

Бариево-стронциевая минерализация во флюидно-эксплозивных дайках Среднего Тимана, как результат деятельности карбонатитового магматизма

Голубева И.И.^{1,2}, Гракова О.В.¹, Филиппов В.Н.¹, Бурцев И.Н.¹

¹ ФИЦ ИГ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, iigolybeva2@yandex.ru

² Сыктывкарский государственный университет, Сыктывкар

Аннотация. Во флюидно-эксплозивных фемических дайках Среднего Тимана, парагенетически связанных с карбонатитовым магматизмом, кристаллизовались бариево-стронциевые минералы (анкилит-(Ce), кальциоанкилит-(Ce), карбоцернаит, дациншанит-(Ce), галгенбергит-(Ce), калькинсит-(Ce), барит, целестинобарит, гиалофан, цельзиан). Источником Ba – Sr элементов послужили карбонатно-щелочные растворы, участвовавшие в формировании карбонатитов на последнем этапе их становления.

Ключевые слова: карбонатиты, флюидно-эксплозивные дайки, бариево-стронциевые минералы, Средний Тиман.

Barium-strontium mineralization in fluid-explosive dykes as a result of karbonatitic magmatism (in the Timan)

Golubeva I.I.^{1,2}, Grakova O.V.¹, Filippov V.N.¹, Burtsev I.N.¹

¹ IG FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkariigolybeva2@yandex.ru

² P. Sorokin Syktyvkar State University, Syktyvkar

Abstract. Strontium-barium minerals (ancylite-(Ce), calcioancylite-(Ce), carbocernaite, daqignshanite-(Ce), barit, celestobarit, hyalophane, celsian) crystallized in fluid-explosive femic dykes. These dykes are paragenetically associated with carbonatite magmatism. The source of Ba-Sr elements was carbon-alkaline-dioxide solutions that participated in the formation of carbonatites at the last stage of their formation.

Key words: carbonatites, fluid-explosive dykes, strontium-barium minerals, Middle Timan.

Введение

На Среднем Тимане карбонатитовый магматизм сопровождается широким проявлением флюидно-эксплозивных процессов, представленных в виде многочисленных даек, связанных с серией разрывов трещинного типа среди терригенно-терригенно-карбонатных пород среднего и верхнего рифея (рис. 1). Минеральные парагенезисы карбонатитов Среднего Тимана свидетельствуют об их образовании на стадии низкотемпературного гидротермально-метасоматического карбонатитообразования (Костюхин, 1987). Карбонатитовое тело доломит-анкерит-сидеритового состава, сформированное в виде вертикального штока диаметром 400 м имеет весьма сложное неоднородное строение и длительную историю формирования, включающую эксплозивные процессы и несколько этапов перекристаллизации, обусловленных воздействием высококонцентрированных флюидов (Макеев и др., 2008). Тиманские карбонатиты, по мнению И.Л. Недосековой (2017), относятся к формации щелочно-ультраосновных пород калиевой специализации. В геологических публикациях и на геологических картах возраст формирования карбонатитов и дайкового комплекса фемических пород принимается по датированному метасоматическому флогопиту – 600 ± 15 млн лет (Костюхин и др., 1987), что отражает лишь очередной этап становления пород, так как выявлены более поздние многочисленные метасоматические минеральные фазы без установленных возрастных данных. Магматические минералы магматитов не продатированы. Общность становления карбонатитов и дайковых эксплозивных пород подтверждается не только возрастными данными флогопита, но и абсолютной синхронностью эволюции их изотопных $\delta^{13}\text{C}$ – $\delta^{13}\text{O}$ систем (Костюхин и др., 1987; Недосекова и др. 2013; Голубева и др., 2022). При этом изотопы О и С эксплозивных пород имеют

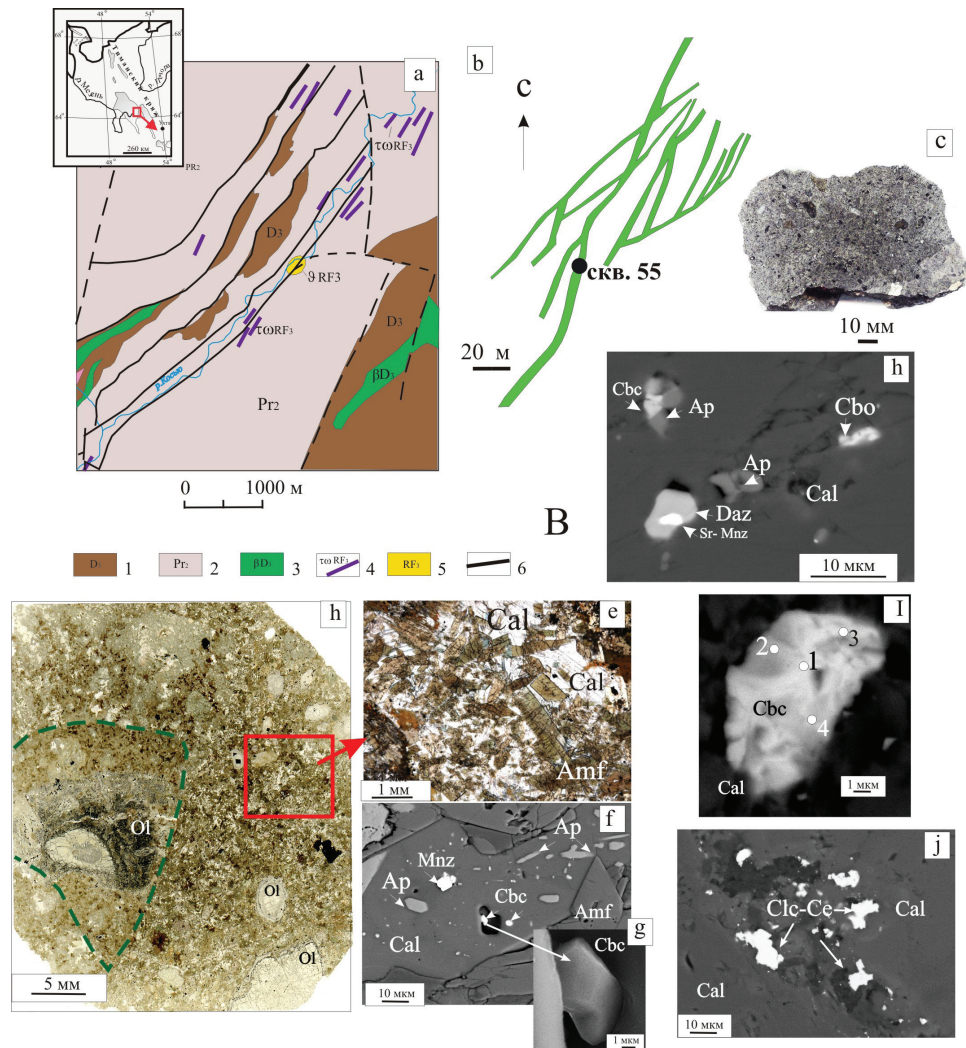


Рис. 1 Геологическая позиция флюидно-эксплозивных пород дайкового комплекса Среднего Тимана. Минерализация редкоземельных карбонатов.

