

УДК 552.313/.332(1-924.16)

Геология, петрография и минералогия взрывчатых брекчий массива Салланлатва, Кольский регион

М. Ю. Сидоров*, Е. Н. Козлов, Е. Н. Фомина

*Геологический институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия;
e-mail: sidorov@geoksc.apatity.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9992-6617>

Информация о статье Реферат

Поступила в редакцию
15.01.2021;

получена
после доработки
09.03.2021

Ключевые слова:

взрывчатые брекчий,
карбонатиты,
массив Салланлатва,
позднемагматические
процессы,
карбонатитовый
расплав

Массив Салланлатва принадлежит к группе палеозойских щелочно-ультраосновных комплексов, широко проявленных в пределах Кольского региона (северо-западная часть Фенноскандинавского щита). В центральной части этого массива среди ийолитов и уртитов находятся крупные тела кальцитовых, анкеритовых, анкерит-доломитовых и сидеритовых карбонатитов. Одна из последних стадий карбонатитового магматизма в массиве Салланлатва – проявление взрывчатых процессов, приведших к образованию брекчированных пород с карбонатитовым цементом, расположенных в кальцитовых и анкерит-доломитовых карбонатитах. Проведенные петрографические и минералогические исследования позволили выделить два типа взрывчатых брекчий в массиве: (1) брекчий с глиммеритовыми обломками и кальцитовым цементом и (2) брекчий с сидеритовыми обломками и хлорит-доломитовым цементом. Анализ минерального состава и формы обломков в брекчиях, а также минерального состава цемента показал, что первым во вмещающие кальцитовые и анкерит-доломитовые карбонатиты внедрилось вещество, сформировавшее брекчий со слабо окатанными и угловатыми обломками флогопитовых глиммеритов и кальцитовым цементом. После этого по зонам трещиноватости проникал расплав силикатно-доломитового состава, в результате чего образовались брекчий с угловатыми сидеритовыми обломками и хлорит-доломитовым цементом. Различия в минеральном составе цемента брекчий предполагают, что остаточные карбонатитовые расплавы поступали из отдельных магматических камер, причем камера с расплавами кальцитового состава располагалась на большой глубине и часть захваченных обломков глиммеритов подверглась абразии при движении расплава. Силикатно-доломитовые расплавы поднимались с меньшей глубины и захваченные обломки сидеритовых карбонатитов сохранили угловатую форму. Поздние гидротермальные процессы проявились в образовании в брекчиях и вмещающих их породах прожилков и каверн с Ba-Sr-P-S-Ti-REE минерализацией.

Для цитирования

Сидоров М. Ю. и др. Геология, петрография и минералогия взрывчатых брекчий массива Салланлатва, Кольский регион. Вестник МГТУ. 2021. Т. 24, № 1. С. 57–68. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2021-24-1-57-68>.

Geology, petrography and mineralogy of explosive breccias of Sallanlatva, Kola Region

Mikhail Yu. Sidorov*, Evgeniy N. Kozlov, Ekaterina N. Fomina

*Geological Institute KSC RAS, Apatity, Murmansk region, Russia;
e-mail: sidorov@geoksc.apatity.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9992-6617>

Article info

Received
15.01.2021;
received in revised
09.03.2021

Key words:

explosive breccias,
carbonatites,
Sallanlatva,
late magmatic
processes,
carbonatite melt

Abstract

The Sallanlatva massif belongs to the group of Paleozoic alkaline-ultrabasic complexes wide spread in the Kola Region (the northwestern part of the Fennoscandian Shield). In the central part of this massif, the host ijolite and urtites contain calcite, ankerite, ankerite-dolomite and siderite carbonatites. The explosive processes that led to the formation of carbonatite breccias in the calcite and ankerite-dolomite carbonatites occurred in Sallanlatva massif in the last stages of the carbonatite magmatism. There are two types of explosive carbonatite breccias in the Sallanlatva massif: (1) glimmerite-calcite carbonatite breccias, and (2) siderite-dolomite breccias. Analysis of the mineral composition of fragments and matrix and the shape of fragments in breccias has shown that the first material to intrude into the host calcite and ankerite-dolomite carbonatites was calcite melt. After that, dolomite melt penetrated through the fracture zones, which resulted in the formation of siderite-dolomite breccias. The differences in the mineral composition of the breccia matrix suggest that the residual carbonatite melts originate from separate magma chambers. The chamber with calcite melt was located at great depth, and some captured glimmerite fragments were abraded during the melt upwelling. Silicate-dolomite melts lifted from a shallower depth; the captured fragments of siderite carbonatites retained their angular shape. Late hydrothermal processes yielded veins and caverns with Ba-Sr-P-S-Ti-REE mineralization in the breccias and host rocks.

For citation

Sidorov, M. Yu. et al. 2021. Geology, petrography and mineralogy of explosive breccias of Sallanlatva, Kola Region. *Vestnik of MSTU*, 24(1), pp. 57–68. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2021-24-1-57-68>.

Введение

Карбонатиты, часто встречающиеся в щелочно-ультраосновных комплексах (*Kapustin, 1980; Mitchell, 2005*), являются уникальными магматическими геологическими объектами с общей для большинства из них последовательностью образования от ранних кальциокарбонатитов через магнезиокарбонатиты к поздним феррокарбонатитам (*Jones et al., 2013; Wall et al., 2004*). Кроме породообразующих карбонатов Ca, Mg и Fe для карбонатитовых массивов характерна весьма разнообразная и уникальная минерализация, с которой связаны скопления минералов Fe, P, Ba, Sr, а также высокозарядных (HFSE – Nb, Zr, Ti) и редкоземельных (REE) элементов, что делает карбонатитовые массивы важнейшим источником множества полезных ископаемых. Выявленные в карбонатитовых комплексах критически важные для современной промышленности месторождения HFSE и REE занимают лидирующие позиции как по запасам, так и по объемам добычи. Значительная часть этих месторождений связана с поздними гидротермальными или карботермальными процессами, поэтому изучение поздних этапов образования и преобразования карбонатитов является актуальным как в прикладном, так и в фундаментальном аспектах (*Mitchell, 2015; Richardson et al., 1995; Simandl et al., 2018*). Ценную информацию о протекании поздних процессов может дать исследование разнообразных брекчированных пород с карбонатитовым и силикокарбонатитовым цементом, часто формирующихся на завершающихся этапах становления карбонатитовых массивов. Позднемагматические и постмагматические (в том числе эксплозивные) процессы, приведшие к образованию карбонатитовых и силикокарбонатитовых брекчий, а также их положение в общей последовательности карбонатитогенеза еще далеки от полного понимания и привлекают пристальный интерес (*Andersson et al., 2013; Bolonin, 2018; Le Bas, 2008*).

В исследовании мы даем описание геологии, петрографии и минералогии карбонатитовых эксплозивных брекчий, выявленных в породах щелочно-ультраосновного массива Салланлатва, который, несмотря на проведенные в 1970–1980 гг. масштабные геологоразведочные работы (*Афанасьев, 2011*), остается все еще малоизученным по сравнению с другими подобными массивами Кольской щелочной провинции (КАР – Kola Alkaline Province).

Геология массива Салланлатва

Массив Салланлатва был найден в 1957 г. при проверке аэромагнитной аномалии и предварительно разведан в 1957–1958 гг. (*Серба, 1962*). Детальные геологоразведочные работы по изучению запасов пироклор-луешитовых карбонатитов, барит-сидеритовых руд и баритовых кор выветривания проводились в период 1978–1988 гг. скважинами глубиной до 500 м (*Афанасьев, 2011*).

