noj Sibiri (na primere Anabarskogo shchita i Tajmyro-Severozemel'skoj skladchato-nadvigovoj oblasti). *Regional'naya geologiya i metallogeniya*, 2007, no. 32, pp. 88–103. (In Russian).

13. Molchanov A. V., Guzev V. E., Lepekhina E. N., Krymskij R. Sh., Antonov A. V., Belyackij B. V., Horohorina E. I. Mal'dzhangarskij karbonatitovyy massiv (Anabarskij shchit): vozrast magmatizma i orudneniya (U-Pb i Re-Os izotopnye sistemy). *Russian Geology and Geophysics*, 2022, vol. 63, no. 12, pp. 85–99. (In Russian).

14. Rozen O. M., Zhuravlev D. Z., Suhanov M. K., Bibikov E. V., Zlobin V. I. Izotopno-geohimicheskie i vozrastnye harakteristiki ranneproterozojskikh terrejnov, kollizionnykh zon i svyazannykh s nimi anortozitov na severo-vostoke Sibirskogo kratona. *Russian Geology and Geophysics*, 2000, vol. 41, no. 2, pp. 163–180. (In Russian).

15. Smelov A. P., Kotov A. B., Sal'nikov E. B., Kovach V. P., Berezkin V. I., Kravchenko A. A., Dobrecov V. N., Velikoslavinskij S. D., Yakovleva S. Z. Vozrast i prodolzhitel'nost' formirovaniya Billyahskoj zony Tektonicheskogo melanzha, Anabarskij shchit. *Petrology*, 2012, vol. 20, no. 3, pp. 315–330. (In Russian).

16. Frolov A. A., Tolstov A. V., Belov S. V. Karbonatitovye mestorozhdeniya Rossi. Moscow, NIA-Priroda, 2003, 494 p. (In Russian).

17. Frolov A. A., Lapin A. V., Tolstov A. V., Zinchuk N. N., Belov S. V., Burmistrov A. A. Karbonatity i kimberlity (vzaimootnosheniya, minerageniya, prognoz). Moscow, NIA-Priroda, 2005, 540 p. (In Russian).

18. Hodzhaev D. K., Molchanov A. V., Morozova N. E., Rybakova I. V., Ivanovskij A. S. Rudonosnost' Mal'dzhangarskogo karbonatitovogo massiva (Anabarskij shchit, Respublika Saha – Yakutiya). *Regional'naya geologiya i metallogeniya*, 2007, no. 32, pp. 103–107. (In Russian).

19. Shahot'ko L. I., Bagdasarov Yu. A. Novyj karbonatitovyy massiv Anabarskogo shchita. *DAN SSSR*, 1983, vol. 273, no. 1, pp. 186–189. (In Russian).

20. Anenburg M., Broom-Fieldley S., Chen W. Formation of rare earth deposits in carbonatites. *Elements*, 2021, vol. 17, pp. 327–332.

21. Chakhmouradian A. R. High-field-strength elements in carbonatitic rocks: geochemistry, crystal chemistry and significance for constraining the sources of carbonatites. *Chemical Geology*, 2006, vol. 235, pp. 138–160.

22. Dalrymple B. G., Czamanske G. K., Fedorenko V. A., Simonov O. N., Lanphere M. A., Likhachev A. P. A reconnaissance $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronological study of ore-bearing and related rocks, Siberian Russia. *Geochim Cosmochim Acta*, 1995, vol. 59, no. 10, pp. 2071–2083.

23. Ernst R. E., Bell K. Large igneous provinces (LIPs) and carbonatites. *Mineralogy and Petrology*, 2010, vol. 98, pp. 55–76.

24. Foley S. F., Fischer T. P. An essential role for continental rifts and lithosphere in the deep carbon cycle. *Nature Geoscience*, 2017, vol. 10, pp. 897–902.

25. Griffin W. L., Ryan C. G., Kaminsky F. V., O'Reilly S. Y., Natapov L. M., Win T. T., Kinny P. D., Ilupin I. P. The Siberian lithosphere traverse: mantle terranes and the assembly of the Siberian Craton. *Tectonophysics*, 1999, vol. 310, no. 1–4, pp. 1–35.