а – фрагмент государственной геологической карты (В.М. Пачуковский и др., 1985); 1 – песчаники, алевролиты, аргиллиты, 2 – кварцито-песчаники, алевролиты, сланцы, 3 – базальты, долериты, 4 – флюидно-эксплозивные породы дайкового комплекса, 5 – карбонатиты, 6 – разломы; б – положение скважины № 55 в флюидно-эксплозивной дайке; в – фрагмент керна флюидно-эксплозивной породы; д – кальцит-роговообанковый агрегат в карбонатизированном участке флюидно-эксплозивной породы. Отсканированный петрографический шлиф; е – кальцит-роговообанковый агрегат. Микрофотография без анализатора. Cal – кальцит; Amp – амфибол; ф – карбоцернаит (Cbc) в кальцит-амфиболовом агрегате в ассоциации с апатитом (Ap) и монацитом (Mnz-Ce). СЭМ – снимок; г – кристалл карбоцернаита (Cbc) в полости кальцита. СЭМ – снимок; h – карбоцернаит (Cbc) и дациншанит (Daz-Ce) в кальците. Ассоциация с апатитом (Ap), монацитом (Mnz-Ce) и баритом (Brt). Апатит замещает карбоцернаит. СЭМ – снимок; i – замещение карбоцернаита фазами обедненными редкоземельными элементами (табл. 1, обр. 55–28). СЭМ – снимок; j – калькинсит (Clk-Ce) в участках карбонатизации СЭМ снимок.

Fig. 1 Geological position of fluid-explosive rocks of the dike complex. Mineralization of rare earth carbonates. a – is a fragment of the state geological map (V.M. Pachukovsky et al., 1985); 1 – sandstones, siltstones, mudstones, 2 – quartzite-sandstones, siltstones, shales, 3 – basalts, dolerites, 4 – fluid-explosive rocks of the dike complex, 5 – carbonatites, 6 – faults; б – is the position of well No. 55; в – core fragment of fluid-explosive rock; д – aggregate calcite-amphibole in a carbonatized area of fluid-explosive rock. Scanned petrographic section; е – aggregate calcite-hornblende. Micrograph without analyzer. Cal – calcite; Amp – amphibole; ф – carbocearnite (Cbc) in calcite-amphibole aggregate in association with apatite (Ap) and monazite (Mnz-Ce). SEM – image; г – carbocearnite (Cbc) crystal in a calcite cavity. SEM – image; h – carbocearnite (Cbc) and daqingshanite (Daz-Ce) in calcite. Association with apatite (Ap), monazite (Mnz-Ce) and barite (Brt). Apatite replaces carbocearnite. SEM – image; i – carbocearnite replacement of phases depleted in rare earth elements (tabl. 1, samples 55–28). SEM – image; j – calkinit (Clk-Ce) in areas of carbonatization SEM image.

утяжеленные значения, свидетельствующие о мантийном источнике флюидов – поставщиков мантийного материала.

Карбонатиты сложены с преимущественным процентным содержанием доломита анкерита, сидерита и кальцита в различных пропорциях. В целом количество карбонатных минералов относительно объема породы составляет 60–65 %. Второстепенными минералами являются флогопит, щелочной амфибол, эгирин, калиевый полевой шпат, иногда кварц.

Карбонатиты имеют редкоземельную специализацию, представленную в основном бастнезитом-(Ce), анкилитом-(Ce), карбоцернаитом и бурбанкином (Костюхин и др., 1987; Ковальчук и др., 2013; Недосекова и др., 2013). Обильная бариево-стронциевая минерализация (барит, целестинобарит и целестин) наиболее характерна для сопутствующих карбонат-полевошпатовых жил и метасоматитов (Макеев и др., 2008).

Методика исследования

Объектом исследования послужил керновый материал скважины № 55 глубиной 173 м, пробуренной в одной из, пересекающихся между собой в виде штокверка, даек с максимальной мощностью 5 м, расположенных в долине р. Косью на Среднем Тимане (рис. 1 б). Исследования минералов в флюидно-эксплозивных дайках выполнялись на электронных микроскопах Tescan Vega 3 LMN с энерго-дисперсионной приставкой Oxford Instrument X-Max 50 mm² и JSM–6400 JEOL (г. Сыктывкар, ИГ Коми НЦ УрО РАН, ЦКП «Геонаука»).

Бариево-стронциевая минерализация в флюидно-эксплозивных дайках

Мафические флюидно-эксплозивные породы на Среднем Тимане занимают обширную территорию в виде штоков и многочисленных (десятки тысяч) даек (см. рис. 1 а). Они практически не имеют выходов на поверхность, выявлены геофизическими методами. Протяженность даек может достигать 1000 м и мощности до 12 метров. Из-за конвергентных свойств дайковые eksploзивные породы трактуются как лампрофиры минеттового ряда, щелочные пикриты, реже кимберлиты или меймечиты. Эксплозивные ультрамафиты, насыщенные обломками мантийных и вмещающих пород, имеют облик кимберлитов. Изученные образцы представлены породами черного цвета и сложены на 30–50 об. % ксеногенным корово-мантийным материалом, сцементированным метасоматическим пироксеном, флогопитом и кальцитом (рис. 1 с). По существу породы представляют собой своеобразный микстит обломочного материала мантийно-корового происхождения и метасоматических минералов матрикса. Изучение химических особенностей магматических минералов: пироксена и хромшпинелида в ксеногенных обломках пироксенитов предполагает их кристаллизацию в термодинамических условиях, соответствующих шпинель-пироксеновой фации (Довжикова и др., 2018). Ксенолиты фенитизированных вмещающих рифейских кварцевых песчаников и пород (оливиновых пироксенитов и горнблендитов), как правило, имеют округлые очертания. Одним из признаков флюидно-эксплозивных пород является наличие обломков с обломочной структурой (Петрографический кодекс, 2008; Шарпенко и др. 2018; Голубева и др., 2021). Например, в отсканированном петрографическом шлифе (рис. 1 d) наблюдается обломок каплевидной формы, сложенный мелкочешуйчатым биотитом с включением крупным обломочным оливином, полностью замещенным кальцит-серпентинитовым агрегатом (на рис. 1 d границы обломка подчеркнуты зеленым штрихом). Весьма неоднородный состав дайковых пород, обусловленный наличием ксеногенного корово-мантийного материала и метасоматических продуктов, не позволяет их классифицировать. Порода характеризуется наличием кремнезема в количестве 39.0–41.1 масс. % и широкой вариацией суммы щелочей 2.27–7.75 масс. %, относительно низким содержанием MgO (11.4–18.6 масс. %) и TiO₂ (0.95–1.7 масс. %) и высоким – Al₂O₃ (7.35–12.5 масс. %) (Голубева и др., 2019).