Салланлатва относится к массивам центрального типа (рис. 1), характеризующихся размещением карбонатитов в центре комплекса более ранних силикатных щелочно-ультраосновных пород (*Kapustin, 1980*), которые в данном массиве представлены (от ранних пород к молодым) мельтейгитами краевой зоны, ийолитами внутренней зоны и небольшими телами уртитов (*Кухаренко и др., 1965*). Площадь массива на современном эрозионном срезе составляет около 4,2 кв. км. Мельтейгиты образуют дугообразное тело латеральной мощностью 80–100 м и представляют собой тонкозернистые породы с флюидально-полосчатой текстурой. Простираение полосчатости в мельтейгитах, выраженной ленточными агрегатами диопсида и нефелина или призматическими кристаллами диопсида, параллельно контурам интрузии и погружается к центру массива под углами 60–70° (*Zaitsev et al., 2004; Кухаренко и др., 1965*). Из аксессуарных минералов в мельтейгитах отмечены титаномагнетит, титанит, апатит.

К центру массива мельтейгиты постепенно переходят в ийолиты за счет увеличения в них содержания нефелина. Ийолиты слагают центральную часть массива, образуя зону шириной 0,5–1 км, и представляют собой в основном среднезернистые массивные, порфирировидные, иногда полосчатые породы, сложенные эгирин-диопсидом и нефелином, в меньших количествах присутствуют апатит, магнетит, титанит, меланит и перовскит. В ийолитах, расположенных вблизи карбонатитов, появляется кальцит. Также во внутренней части ийолитовой зоны встречены многочисленные тела ийолит-пегматитов протяженностью до 400 м и гнездо- и жилообразные тела крупнозернистых уртитов, в западной части массива образующих крупное тело шириной до 200 м. От вмещающих протерозойских метабазальтов массив отделен зоной фенинизации, мощность которой достигает 1,5 км.

Карбонатиты, расположенные в центральной части массива на площади 0,67 кв. км, образуют трубообразную крутопадающую залежь и прослеживаются разведочными скважинами до глубины 500 м. От ийолитов и уртитов они отделены резкими контактами, мощность зоны флогопитизации во вмещающих ийолитах и урритах на контакте с карбонатитами достигает 8 м. Внешняя зона сложена самыми ранними и наиболее распространенными кальцитовыми карбонатитами, в которых встречаются обломки измененных ийолитов и уртитов, содержание которых может достигать 40–50 %. Отличительной особенностью этих карбонатитов является высокое, экономически значимое содержание ниобия, связанное с луешитом

и, в меньшей степени, пироксеном. Возраст кристаллизации циркона из кальцитовых карбонатитов (U-Pb датирование) оценивается в 375 ± 5 млн лет (Zaitsev et al., 2004), что согласуется с возрастными образованиями других палеозойских карбонатитовых комплексов Кольского региона и Финляндии (Kramm et al., 2004): Ковдор ($372 \pm 1,5$ млн лет), Озерная Варакса ($369 \pm 5,3$ млн лет), Сокли (366 ± 10 млн лет), карбонатиты Хибинского массива ($366,6 \pm 47$ млн лет). Анкеритовые и анкерит-доломитовые карбонатиты представлены во внутренней зоне карбонатитовой залежи, переходы между этими разновидностями постепенные. Самыми поздними являются сидеритовые карбонатиты, которые образуют многочисленные тела в центре залежи и характеризуются полосчатой, линзовидной или брекчиевидной структурой. В сидеритовых карбонатах распространен барит (до 13,8 %), запасы которого весьма значительны. Следует отметить, что приведенное выше разделение карбонатитов по типам согласно (Афанасьев, 2011) не является единственным, другая типизация карбонатитов по составу и времени образования приведена в (Sitnikova et al., 2001; Zaitsev et al., 2004), что указывает на необходимость дополнительных исследований этого вопроса. В карбонатитах также выявлены жильобразные зоны франколитовых и хлорит-карбонатных (силикокарбонатитовых) пород. Карбонатиты почти по всей площади перекрыты корами выветривания средней мощностью 14,2 м, на которых залегают четвертичные отложения мощностью 2–7 м, из-за чего прослеживание контактов между породами крайне затруднено.

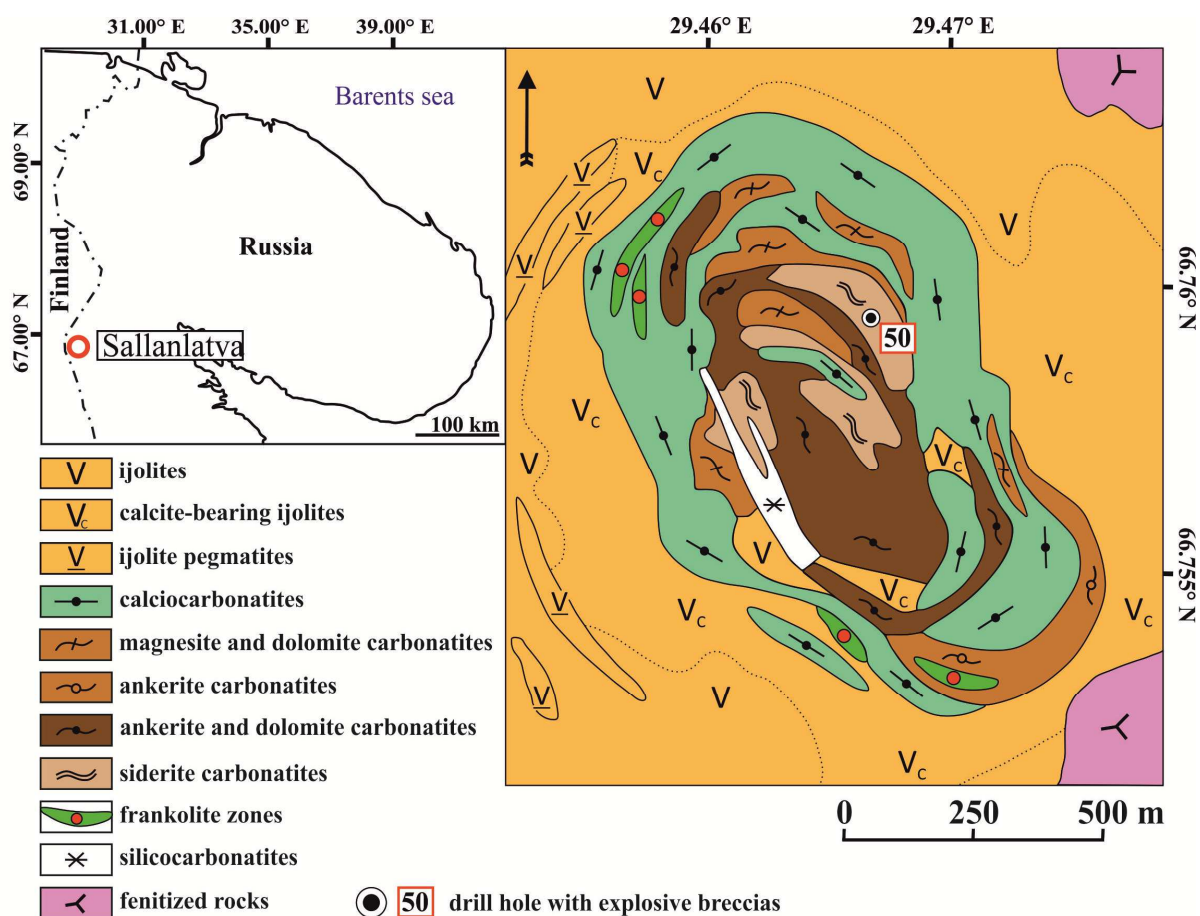


Рис. 1. Схема геологического строения центральной части щелочно-ультраосновного карбонатитового массива Салланлатва (Афанасьев, 2011) с упрощениями. На врезке – положение массива в пределах Кольского региона. Упомянутые в тексте мельтейгиты и уртиты на схеме не указаны

Fig. 1. Geological scheme of the Sallanlatva alkaline-ultrabasic carbonatite complex, simplified (Afanasyev, 2011). The inset indicates the position of the complex within the Kola Region.