26. Humphreys-Williams E. R., Zahirovic S. Carbonatites and global tectonics. *Elements*, 2021, vol. 17, pp. 339–344.

27. Kogarko L. N., Zartman R. E. A Pb isotope investigation of the Guli massif, Maymecha-Kotuy alkaline-ultramafic complex, Siberian flood basalt province, Polar Siberia. *Mineralogy and Petrology*, 2007, vol. 89, pp. 113–132.

28. Kogarko L. N., Veselovskiy R. V. Geodynamic origin of carbonatites from the absolute palaeotectonic reconstructions. *Journal of Geodynamics*, 2019, vol. 125, pp. 13–21.

29. McDonough W. F., Sun S.-S. Composition of the Earth. *Chemical Geology*, 1995, vol. 120, pp. 223–253.

30. Pirajno F., Santosh M. Rifting, intraplate magmatism, mineral systems and mantle dynamics in central-east Eurasia: An overview. *Ore Geology Reviews*, 2014, vol. 63, pp. 265–295.

31. Rudnick R. L., McDonough F., Chappell B. W. Carbonatite metasomatism in the northern Tanzanian mantle: petrographic and geochemical characteristics. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1993, vol. 114, pp. 463–475.

32. Rudnick A. W. Composition of the continental crust. Treatise on Geochemistry. Vol. 3. The crust. Eds.: Holland H. D., Turekian K. K. Amsterdam, Elsevier, 2002, pp. 1–64.

33. Smith M. P., Campbell L. S., Kynicky J. A review of the genesis of the world class Bayan Obo Fe-REE-Nb deposits, Inner Mongolia, China: multistage processes and outstanding questions. *Ore Geology Reviews*, 2015, vol. 64, pp. 459–476.

34. Stoppa F., Pirajno F., Schiazza M., Vladyskin N. V. State of the art: Italian carbonatites and their potential for critical-metal deposits. *Gondwana Research*, 2016, vol. 37, pp. 152–171.

35. Vladyskin N. V. Potassium alkaline lamproite-carbonatite complexes: petrology, genesis, and ore reserves. *Russian Geology and Geophysics*, 2009, vol. 50, pp. 1119–1128.

36. Wang Z.-Y., Fan H.-R., Zhou L., Yang K.-F., She H.-D. Carbonatite-related REE deposits: an overview. *Minerals*, 2020, vol. 10, pp. 965–995.

37. Wedepohl K. H. The Composition of the Continental Crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, no. 7, vol. 59, pp. 1217–1232.

38. Woolley A. R., Kempe D. R. C. Carbonatites: nomenclature, average chemical composition and element distribution. Carbonatites: genesis and evolution, London, 1989, pp. 1–46.

39. Woolley A. R., Kjarsgaard B. A. Carbonatite occurrences of the world: map and database. *Geol. Surv. Can. Open File*, 2008, 5796, pp. 1–21.

40. Woolley A. R., Bailey D. K. The crucial role of lithospheric structure in the generation and reekase of carbonatites: geological evidence. *Mineralogical Magazine*, 2012, vol. 76, no. 2, pp. 259–270.

41. Yaxley G. M., Green D. H. Experimental demonstration of refractory carbonate-bearing eclogite and siliceous melt in the subduction regime. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1994, vol. 128, pp. 313–325.

Гузов Владислав Евгеньевич — вед. геолог, ВСЕГЕИ¹. <vladislav_guzev@vsegei.ru>

Молчанов Анатолий Васильевич — доктор геол.-минерал. наук, зав. отделом, ВСЕГЕИ¹. <anatoly_molchanov@vsegei.ru>

Хорохорина Елена Ивановна — вед. инженер, ВСЕГЕИ¹. <elena_horohorina@vsegei.ru>

Семенова Валентина Васильевна — вед. инженер, ВСЕГЕИ¹. <valentina_semenova@vsegei.ru>

Guzev Vladislav Evgen'evich — Leading Geologist, VSEGEI¹. <vladislav_guzev@vsegei.ru>

Molchanov Anatoly Vasilyevich — Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, head of department, VSEGEI¹. <anatoly_molchanov@vsegei.ru>

Khorokhorina Elena Ivanovna — Leading Engineer, VSEGEI¹. <elena_horohorina@vsegei.ru>

Semenova Valentina Vasilievna — Leading Engineer, VSEGEI¹. <valentina_semenova@vsegei.ru>

¹ Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского (ВСЕГЕИ). Средний пр., 74, Санкт-Петербург, Россия, 199106.

A. P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (VSEGEI). 74 Sredny Prospect, St. Petersburg, Russia, 199106.