Бариево – стронциевая минерализация, подобная таковой в поздних карбонатитовых жилах Среднего Тимана, широко проявлена во флюидно-эксплозивных дайках и связана с карбонатно-щелочными флюидами. Количество стронция и бария зависит от степени пропитывания карбонатно-щелочных растворами и колеблется в пределах соответственно 1501.9–533.8 г/т и 1620–826.6 г/т. Максимальные содержания Ba и Sr сопряжены с высокими содержаниями редкоземельных элементов, составляющих в сумме в максимальном количестве 436.1 г/т (минимальное – 220.9 г/т).

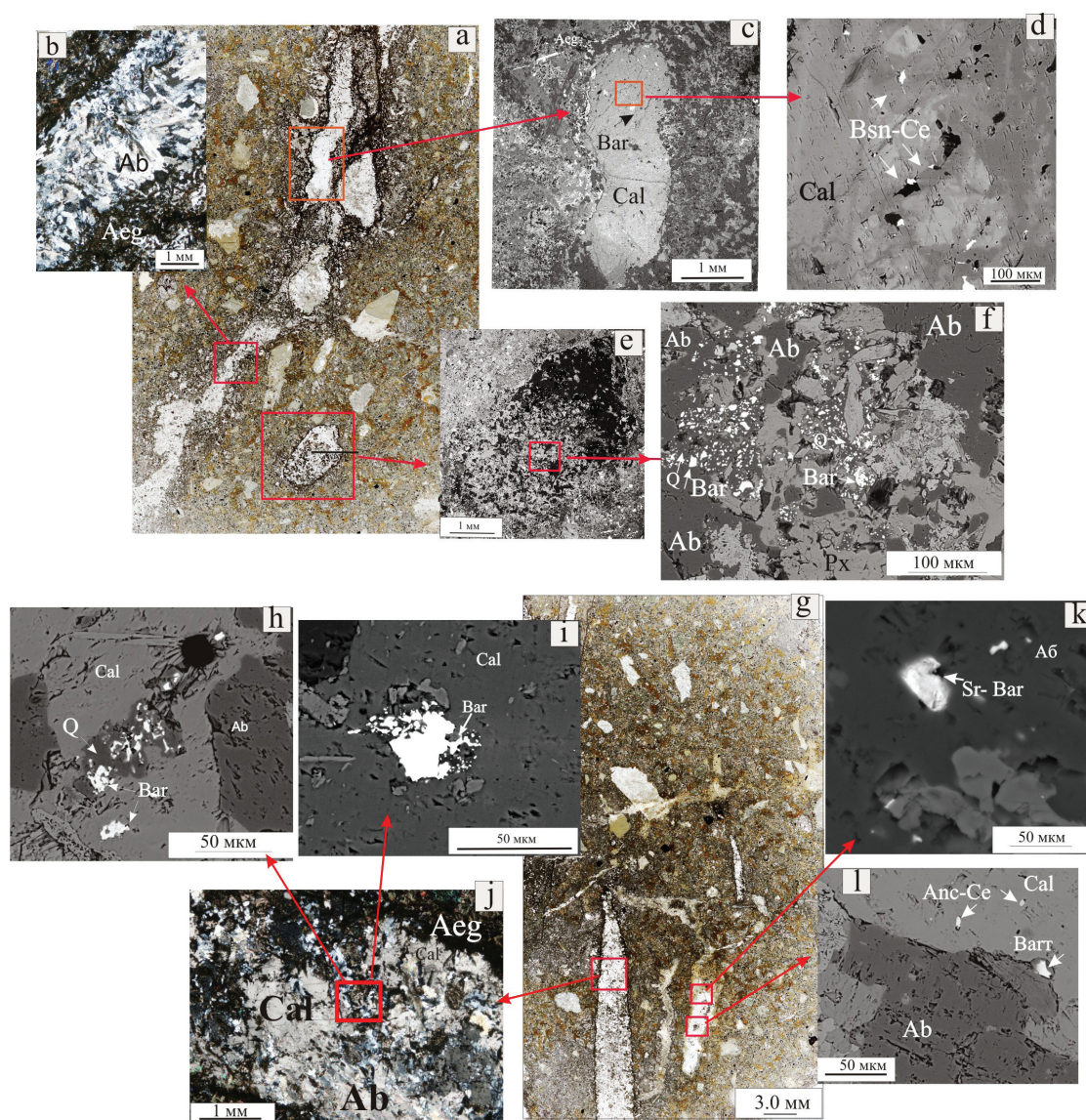


Рис. 2. Альбит-кальцитовые жилки с бариевой и редкоземельной минерализацией.

а – сопряженное развитие альбит-кальцитовой жилки с флюидизированной брекчиевой массой. Отсканированный петрографический шлиф; б – фрагмент альбит-кальцитовой жилки с эгириновыми (Aeg) зальбандами. Микрофотография с анализатором; с – кальцитовый агрегат (Cal) с баритом (Brt) и редкоземельными карбонатами. СЭМ – снимок; д – цериевый бастнезит (Bsn-Ce) в кальците. Кальцит с РЗЭ (более светлые поля) замещается кальцитовой фазой без примесей. СЭМ – снимок; е – обломок альбит-флогопит-кальцитового состава. СЭМ – снимок; ф – фрагмент обломка, изображенного на рис. 2 д. Кварц (Q) – баритовые (Brt) сростания в альбитовом (Ab) агрегате. СЭМ – снимок; г – кальцит-альбитовые жилки и их фрагменты в виде обломков. Отсканированный петрографический шлиф; h – кварц-баритовые сростания в кальците. СЭМ – снимок; i – барит (Brt) в кальците. СЭМ – снимок; j – фрагмент кальцит-альбитовой жилки на рис. 2 г. Микрофотография с анализатором; k – стронциевый барит (Sr-Brt) в альбите. СЭМ – снимок; l – цериевый анкилит (Anc-Ce) и барит (Brt) в альбит-кальцитовой жилке. СЭМ – снимок.