Melteigites and urtites mentioned in the text are not shown in the scheme

Широкое распространение сидеритовых карбонатитов, а также значительные концентрации ниобия в луешите, а не в пироксене, позволяют назвать массив Салланлатва уникальным по сравнению с другими карбонатитовыми щелочно-ультраосновными массивами КАР.

Материалы и методы

Образцы взрывчатых пород и вмещающих их пород отбирались из керна одной из разведочных скважин (скважина № 50, рис. 1). После макроскопического описания и фотодокументации из образцов были изготовлены стандартные петрографические шлифы для микроскопического описания структуры и текстуры пород и изучения их минерального состава. В шлифах без покровного стекла проводилась диагностика минеральных фаз и изучался их количественный химический состав методом рентгеноспектрального анализа, который проводился в ресурсном центре Санкт-Петербургского государственного университета "Геомодель" на электронном микроскопе Hitachi S-3400N с ЭДС-приставкой AzTec Energy 350 (аналитик Н. С. Власенко).

Результаты и обсуждение

Геологическое положение взрывчатых пород

Взрывчатые карбонатитовые породы в массиве Салланлатва обнаружены только в пяти скважинах из более чем 50 пробуренных в этом массиве (Афанасьев, 2011), на дневной поверхности породы из-за мощных кор выветривания и четвертичных отложений не найдены и морфология их тел не установлена. Мы исследовали образцы керна наклонной скважины № 50 (рис. 1), которой были вскрыты два почти вертикально залегающих тела взрывчатых карбонатитовых пород. По направлению от центра массива к его краю первая порода вскрыта в интервале 175,0–191,8 м (истинная мощность 9,3 м), вторая порода вскрыта в интервале 228,0–258,0 м (истинная мощность 11,2 м). Выше- и нижележащими по положению в скважине породами для пород являются анкерит-доломитовые карбонатиты, в интервале между породами залегают кальцитовые карбонатиты с обломками ийолитов. Из-за небольшого выхода керна, полученного при бурении интервалов с взрывчатыми породами, обусловленного механическими свойствами этих пород, довольно сложно установить характер взаимоотношений между разными типами пород, а также между породами и вмещающими их породами.

Петрография взрывчатых пород

По составу преобладающих обломков и карбонатитового цемента изученные взрывчатые породы массива Салланлатва разделяются на два типа. Для пород первого типа характерны обломки флогопитовых глимеритов и ксенокристаллы флогопита в кальцитовом цементе (рис. 2, а). Обломки глимеритов хаотично ориентированы, их размер варьирует от 0,3 до 15 мм, а содержание достигает 20 % от объема пород. Глимериты на 95–97 % сложены мелкозернистым флогопитом, на долю пирохлора, магнетита, барита, апатита приходится не более 3–5 %. По форме обломки могут быть как угловатыми, так и сглаженными ("окатанными") (рис. 2, в); иногда встречаются обломки, где наблюдается сочетание обеих форм. Ксенокристаллы флогопита до 0,5 мм в длину распространены значительно реже, их содержание не превышает 3–5 %. Кальцитовый цемент представляет собой тонкозернистую массивную массу, в которой встречены мелкие (до 0,1 мм) вкрапленники анкерита. Из второстепенных минералов в кальцитовом цементе присутствуют пирохлор, барит, стронцианит, пирит, галенит, сфалерит, халькопирит, анкилит, магнетит, ильменит, оксиды титана (рутил и анатаз), хлорит, апатит, бредлеит.

Породы второго типа состоят из обломков сидеритовых карбонатитов в хлорит-доломитовом цементе. Обломки сидеритовых карбонатитов всегда остроугольные (рис. 2, б и г), иногда наблюдаются следы растворения на их гранях, размер обломков составляет 0,05–10 мм, а содержание – не менее 70–80 %. В некоторых участках пород второго типа встречен "двойной" цемент: сидеритовые обломки первоначально были цементированы пиритом или баритом, а затем – доломитом. Хлорит-доломитовый цемент является тонкозернистой массивной породой, в которой на долю хлорита, выполняющего небольшие каверны и прожилки, приходится не более 10–15 %. В сидеритовых обломках часто встречаются ксеноморфные зерна магнетита, в цементе распространены апатит, барит, витерит, пирит, стронцианит, анкилит и апатит. Морфология выделений барита, стронцианита, апатита, ильменита, оксидов титана и анкилита не отличается от таковой в породах первого типа и вмещающих породах. Это указывает на то, что на последних этапах магматической деятельности на взрывчатые породы и вмещающие их породы воздействовали гидротермальные флюиды, несущие Ba, Sr, P, S, Ti, Fe, REE.

Оба выделенных типа пород встречены как в верхнем, так и в нижнем интервалах по скважине. Следует отметить, что в других скважинах взрывчатые породы в качестве обломков содержат мельтейгиты, ийолиты, кальцитовые карбонатиты и флогопит-франколитовые породы, а минеральный состав цемента не отличается от описанного выше (Афанасьев, 2011).

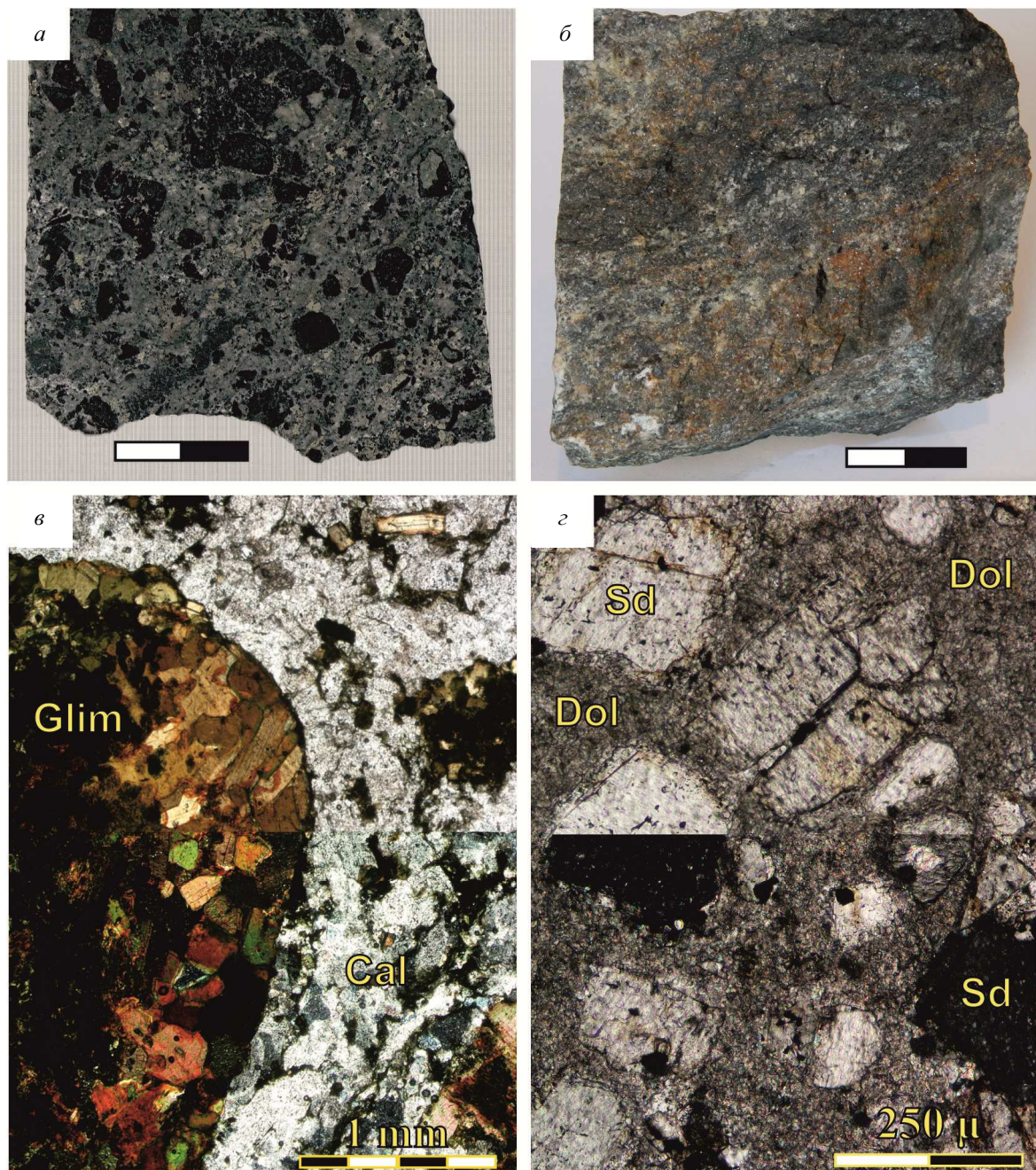


Рис. 2. Карбонатитовые взрывные брекчии массива Салланлатва:

a – фотография образца брекчии с глиммеритовыми обломками и кальцитовым цементом;

б – фотография брекчии с сидеритовыми обломками и доломитовым цементом

(длина масштабных линеек 2 см); *в* – фотография шлифа брекчии с глиммеритовыми обломками и кальцитовым цементом, верхняя половина фотографии сделана без анализатора, нижняя половина – с анализатором; *г* – фотография брекчии с сидеритовыми обломками и доломитовым цементом, верхняя половина фотографии сделана без анализатора, нижняя половина – с анализатором.

Обозначения: Glim – обломки глиммеритов, Cal – кальцитовый цемент,

Sd – сидеритовые обломки, Dol – доломитовый цемент

Fig. 2. Carbonatite explosive breccias of the Sallanlatva massif: *a* – the sample of glimmerite-calcite breccias; *b* – the sample of siderite-dolomite breccias (the field width for Figures *a* and *b* is 2 cm);

v – the thin section of glimmerite-calcite breccias, the top – in plane-polarized light, the bottom – in cross-polarized light; *z* – the thin section photo of siderite-dolomite breccias, the top – in plane-polarized light, the bottom – in cross-polarized light. Symbols: Glim – glimmerite fragments, Cal – calcite matrix, Sd – siderite fragments, Dol – dolomite matrix

Минералогия взрывчатых брекчий

Минеральный состав взрывчатых карбонатных брекчий характеризуется большим разнообразием (ниже по тексту приведены формулы лишь тех фаз, чьи кристаллохимические формулы не полностью отвечают "идеальным" формулам соответствующих минералов). Представительные химические анализы породообразующих минералов брекчий приведены в таблице.

Карбонаты составляют основной объем брекчий и представлены как в обломках, так и в цементе брекчий. Доломит $[Ca_{0,5}Mg_{0,3-0,4}Fe_{0,2}CO_3]$ является основным минералом цемента брекчий с сидеритовыми обломками. Кальцит $[Ca_{0,9-1,0}Mg_{0,0-0,1}Fe_{0,0-0,1}(CO_3)]$ образует цемент в брекчиях с глиммеритовыми обломками. Сидерит $[Fe_{0,7-0,9}Mg_{0,1-0,2}Mn_{0,0-0,1}(CO_3)]$ встречается в виде обломков в доломитовом цементе (рис. 3, а). Витерит $[Ba_{0,9-1,0}Sr_{0,0-0,1}(CO_3)]$ отмечен в виде отдельных зерен в барите. Анкилит-(Ce) $[(Ce_{0,5-0,6}La_{0,3-0,4}Nd_{0,1}Pr_{0,1})_{0,9-1,0}Sr_{1,0-1,1}(CO_3)_2(OH)(H_2O)]$ выполняет мелкие прожилки и каверны в цементе брекчий. Стронцианит обычно образует ксеноморфные зерна в цементе в ассоциации с баритом, встречается в виде прожилков и вместе с анкилитом-(Ce) и поздним баритом выполняет каверны.

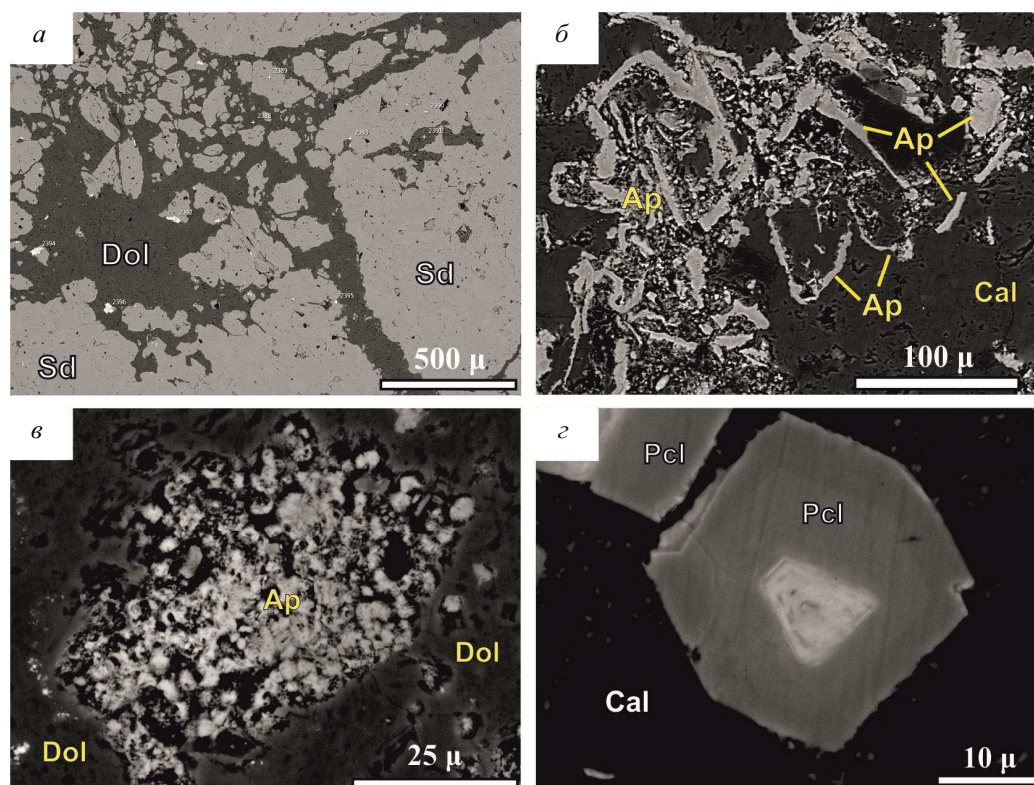


Рис. 3. Минералы взрывчатых брекчий массива Салланлатва:

а – обломки сидерита в доломитовом цементе; б – прожилки апатита в кальците;
 в – каверна с апатитом в доломите; з – зональный кристалл пирохлора в кальците.