Fig. 2. Albite-calcite veins with barium and rare earth mineralization.

a – associated development of an albite-calcite vein with a fluidized breccia mass. Scanned petrographic section; b – fragment of an albite-calcite vein with aegirine (Aeg) selvages. Micrograph with analyzer; c – calcite aggregate (Cal) with barite (Brt) and rare earth carbonates. SEM – image; d – cerium bastnaesite (Bsn-Ce) in calcite. Calcite with REE (lighter fields) is replaced by a calcite phase without impurities. SEM – image; e – fragment of albite-phlogopite-calcite composition. SEM – image; f – is a fragment of the fragment in Fig. 2 d. Quartz (Q) – barite (Brt) intergrowths in albite (Ab) aggregate. SEM – image; g – calcite-albite veins and their fragments in the form of fragments. Scanned petrographic section; h – quartz-barite intergrowths in calcite. SEM – snapshot; i – barite (Brt) in calcite. SEM – image; j – is a fragment of a calcite-albite vein in fig. 2 g. Micrograph with analyzer; k – strontium barite (Sr-Brt) in albite. SEM – image; l – cerium ankyrite (Anc-Ce) and barite (Brt) in albite-calcite vein. SEM – image.

Ранее в этих же породах были обнаружены ториевые минералы, монацит, никелевые сульфиды, фтор-апатит, марганцевый ильменит и ильменорутит (Костюхин и др., 1987; Недосекова и др., 2017). Основными носителями стронция, бария и редкоземельных элементов в породе являются кальциоанкилит-(Ce), анкилит-(Ce), бурбанкит, карбоцернаит, дацзинианит-(Ce), галгенбергит-(Ce), барит, целестинобарит, цельзиан, гиалофан, барийсодержащий калиевый полевой шпат, флогопит. Бариево-стронциевые минералы образуются в постмагматических кальцитовых, альбитовых (реже цеолитовых) мономинеральных обособлениях метасоматического генезиса (рис. 1 е), также в кальцит-альбитовых жилках (рис. 2 а, г). В эксплозивной породе процессы карбонатизации и альбитизации происходили на самой поздней стадии ее формирования с замещением первичных минералов матрикса, тогда как кальцит-альбитовые жилки развивались сопряжено с флюидизированной обломочной массой, находившейся еще в мобильном состоянии. Кальцит-альбитовые жилки подобно струйкам, расположены вдоль флюиальности породы, подчеркиваемой ориентированными удлиненными обломками пироксена и оливина, согласными флюиальному течению брекчиевой массы (см. рис. 2 а, г). Впоследствии жилка за счет прерывистого истечения твердого газоподобного материала будинировались и раскалывались на блоки, слегка смещенные по течению (см. рис. 2 а). Альбит-кальцитовая жилка с эгириновыми реакционными зальбандами (рис. 2 б) образовалась за счет карбонатно-щелочных флюидов, последовательно сменивших карбонатные растворы в том же подводящем канале. Такой механизм становления может объяснить присутствие в альбит-кальцитовом агрегате округленного, с четко выраженными краями и слегка пластично деформированного обособления кальцита (рис. 2 с) с включениями *бастнезита* и *барита* (табл. 1), являющегося своеобразным «реликтом» кальцитового агрегата, прежде заполнявшего данную жилку. Реликтовый кальцит, в свою очередь, также имеет длительную историю кристаллизации, включающую замещение первичной минеральной фазы, насыщенной элементами-примесями (в масс. %) $\text{SrO} = 1.09$, $\text{MnO} = 0.43$, $\text{BaO} = 0.85$ (рис. 2 d). Во вторичном кальците элементы-примеси не обнаружены. *Бастнезит*, по сравнению с другими редкоземельными карбонатами, имеет наиболее крупные зерна размером до 20 мкм. Минерал кристаллизуется по спайности кальцита (см. рис. 2 d). Бастнезит ксеноморфной формы развивается исключительно в кальците с примесью стронция и бария. В другом удлиненном округленном обломке альбит-кальцитового состава размером 3×12 мм (рис. 2 г), вытянутом вдоль флюиальности породы, выявлен стронциевый редкоземельный карбонат – *анкилит*-(Ce) (рис. 1, 1; табл. 1). Анкилитсодержащий обломок также является фрагментом раздробленной жилки, сформированной в условиях подвижной флюидизированной массы. Минерал кристаллизовался в кальците в виде мелких зерен неправильной формы размером около 2–5 мкм. Натриево-кальциевый редкоземельный карбонат *бурбанкит* и стронциево-кальциевый редкоземельный карбонат – *галгенбергит*-(Ce) (табл. 1), подобно вышеописанным редкоземельным минералам, обнаружены в кальците, образующем с альбитом жилку. Данные редкоземельные карбонаты кристаллизовались только в кальцитовых зернах как включения в виде удлиненных ксеноморфных зерен соответственно около 10 и 7 мкм по удлинению.

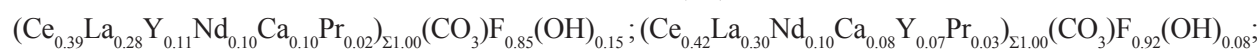
Наиболее обильной редкоземельной карбонатной минерализацией отличаются участки, сложенные кальцит-рогообманковым агрегатом (см. рис. 1 е). Они образовались за счет пропитывания карбонатными гидротермальными растворами на постмагматическом этапе становления породы, находящейся в стабильном состоянии. Редкоземельные минералы представлены в основном кальциево-стронциевым *карбоцернаитом*, реже *анкилитом*-(Ce), *дацзинианитом*-(Ce) (табл. 1). С редкоземельными карбонатами нередко ассоциируют цериевый монацит, фтор-апатит с содержанием SrO около 1.0 мас. % и с примесью $\text{SrO} = 1.45$ мас. % (рис. 1 h). Данные стронциевые редкоземельные карбонаты обычно представлены зернами с неправильными округлыми формами (рис. 1 f). Иногда в полостях внутри зерен кальцита присутствуют мелкие (4×6 мкм) кристаллы карбоцернаита ромбической сингонии (рис. 1 g). Самым крупным среди редкоземельных карбонатов, кристаллизующихся, как правило, с размерностью около 4–5 мкм и менее 1 мкм, выделяется калькинсит-(Ce) (рис. 1 j).

Таблица 1. Химический состав и эмпирические формулы редкоземельных карбонатов (мас. %)
Table 1. Chemical composition and imperial formulas of rare earth carbonates (wt. %)

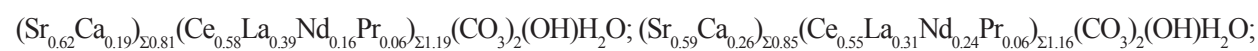
№ образца	№ п/п	CaO	SrO	Na ₂ O	BaO	Y ₂ O ₃	P ₂ O ₅	La ₂ O ₃	Ce ₂ O ₃	Pr ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃	F	CO ₂ *	H ₂ O*	сумма
Бастнезит-(Ce)															
55-12	1	2.34	–	–	–	5.40	–	20.06	27.79	1.57	7.09	7.03	19.09	1.15	91.52
	2	1.87	–	–	–	3.57	–	21.26	30.13	2.09	7.14	7.63	19.11	0.59	93.39
Анкилит-(Ce)															
55-41a	1	2.48	15.03	–	–	–	–	14.76	22.34	2.49	6.45	–	20.64	4.22	88.41
55-166	1	3.68	15.77	–	–	–	–	12.90	23.00	2.36	10.37	–	22.56	4.61	95.26
Дациншанит-(Ce)															
55-41	1	22.17	12.72	–	4.91	–	8,62	7,64	8,87	0,38	1.54	–	23.76	3.24	93.85
Галгенбергит-(Ce)															
55-166	1	11.40	1.95	–	–	–	–	12.35	22.04	2.21	9.74	–	29.56	3.02	92.27
	2	11.94	2.99	–	–	–	–	13.02	23.36	2.08	9.36	–	31.25	3.20	97.19
Кальциоанкилит-(Ce)															
55-41a	1-1	11.80	17.75	–	–	–	–	15.18	20.25	1.27	4.39	–	27.80	5.69	104.13
	1-2	11.46	17.63	–	–	–	–	13.91	19.55	0.92	3.63	–	26.66	5.45	99.21
Бурбанкит															
55-166	1	14.4	19.57	9.98	3.35	–	–	2.48	7.0	0.93	5.31	–	32.42	–	95.44
Карбоцернаит															
55-41a	1	18.84	19.41	1.38	4.89	–	–	5.92	9.53	–	1.74	–	30.99	–	92.70
55-28	1	15.40	12.27	4.80	4.89	–	–	9.74	12.58	–	2.17	–	32.08	–	93.93
	2-1	8.87	18.87	2.53	9.88	–	–	6.60	6.19	–	2.84	–	25.57	–	81.35
	2-2	14.41	15.29	2.04	4.22	–	–	8.33	11.59	–	2.61	–	27.94	–	86.43
	2-3	12.78	16.63	–	3.78	–	–	8.87	12.99	2.27	2.78	–	25.38	–	85.48
	2-4	13.70	17.41	1.91	3.20	–	–	7.92	9.72	–	2.17	–	27.08	–	83.11
55-32	1	25.09	25.46	–	1.35	–	–	4.08	5.59	–	1.15	–	33.78	–	96.50
	2	9.05	29.07	2.69	3.16	–	–	4.02	6.17	–	1.89	–	27.37	–	83.42
	3	15.42	18.70	–	3.56	–	–	7.93	10.00	–	1.81	–	26.35	–	83.77
55-41	1	14.50	22.59	–	3.23	–	–	7.87	9.27	–	1.94	–	27.01	–	86.42
	2	14.81	24.56	–	2.05	–	–	7.44	9.17	–	1.28	–	27.42	–	86.73
	3	15.18	25.79	0.87	2.61	–	–	7.68	9.64	–	1.73	–	29.94	–	93.44
Калькинсит-(Ce)															
55-41a	1	2.57	–	–	–	–	–	21.87	34.26	1.66	8.86	–	29.82	4.07	103.1
	2	2.57	–	–	–	–	–	21.68	34.29	2.61	7.95	–	29.77	4.06	102.9
	3	9.14	–	–	–	–	–	16.41	28.63	0.84	6.66	–	31.89	4.35	97.92

Примечание. Содержание H₂O и CO₂ – расчетные данные. Формулы рассчитаны по Булах и др., 2014.
Content of H₂O and CO₂ – calculated data. Formulas are calculated according to Bulakh et al., 2014.

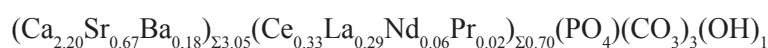
Бастнезит-(Ce)



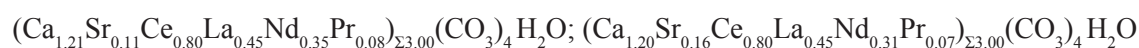
Анкилит-(Ce)



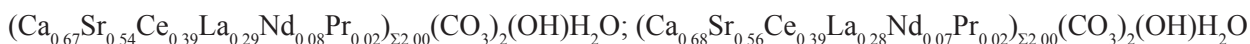
Дациншанит-(Ce)



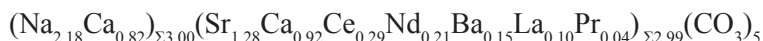
Галгенбергит-(Ce)



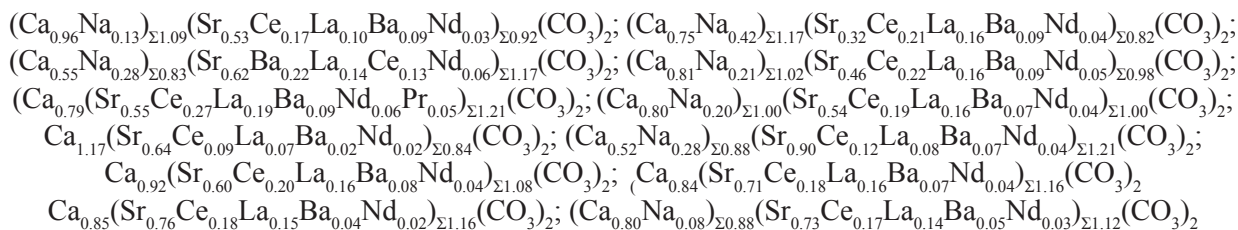
Кальциоанкилит-(Ce)



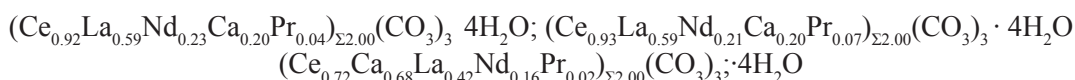
Бурбанкит



Карбоцернаит



Калькинсит-(Ce)