Изображения в обратно-рассеянных электронах (BSE).

Обозначения: Cal – кальцит, Sd – сидерит, Dol – доломит, Ap – апатит, Pcl – пирохлор

Fig. 3. Minerals of the explosive breccias of the Sallanlatva massif:

а – siderite fragments in dolomite matrix; б – apatite veins in calcite;
 в – the apatite cavity in dolomite; з – the zoned pyrochlore crystal in calcite. Back-scattered electron images.

Symbols: Cal – calcite, Sd – siderite, Dol – dolomite, Ap – apatite, Pcl – pyrochlore

Из сульфатов в взрывчатых брекчиях выявлен лишь барит. Он встречается в обломках глиммеритов и сидеритовых карбонатов и в кальцитовом и хлорит-доломитовом цементе. В цементе барит образует крупные ксеноморфные агрегаты и прожилки.

Фосфаты представлены апатитом $[(Ca_{4,7-5,0}Na_{0,3}Mn_{0,0-0,1}Fe_{0,1}Sr_{0,1})_{5,0-5,1}(PO_4)_{2,9-3,0}(F_{0,0-0,6}OH_{0,4-1,0})]$, который встречается в виде небольших зерен и прожилков (рис. 3, б и в) в цементе брекчий и бредлеитом $[(Na_{2,2-2,6})(Mg_{0,3-0,4}Fe_{0,4}Mn_{0,1})_{0,9}(P_{1,1}O_4)(CO_3)]$, безводным карбонато-фосфатом Na и Mg со значительной примесью Fe, который образует небольшие включения в пирите. Ранее бредлеит был найден в массиве Салланлатва как дочерний минерал во флюидных включениях и в виде твердофазных включений в луешите и магнетите в кальцитовых карбонатах (Zaitsev et al., 2004).

Силикаты представлены флогопитом $[(K_{0,9}Na_{0,0-0,1})_{0,9-1,0}(Fe^{2+}_{0,8-1,8}Mg_{1,2-2,1}Ti_{0,2})_{3,0-3,1}(Si_{2,8-2,9}Al_{1,1})_{3,9}O_{10}(OH)_2]$, из которого состоят глиммеритовые обломки и ксенокристаллы, и тонкозернистыми агрегатами минералов группы хлорита переменного состава, которые вместе с доломитом образуют цемент брекчий.

Сульфиды представлены в основном пиритом $[Fe_{0,9-1,0}Co_{0,0-0,1}S_2]$, который встречается в виде вкрапленников кубических кристаллов и как цементирующая масса для обломков сидерита. В меньшей степени распространены галенит $[Pb_{1,00Fe_{0,0-0,1}}S]$, халькопирит, сфалерит $[Zn_{0,8-0,9}Fe_{0,1-0,2}S]$, главным образом встречающиеся в виде мелких включений в кристаллах пирита.

Оксиды представлены магнетитом $[Fe^{2+}_{1,0-1,2}Fe^{3+}_{1,5-2,00}Si_{0,0-0,2}Ti_{0,0-0,1}O_4]$, а также небольшими кристаллами пирохлора. В кристаллах пирохлора часто наблюдается зональность (рис. 3, з): сильно трещиноватая центральная зона $[(Ca_{0,3}Ce_{0,1}Ba_{0,1}Na_{0,1}U_{0,1})_{0,7}(Nb_{1,5-1,65}Fe^{3+}_{0,2}Ti_{0,1}Ta_{0,1})_{1,9-2,0}O_6(OH)]$ и внешняя часть с хорошо проявленной осцилляторной зональностью $[(Ca_{0,9}Na_{0,5-1,0}Ce_{0,1})_{1,5-2,0}(Nb_{1,6-1,9}Si_{0,0-0,2}Ti_{0,0-0,2})_{1,9-2,0}O_6(F_{0,8-1,0}OH_{0,0-0,2})_{1,0}]$. Ильменит $[Fe_{0,9-1,0}Ti_{0,8-1,0}Nb_{0,0-0,2}O_3]$ и оксиды титана, представленные очень тонкозернистыми сращениями рутила и анатаза, часто со значительным содержанием Nb, выполняют поздние тонкие прожилки в цементе брекчий.

Таблица. Химический состав (мас.%) породообразующих минералов брекчий.

Обозначения: Sd – сидерит, Dol – доломит, Chl – хлорит, Cal – кальцит,

Phl_{Gl} – флогопит в глиммеритах, Phl_{Xcr} – ксенокристаллы флогопита

Table. Chemical composition (wt.%) of rock forming minerals in breccias.

Symbols: Sd – siderite, Dol – dolomite, Chl – chlorite, Cal – calcite, Phl_{Gl} – phlogopite in glimmerites,

Phl_{Xcr} – phlogopite xenocrystals

	Брекчии с обломками сидеритовых карбонатитов и силикатно-доломитовым цементом (скв. № 50, глубина 186,0 м)					Брекчии с обломками флогопитовых глиммеритов и кальцитовым цементом (скв. № 50, глубина 229,5 м)					
	Sd	Sd	Dol	Dol	Chl	Cal	Cal	Phl _{Gl}	Phl _{Gl}	Phl _{Xcr}	Phl _{Xcr}
Na ₂ O	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,38	–
K ₂ O	–	–	–	–	–	–	–	10,14	9,81	9,31	9,64
CaO	0,22	0,20	28,26	28,53	0,63	52,71	51,53	–	–	–	–
SrO	–	–	0,18	0,26	–	0,31	0,57	–	–	–	–
MnO	3,47	3,81	1,69	1,59	–	–	0,70	–	–	–	–
MgO	3,23	4,78	10,75	11,66	11,29	–	–	18,69	15,54	15,59	16,68
FeO*	53,56	51,46	15,79	13,71	27,99	–	0,86	14,99	18,02	17,61	16,17
FeOcalc	–	–	–	–	26,86	–	–	–	–	–	–
Fe ₂ O ₃ calc	–	–	–	–	1,25	–	–	–	–	–	–
Al ₂ O ₃	–	–	–	–	11,45	–	–	10,98	13,25	11,71	12,89
SiO ₂	–	–	–	–	24,24	–	–	39,34	37,05	37,22	37,54
TiO ₂	–	–	–	–	–	–	–	0,65	0,95	2,22	1,18
CO ₂ calc	38,66	39,26	44,71	44,62	–	41,50	41,64	–	–	–	–
H ₂ Ocalc	–	–	–	–	9,39	–	–	3,98	3,91	3,89	3,93
Сумма	99,14	99,51	101,38	100,37	85,11	94,52	95,30	98,77	98,53	97,93	98,03
	Количество анионов: кислорода – для силикатов, (CO ₃) ²⁻ – для карбонатов										
p.f.u.	2	2	2	2	14	1	1	11	11	11	11
Na	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,057	–
K	–	–	–	–	–	–	–	0,975	0,960	0,915	0,938
Ca	0,009	0,008	0,992	0,997	0,086	0,997	0,971	–	–	–	–
Sr	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Mn	0,111	0,120	0,047	0,044	–	–	0,010	–	–	–	–
Mg	0,182	0,266	0,525	0,571	2,140	–	–	2,100	1,776	1,791	1,897
Fe ²⁺	1,697	1,606	0,433	0,376	2,856	–	0,013	0,945	1,156	1,135	1,032
Fe ³⁺	–	–	–	–	0,120	–	–	–	–	–	–
Al ^{VI}	–	–	–	–	0,798	–	–	0,940	1,038	0,931	1,023
Al ^{IV}	–	–	–	–	0,918	–	–	0,035	0,159	0,132	0,136
Si	–	–	–	–	3,082	–	–	2,965	2,841	2,868	2,864
Ti	–	–	–	–	–	–	–	0,037	0,055	0,129	0,068