Его размеры могут достигать до 20 мкм, что значительно превышает таковые для данной группы минералов в несколько раз. Нередко редкоземельные карбонаты имеют неоднородное строение, что объясняют, скорее всего, сменой температуры и вариативностью химического состава поступающих флюидов. Например, в зерне карбоцернаита (рис. 1 i) хорошо видно замещение ранней Ba-Sr-генерации минерала более поздней, обедненной стронцием и барием (табл. 1, обр. 55–28, № п/п 2–1 – 2-4), в виде заливообразной каймы, глубоко проникающей в зерно. В случае замещения карбоцернаита апатитом (см. рис. 1 h), в последнем обнаруживаются высокие содержания (в масс. %) $\text{SrO} = 2.91$, $\text{La}_2\text{O}_3 = 1.02$, $\text{Ce}_2\text{O}_3 = 2.44$. Тенденция снижения стронция в редкоземельных карбонатах при карбонатизации породы за счет вторичных низкотемпературных процессов, подтверждается развитием в этих же зонах калькинсита. Таким образом, прослеживается тенденция в эволюции химического состава карбонатно-щелочных растворов, отражающейся в составе редкоземельных карбонатов, образованных во время становления дайковой породы (в кальцит-альбитовых жилах) и на постмагматической стадии (в кальцит-амфиболовых участках). В синмагматических щелочно-карбонатных альбит-кальцитовых жилах, раздробленных и дезинтегрированных под воздействием флюидизированной массы, кристаллизовались в основном низкотемпературные карбонаты, обогащенные редкоземельными элементами (бастнезит-(Ce), анкилит-(Ce), галгенбергит-(Ce)), а на постмагматическом этапе формирования породы в карбонатизированных участках образуются карбонатные минералы с пониженным количеством редких земель (карбоцернаит). Подобная эволюция развития редкоземельной карбонатной минерализации в эксплозивных дайковых породах отражает весьма продолжительное и многоэтапное становление парагенетически связанных с ними карбонатитов. Эволюционная картина минерализации редкоземельных карбонатов может быть связана с разной глубиной зарождения карбонатно-щелочных флюидов, различающихся содержанием редкоземельных элементов и стронция.

Бариевые минералы, представленные сульфатом, алюмосиликатом, реже карбонатом, в породе имеют большее распространение, чем редкоземельные карбонаты и кристаллизовались в различных минеральных ассоциациях на всем протяжении становления флюидно-эксплозивных дайковых пород. *Барит* развивается по спайности флогопита (рис. 3 а), или образует крупные зерна с размерностью 1×2 мм в кальцит-серпентиновой псевдоморфозе по оливину (рис. 3 b). В барите, кристаллизующемся в пироксене (рис. 3 с), обнаружены примеси SrO_2 (3.2–7.9 масс. %), а в случае развития по трещинам обломочного хромшпинелида, содержание SrO_2 в нем составляет 2.48 масс. %. Наибольшее распространение барита характерно для альбит-кальцитовых жилок (рис. 2 i, k) и зон постмагматической карбонатизации (рис. 1 e), где он находится в ассоциации с редкоземельными карбонатами. В последнем случае отмечается кристаллизация стронциевого барита (табл. 2), замещаемого целестинобаритом (рис. 3 d). В синмагматических альбит-карбонатных жилах в участках

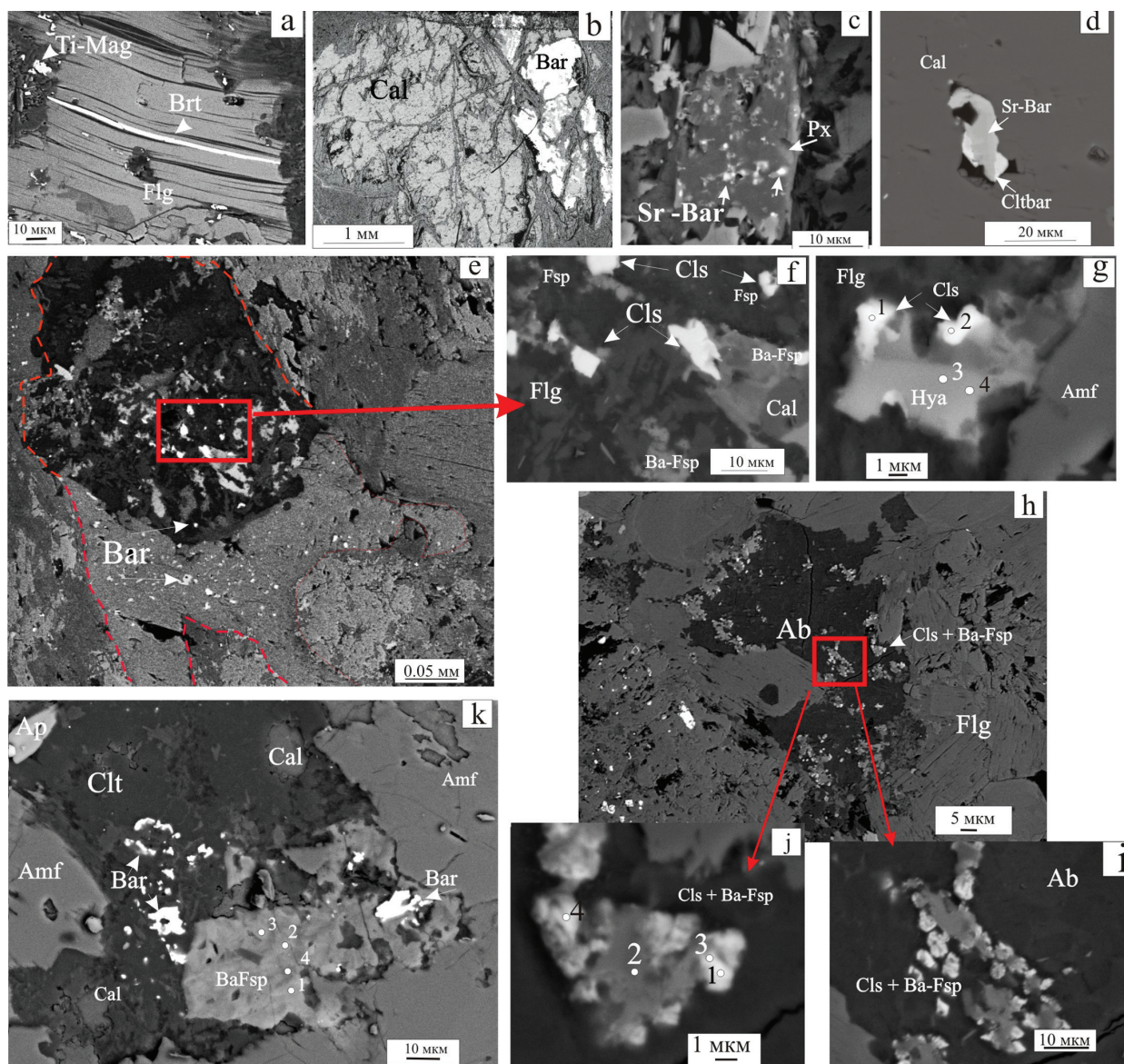


Рис. 3 Бариевая минерализация (СЭМ-снимки).

а – барит (Brt) развивается по спайности флогопита (Phl); б – кристаллизация барита в кальцитовых псевдоморфах по оливину; в – развитие стронциевого барита в пироксене; д – стронциевый барит (Sr-Brt) замещается целестинобаритом (Brt-Clt); е – обломок флогопит-полевошпат-кальцитового состава в сростании с кальцитовым агрегатом; ф – фрагмент обломка, представленного на рис. 3 е. Развитие цельзиана (Cls) и бариевого калиевого полевого шпата (Ba-Fsp) (табл. 3, обр. 55-41а-1); г – цельзиан (Cls) замещают бариевый калиевый полевошпат (Ba-Fsp) (табл. 2, обр. 55-32); з – кристаллизация калиевого полевого шпата в зоне альбитизации; и – агрегат калиевого полевого шпата и цельзиана (более светлый); ж – цельзиан (Cls) замещает калиевый полевошпат (Fsp) (табл. 3, обр. 55-41а); к – кристаллизация барита (Brt) и бариевого полевого шпата (Ba-Fsp) в цеолитовом (Clt) агрегате, развивающемся по кальциту (Cal) (табл. 3, обр. 55-32а).

Fig. 3 Barium mineralization (SEM – images).

а – barite (Brt) develops along the cleavage of phlogopite (Phl); б – barite crystallization in calcite pseudomorph after olivine; в – development of strontium barite in pyroxene; д – strontium barite (Sr-Brt) is replaced by celestinobarite (Brt-Clt). SEM – image; е – fragment of phlogopite-feldspar-calcite composition intergrown with calcite aggregate; ф – a fragment of the fragment shown in fig. 3 f. Development of Celsian (Cls) and barium potassium feldspar (Ba-Fsp) (tabl. 3, sample 55-41a-1); г – celsian (Cls) replace barium potassium feldspar (Ba-Fsp) (tabl. 2. Samples 55-32); з – is the crystallization of potassium feldspar in the albitization zone; и – aggregate of potassium feldspar and Celsian (lighter); ж – celsian (Cls) replaces potassium feldspar (Fsp) (tabl. 3, samples 55-41a); к – crystallization of barite (Brt) and barium feldspar (Ba-Fsp) in a zeolite (Clt) developing over calcite (Cal) (tabl. 3, samples 55-32a).

Таблица 2 Химический состав и имперические формулы бариевых сульфатов (мас. %)
Table 2 Chemical composition and imperial formulas of barium sulfates (wt. %)

№ образца	№ зерна	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	FeO	MgO	SrO	BaO	SO ₂	Сумма
Целестинобарит										
55-16б	1	–	0.38	0.37	0.25	–	35.68	22.24	39.3	98.22
55-16	1	–	–	1.01	–	–	40.7	17.9	41.2	101.8
Барит										
55-15б	1	–	–	0.50	–	–	1.90	64.10	34.40	101.00
	2	–	–	0.90	–	–	6.10	58.40	34.80	101.70
55-16	1	–	–	0.90	–	–	3.55	64.00	36.69	105.40
	2	–	–	1.73	–	–	15.58	48.80	37.69	103.80
55-35	1	1.42	–	3.77	1.08	1.95	2.50	58.85	33.51	103.1
55-32	1	0.83	–	0.00	–	–	–	62.31	32.59	95.73
	2	1.88	–	0.37	0.71	–	2.84	59.14	34.23	99.17
55-3	1	1.00	–	0.00	–	–	1.87	58.42	31.34	92.63

Примечание.

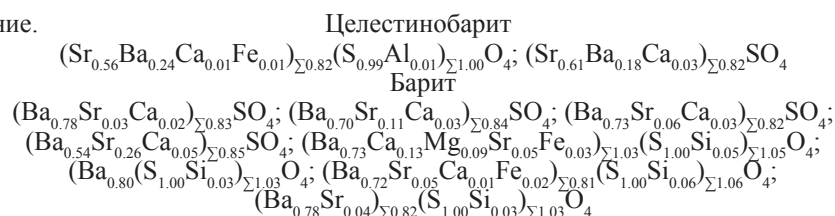
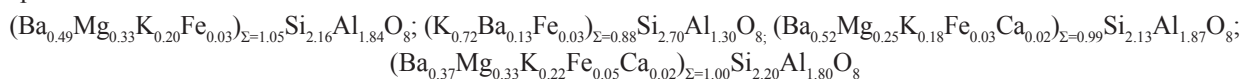
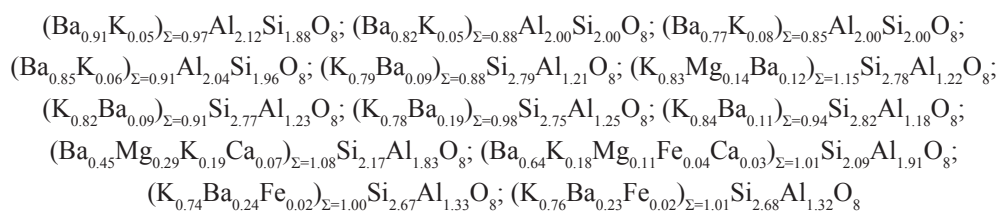


Таблица 3. Химический состав и имперические формулы бариевых алюмосиликатов (мас. %)
Table 3. Chemical composition and imperial formulas of barium aluminosilicates (wt. %)

№ образца	№ зерна	№ п/п	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	FeO	BaO	CaO	MgO	сумма	Миналы, %	
											Ортоклаз	Цельзиан
55-41a	1	1–1	30.50	42.00	3.00	0.90	24.16	–	4.30	104.86	29	71
		1–2	21.40	52.20	10.90	0.80	6.62	–	–	91.92	84	16
		1–3	31.70	42.30	2.74	0.84	26.40	0.32	3.27	107.57	26	74
		1–4	31.50	45.40	3.50	1.40	19.60	0.40	4.60	106.40	37	63
55-41a-1	1	1	29.60	30.80	0.70	–	38.10	–	–	99.20	5	95
	2	1	30.80	36.36	0.76	–	38.13	–	–	106.05	6	94
	3	1	31.97	37.76	1.22	–	36.77	–	–	107.72	9	91
	4	1	31.10	35.30	0.87	–	39.00	–	–	106.27	7	93
	5	1	24.05	65.49	14.50	–	5.34	–	–	109.38	10	90
55-32a	1	1–1	22.47	60.54	14.10	1.54	6.80	–	2.09	107.54	86	14
		1–2	23.49	61.97	14.40	–	5.04	–	–	104.90	90	10
		1–3	20.78	54.02	12.00	–	9.28	0.25	–	96.33	80	20
		1–4	21.40	60.17	14.00	–	5.85	–	–	101.42	88	12
55-32	1	1–1	30.97	43.17	2.99	2.06	22.94	1.24	3.89	107.26	30	70
		1–2	29.80	38.29	2.65	0.97	30.10	0.50	1.40	103.71	21	78
		1–3	21.28	50.41	11.00	0.53	11.56	–	–	94.78	75	25
		1–4	21.76	52.16	11.56	0.49	11.57	–	–	97.54	77	23

Примечание.