Примечание: FeO* – суммарное содержание Fe₂O₃ и FeO.

Последовательность формирования эксплозивных брекчий Салланлатвы

Брекчированные породы широко распространены во многих карбонатитовых массивах КАР и наиболее подробно изучены в Ковдорском карбонатитовом массиве (*Balaganskaya, 1994; Demaiffe et al., 2001*), где при исследовании взаимоотношений между породами и по преобладающему минеральному составу цемента были выделены три цикла образования автомагматических, флюидно-эксплозивных и эруптивных брекчий – апатито-силикатный, кальцитовый и, самый поздний, доломитовый. Как уже было сказано, качество первичного материала не позволяет установить характер взаимоотношений и последовательность внедрения двух выделенных типов эксплозивных брекчий в массиве Салланлатва, однако, основываясь на минеральном составе обломков и их форме, а также минеральном составе цемента, можно сделать выводы о последовательности образования этих пород. В брекчиях первого типа наиболее распространены угловатые обломки глиммеритов, однако встречаются обломки со сглаженными краями и обломки, в которых наблюдаются сочетания обеих форм. В литературе, посвященной генезису брекчий, в том числе и магматических, указывается, что степень сглаженности обломков позволяет качественно оценить расстояние, на которое обломки переносились расплавом или флюидом – чем меньше угловатость обломков, тем больше расстояние, на которое эти обломки переносились, так как механическая и химическая абразия приводит к их сглаживанию (*Jébrak, 1997; Shukla et al., 2018*). Таким образом, преимущественно угловатые обломки глиммеритов переносились на незначительное расстояние, которое в то же время было большим, чем расстояние, на которое переносились сидеритовые обломки в брекчиях второго типа при условии одинаковой устойчивости глиммеритов и сидеритовых карбонатитов к воздействию карбонатитового расплава.

Следует отметить, что для обоих типов брекчий характерно присутствие таких общих минералов, как барит, стронцианит, анкилит, пирохлор, магнетит, апатит, пирит и другие сульфиды, ильменит, рутил и анатаз. Значимых вариаций в морфологии и химическом составе этих минералов не выявлено, что указывает на их образование или до начала брекчирования – пирохлор, магнетит, сульфиды, барит, а также минералы, из которых состоят обломки флогопитовых глиммеритов и сидеритовых карбонатитов, или после брекчирования в результате воздействия поздних наложенных гидротермальных процессов – стронцианит, анкилит, апатит, ильменит, рутил, анатаз. В процессе брекчирования образовались только минералы цемента брекчий: кальцит, доломит, хлорит.

Механизм формирования эксплозивных брекчий Салланлатвы

В настоящее время наиболее распространены три гипотезы о происхождении карбонатитовых магм: (1) за счет фракционной кристаллизации карбонат-силикатного расплава, (2) из-за жидкостной несмесимости карбонатитовых и силикатных расплавов в пределах одного магматического очага, (3) в результате подъема со значительной глубины и последующей дифференциации первичного карбонатитового расплава в промежуточных камерах (*Bell et al., 2004; Jones et al., 2013*). Многие исследователи отмечают, что во время образования одного массива карбонатитовые расплавы могут возникать разными способами. Последовательность образования карбонатитов в массиве Салланлатва, изложенная у разных авторов (*Zaitsev et al., 2004; Афанасьев, 2011*), в общих чертах совпадает: кальцитовые карбонатиты – доломитовые и анкерит-доломитовые карбонатиты – сидеритовые карбонатиты. При этом кальцитовые карбонатиты расположены в краевой части карбонатитовой залежи и граничат с ийолитами, которые на контакте изменены до глиммеритов, а доломитовые и сидеритовые карбонатиты находятся в ее центральной части. Если предположить, что карбонатитовые расплавы разного состава поднимались из расположенных на разной глубине камер, то можно прийти к следующим выводам. После внедрения кальцитовых карбонатитов, которые изменяли вмещающие их ийолиты до глиммеритов, из магматической камеры, послужившей их источником и расположенной на наибольшей глубине, расплав перестал поступать и камера перешла в равновесное состояние (рис. 4, а). Затем образовались тела доломитовых, анкерит-доломитовых и сидеритовых карбонатитов (рис. 4, б и в), поступившие из своих отдельных, расположенных ближе к поверхности камер. В магматической камере – источнике кальцитовых карбонатитов – кальцитовый расплав оставался еще в достаточных количествах и находился в таких термодинамических условиях, которые привели к его взрывному внедрению в ранее образованные породы вместе с захваченными обломками глиммеритов (рис. 4, з), при этом обломки, расположенные ближе всего к камере и перенесенные на большее расстояние, подверглись абразии. Из камеры, послужившей источником карбонатитов доломитового состава и расположенной вблизи кристаллизовавшихся сидеритовых карбонатитов, также произошел взрывной выброс оставшегося доломитового расплава через сидеритовые карбонатиты, при этом обломки последних переместились на незначительное расстояние и сохранили свою угловатость (рис. 4, д). Мы полагаем, что брекчии с кальцитовым цементом образовались первыми, так как должно было пройти достаточно много времени для активизации магматической камеры с остаточным кальцитовым расплавом после ухода его основной массы, и приблизительно такое же время, предположительно, должно было пройти для активизации

остаточного доломитового расплава в своей камере, а поскольку кальцитовые карбонатиты образовались первыми, то и поступление остаточного кальцитового расплава, приведшего к образованию брекчий, произошло раньше по сравнению с остаточным доломитовым.

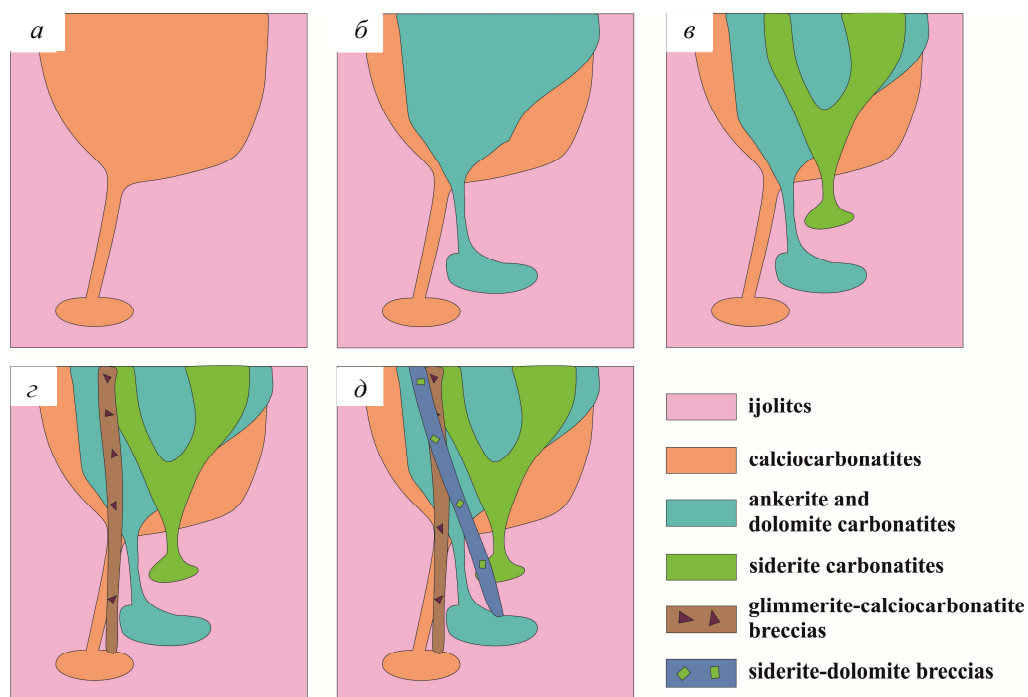


Рис. 4. Модель образования карбонатитовых взрывных брекчий в массиве Салланлатва.

Объяснения см. в тексте

Fig. 4. Model for the origin of the explosive breccias in the Sallanlatva massif.

See the text for explanations

Заключение

Эксплозивные процессы, приведшие к образованию брекчированных пород в кальцитовых и анкерит-доломитовых карбонатитах массива Салланлатва, проявились на последних стадиях карбонатитового магматизма. Изучение петрографических особенностей и минерального состава этих пород позволили выявить два типа взрывных карбонатитовых брекчий в массиве: (1) брекчии со слабо окатанными угловатыми обломками флогопитовых глиммеритов и кальцитовым цементом и (2) брекчии с угловатыми сидеритовыми обломками и хлорит-доломитовым цементом. Оба типа брекчий залегают совместно. Изучение минерального состава и морфологии обломков, а также минерального состава цемента брекчий показало, что первым во вмещающие кальцитовые и анкерит-доломитовые карбонатиты внедрился кальцитовый расплав, приведший к образованию брекчий со слабо окатанными и угловатыми обломками флогопитовых глиммеритов и кальцитовым цементом. После этого в оставшиеся зоны трещиноватости проникал силикатно-доломитовый расплав, в результате чего образовались брекчии с угловатыми сидеритовыми обломками и хлорит-доломитовым цементом. Наличие двух типов брекчий, различающихся по составу карбонатитового цемента и степени сглаженности обломков, указывает на существование отдельных, расположенных на разной глубине источников карбонатитовых расплавов, в которых на позднемагматических этапах их развития протекали сходные термодинамические процессы, приведшие к взрывному выбросу остаточных расплавов и образованию брекчий. Камера с расплавами кальцитового состава располагалась на большой глубине, и часть захваченных обломков флогопитовых глиммеритов подверглась механической или химической абразии при продвижении расплава. Силикатно-доломитовые расплавы поднимались из своей камеры с меньшей глубины и прошли незначительное расстояние через тела сидеритовых карбонатитов, что позволило захваченным обломкам сидеритовых карбонатитов сохранить угловатую форму. В ходе поздних гидротермальных процессов, наложенных на брекчии и вмещающие породы на постмагматическом этапе развития массива, образовались многочисленные жилки и каверны с Ba-Sr-P-S-REE минерализацией.

Благодарности

Авторы выражают глубочайшую благодарность сотрудникам Территориального фонда геологической информации по Северо-Западному федеральному округу (ТФГИ СЗФО) за оказанное содействие при отборе материала. Работа выполнена в рамках исследовательского проекта Российского научного фонда "Механизм образования поздних редкометалльных (PЗЭ, Nb) карбонатитов: от магмогенерации до гипергенеза"

№ 19-77-10039. Отбор керна производился из коллекции ТФГИ по СЗФО в рамках темы НИР Ги ФИЦ КНЦ РАН № 0226-2019-0053.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Афанасьев Б. В. Минеральные ресурсы щелочно-ультраосновных массивов Кольского полуострова. СПб. : Роза ветров, 2011. 224 с.
- Кухаренко А. А., Орлова М. П., Булах А. Г., Багдасаров Э. А. [и др.]. Каледонский комплекс ультраосновных, щелочных пород и карбонатитов Кольского полуострова и Северной Карелии. М. : Недра, 1965. 772 с.
- Серба Б. И. Салланлатвинский массив щелочных пород и карбонатитов // Магматические образования Кольского полуострова. М. ; Л. : Изд-во АН СССР, 1962. С. 58–64.
- Andersson M., Malehmir A., Troll V. R., Dehghannejad M. [et al.]. Carbonatite ring-complexes explained by caldera-style volcanism // *Scientific Reports*. 2013. Vol. 3, N 1. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep01677>.
- Balaganskaya E. G. Breccias of the Kovdor phoscorite-carbonatite deposit and their geological meaning // *Zapiski Rossiiskogo Mineralogicheskogo Obshchestva*. 1994. Vol. 2. P. 21–36.
- Bell K., Rukhlov A. S. Carbonatites from the Kola Alkaline Province: Origin, evolution and source characteristics // *Phoscorites and Carbonatites from Mantle to Mine: the Key Example of the Kola Alkaline Province* / eds.: A. N. Zaitsev, F. Wall. Mineralogical Society of Great Britain and Ireland, 2004. P. 433–468. DOI: <https://doi.org/10.1180/mss.10.13>.
- Bolonin A. V. The chemical mechanism of the formation of fluorite-barite-siderite carbonatite in Karasug Fe-F-Ba-Sr-REE deposit // *Open Journal of Geology*. 2018. Vol. 8, Iss. 4. P. 399–403. DOI: <https://doi.org/10.4236/ojg.2018.84023>.
- Demaiffe D., Verhulst A., Balaganskaya E., Kirnarsky Y. The Kovdor ultramafic, carbonatitic and alkaline complex (Kola Peninsula, Russia): Evidence for multi-source evolution // *Journal of African Earth Sciences*. 2001. Vol. 32, Iss. 1. P. A15–A16. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0899-5362\(01\)90033-8](https://doi.org/10.1016/S0899-5362(01)90033-8).
- Jébrak M. Hydrothermal breccias in vein-type ore deposits: A review of mechanisms, morphology and size distribution // *Ore Geology Reviews*. 1997. Vol. 12, Iss. 3. P. 111–134. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0169-1368\(97\)00009-7](https://doi.org/10.1016/S0169-1368(97)00009-7).
- Jones A. P., Genge M., Carmody L. Carbonate melts and carbonatites // *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 2013. Vol. 75, Iss. 1. P. 289–322. DOI: <https://doi.org/10.2138/rmg.2013.75.10>.
- Kapustin Y. L. Mineralogy of carbonatites. New Delhi : Amerind Publishing, 1980. 259 p.
- Kramm U., Sondern S. Timing of Kola ultrabasic, alkaline and phoscorite-carbonatite magmatism // *Phoscorites and Carbonatites from Mantle to Mine: the Key Example of the Kola Alkaline Province* / eds.: F. Wall, A. N. Zaitsev. Mineralogical Society of Great Britain and Ireland, 2004. P. 75–97. DOI: <https://doi.org/10.1180/MSS.10.03>.
- Le Bas M. J. Fenites associated with carbonatites // *The Canadian Mineralogist*. 2008. Vol. 46, Iss. 4. P. 915–932. DOI: <https://doi.org/10.3749/canmin.46.4.915>.
- Mitchell R. H. Carbonatites and carbonatites and carbonatites // *The Canadian Mineralogist*. 2005. Vol. 43, Iss. 6. P. 2049–2068. DOI: <https://doi.org/10.2113/gscanmin.43.6.2049>.
- Mitchell R. H. Primary and secondary niobium mineral deposits associated with carbonatites // *Ore Geology Reviews*. 2015. Vol. 64. P. 626–641. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.03.010>.
- Phoscorites and carbonatites from mantle to mine: the key example of the Kola Alkaline Province / eds.: F. Wall, A. N. Zaitsev. Mineralogical Society of Great Britain and Ireland, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1180/MSS.10>.
- Richardson D. G., Birkett T. C. Carbonatite-associated deposits // *Geology of Canadian Mineral Deposit Types*. Geological Society of America, 1995. P. 541–558. DOI: <https://doi.org/10.1130/dnag-gna-p1.541>.
- Shukla M. K. A brief review on breccia: It's contrasting origin and diagnostic signatures // *Solid Earth Sciences*. 2018. Vol. 3, Iss. 2. P. 50–59. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sesci.2018.03.001>.
- Simandl G. J., Paradis S. Carbonatites: Related ore deposits, resources, footprint, and exploration methods // *Applied Earth Science*. 2018. Vol. 127, Iss. 4. P. 123–152. DOI: <https://doi.org/10.1080/25726838.2018.1516935>.
- Sitnikova M. A., Zaitsev A. N., Wall F., Chakhmouradian A. R. et al. Evolution of chemical composition of rock-forming carbonates in Sallanlatvi carbonatites, Kola Peninsula, Russia // *Journal of African Earth Sciences*. 2001. Vol. 32, Iss. 1. P. A34. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0899-5362\(01\)90063-6](https://doi.org/10.1016/S0899-5362(01)90063-6).
- Zaitsev A. N., Sitnikova M. A., Subbotin V. V., Fernández-Suárez J. [et al.]. Sallanlatvi complex – a rare example of magnesite and siderite carbonatites // *Phoscorites and Carbonatites from Mantle to Mine: the Key Example of the Kola Alkaline Province* / eds.: F. Wall, A. N. Zaitsev. Mineralogical Society of Great Britain and Ireland, 2004. P. 201–245. DOI: <https://doi.org/10.1180/MSS.10.07>.