кристаллизации кальцита барит образует своеобразные сростания с кварцем, подобные эмульсионной структуре (рис. 2 f; h). В зонах постмагматической *альбитизации* (рис. 3 h) появляется *гиалофан* ($\text{BaO} = 6.62$ масс. %) в виде микрозерен неправильных очертаний с размерностью около 10 мкм. В дальнейшем минерал в краевых частях замещается цельзианом (рис. 3 j; i) с примесью железа (0.9–1.4 масс. %), кальция (0.0–0.4 масс. %) и магния (3.27–4.3 масс. %) (табл. 3). Доля изоморфной примеси BaO в гиалофане в некоторых случаях составляет 11.56–22.94 масс. %. Данный минерал так же, как цельзиан замещает калиевый полевой шпат (рис. 3 g). Многочисленные включения цельзиана (рис. 3 f) в виде собственных зерен (5–10 мкм) обнаружены в обломке (0.3×0.4 мм), сложенном метасоматическими минералами – флогопитом, бариевым калиевым полевым шпатом и кальцитом. Цельзиан развит исключительно в участке кристаллизации бариевого калиевого полевого шпата, с количеством $\text{BaO} = 5.34$ масс. % (табл. 3). Данные бариевые алюмосиликаты примечательны отсутствием примесей. Постмагматический кальцит подвержен процессам цеолитизации до практически полного замещения. В цеолитовом агрегате (рис. 3 g) кальцит диагностируется в виде мелких реликтовых фрагментов. Развивающийся здесь же гиалофан с пойкилитовыми включениями цеолита характеризуется неравномерным распределением бария (табл. 3) и присутствием железа, кальция и магния. Изменчивый состав минерала отражается в его пятнистой структуре, отображенной на электронном снимке (рис. 3 k). Таким образом, гиалофан и цельзиан в основном представлены как продукты изоморфного замещения бариевого калиевого полевого шпата (рис. 3 j), реже в виде собственных зерен. Минерализация бариевых алюмосиликатов свидетельствует о скачкообразном характере поступления флюидов как на магматическом, так и на постмагматическом этапе. Флогопит в породе, как отмечалось ранее (Костюхин и др., 1987), в силу своей метасоматической природы имеет несколько генераций. На электронном снимке рис. 3 а хорошо видны реликтовые участки замещаемого флогопита в виде более темных пятен, характеризующегося небольшим количеством бария (0.6 масс. %) по отношению новообразованному (2.69 масс. %).

Заключение

Во флюидно-эксплозивных дайковых породах установлено большое разнообразие редкоземельных карбонатов, содержащих Sr: анкилит-(Ce), кальциоанкилит-(Ce), бурбанкит, карбоцернатит, дациншанит-(Ce), галгенбергит-(Ce); а также бесстронциевые: бастнезит-(Ce), калькинсит-(Ce). Основными носителями Ba в данных породах являются сульфаты, алюмосиликаты, реже карбонаты (барит, стронциевый барит, целестинобарит, барийсодержащий калиевый полевой шпат, гиалофан, цельзиан). Sr и Ba были обнаружены также в флогопите, апатите, кальците. Бариево – стронциевая минерализация в данных породах дополнительно подтверждает парагенетическую связь с карбонатитовым магматизмом и общность карбонатно-щелочных флюидов, участвовавших в формировании карбонатно-щелочной системы. Процессы минерализации в дайковых породах проходили в весьма сложных условиях, характеризующихся нестабильностью долгоживущей данной системы и многоступенчатостью формирования пород. Дальнейшее изучение минерализации дайковых пород расширит представление об их генезисе и рудном потенциале.

Литература

1. Булах А.Г., Золотарев А.А., Кривовичев В.Г. Структуры, изоморфизм, формулы. Классификация минералов. СПб: Изд-во СПбГУ. 2014. 133 с.
2. Голубева И.И., Ремизов Д.Н., Бурцев И.Н., Филиппов В.Н., Шуйский А.С. Флюидо-эксплозивные ультрамафиты дайкового комплекса Среднего Тимана и их парагенетическая связь с карбонатитами // Региональная геология и металлогения. 2019. № 80. С. 30–44.

3. Голубева И.И., Мокрушин А.В., Филиппов В.Н., Бурцев И.Н. Хромшпинелиды флюидо-эксплозивных даек Среднего Тимана // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. Апатиты, 2020. С. 112–115. <https://doi.org/10.31241/FNS.2020.17.022>.
4. Голубева И.И., Шуйский А.А., Филиппов В.Н., Бурцев И.Н. Обобщенный опыт изучения и диагностики конвергентных пород на примере карбонатизированных флюидоэксплозивных ультрамафитов дайкового комплекса среднего Тимана // Вестник Пермского университета. 2021. Т. 20. № 1. С. 11–23. <https://doi.org/10.17072/psu.geol.20.1.11>.
5. Голубева И.И., Леденцов В.А., Бурцев И.Н. Эволюция изотопии углерода и кислорода карбонатито-щелочной флюидо-эксплозивной структуры (Средний Тиман) // Современные направления развития геохимии. 2022. Т. 1. С. 138–142.
6. Довжикова Е.Г., Бакулина Л.П. Состав и строение ксенокристаллов и глубинных включений в пикритах Четласского камня // Известия Коми НЦ. 2018. № 2. С. 56 – 63.
7. Костюхин М.И., Степаненко В.И. Байкальский магматизм Канино-Тиманского региона. Л.: Наука, 1987. 232 с.
8. Ковальчук Н.С., Шумилова Т.Г., Степаненко В.И. Редкоземельная минерализация в карбонатитах ко-сьюского массива (Средний Тиман). Зап. РМО. № 3. 2013 С. 109–132.
9. Макеев А.Б., Лебедев В.А., Брянчанинова Н.И. Магматиты Среднего Тимана. Екатеринбург: УрО РАН. 2008. 348 с.
10. Недосекова И.Л., Владыкин Н.В., Удоратина О.В., Ронкин Ю.Л. Карбонатиты четласского комплекса (Средний Тиман): геохимические и изотопные данные // ЕЖЕГОДНИК-2012. Тр. ИГТ УрО РАН. 2013. Вып. 160. С. 150–158.
11. Недосекова И.Л., Замятин Д.А., Удоратина О.В. Рудная специализация карбонатных комплексов Урала и Тимана // Литосфера. 2017. Т. 17. № 2. С. 60–77.
12. Недосекова И.Л., Удоратина О.В., Владыкин Н.В., Прибавкин С.В., Гуляева Т.Я. Петрохимия и геохимия дайковых ультрабазитов и карбонатитов Четласского комплекса (Средний Тиман) // ЕЖЕГОДНИК-2010. Тр. ИГТ УрО РАН. 2011. Вып. 158. С. 122–130.
13. Петрографический кодекс. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования. Издание второе. С.- Петербург. 2008. 197 с.