References

- Afanasyev, B. V. 2011. Mineral resources of the alkaline-ultramafic massifs of Kola Peninsula. St. Petersburg. (In Russ.)
- Kukharenko, A. A., Orlova, M. P., Bulakh, A. G., Bagdasarov, E. A. et al. 1965. The Caledonian Complexes of Ultrabasic-Alkaline and Carbonatite Rocks on Kola Peninsula and in Northern Karelia. Moscow. (In Russ.)
- Serba, B. I. 1962. Sallanlatva massif of alkaline rocks and carbonatites. In *Magmatic Formations of the Kola Peninsula*. Leningrad-Moscow, pp. 58–64. (In Russ.)
- Andersson, M., Malehmir, A., Troll, V. R., Dehghannejad, M. et al. 2013. Carbonatite ring-complexes explained by caldera-style volcanism. *Scientific Reports*, 3(1). DOI: <https://doi.org/10.1038/srep01677>.
- Balaganskaya, E. G. 1994. Breccias of the Kovdor phoscorite-carbonatite deposit and their geological meaning. *Zapiski Rossiiskogo Mineralogicheskogo Obshchestva*, 2, pp. 21–36.
- Bell, K., Rukhlov, A. S. 2004. Carbonatites from the Kola Alkaline Province: Origin, evolution and source characteristics. In *Phoscorites and Carbonatites from Mantle to Mine: the Key Example of the Kola Alkaline Province*. Eds.: A. N. Zaitsev, F. Wall. Mineralogical Society of Great Britain and Ireland, pp. 433–468. DOI: <https://doi.org/10.1180/mss.10.13>.
- Bolonin, A. V. 2018. The chemical mechanism of the formation of fluorite-barite-siderite carbonatite in Karasug Fe-F-Ba-Sr-REE deposit. *Open Journal of Geology*, 8(4), pp. 399–403. DOI: <https://doi.org/10.4236/ojg.2018.84023>.
- Demaiffe, D., Verhulst, A., Balaganskaya, E., Kirnarsky, Y. 2001. The Kovdor ultramafic, carbonatitic and alkaline complex (Kola Peninsula, Russia): Evidence for multi-source evolution. *Journal of African Earth Sciences*, 32(91), pp. A15–A16. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0899-5362\(01\)90033-8](https://doi.org/10.1016/S0899-5362(01)90033-8).
- Jébrak, M. 1997. Hydrothermal breccias in vein-type ore deposits: A review of mechanisms, morphology and size distribution. *Ore Geology Reviews*, 12(3), pp. 111–134. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0169-1368\(97\)00009-7](https://doi.org/10.1016/S0169-1368(97)00009-7).
- Jones, A. P., Genge, M., Carmody, L. 2013. Carbonate melts and carbonatites. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 75(1), pp. 289–322. DOI: <https://doi.org/10.2138/rmg.2013.75.10>.
- Kapustin, Y. L. 1980. Mineralogy of carbonatites. New Delhi.
- Kramm, U., Sindern, S. 2004. Timing of Kola ultrabasic, alkaline and phoscorite-carbonatite magmatism. In *Phoscorites and Carbonatites from Mantle to Mine: the Key Example of the Kola Alkaline Province*. Eds.: F. Wall, A. N. Zaitsev. Mineralogical Society of Great Britain and Ireland, pp. 75–97. DOI: <https://doi.org/10.1180/MSS.10.03>.
- Le Bas, M. J. 2008. Fenites associated with carbonatites. *The Canadian Mineralogist*, 46(4), pp. 915–932. DOI: <https://doi.org/10.3749/canmin.46.4.915>.
- Mitchell, R. H. 2005. Carbonatites and carbonatites and carbonatites. *The Canadian Mineralogist*, 43(6), pp. 2049–2068. DOI: <https://doi.org/10.2113/gscanmin.43.6.2049>.
- Mitchell, R. H. 2015. Primary and secondary niobium mineral deposits associated with carbonatites. *Ore Geology Reviews*, 64, pp. 626–641. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.03.010>.
- Phoscorites and carbonatites from mantle to mine: the Key Example of the Kola Alkaline Province. 2004. Eds.: F. Wall, A. N. Zaitsev. Mineralogical Society of Great Britain and Ireland. DOI: <https://doi.org/10.1180/MSS.10>.
- Richardson, D. G., Birkett, T. C. 1995. Carbonatite-associated deposits. *Geology of Canadian Mineral Deposit Types*. Geological Society of America, pp. 541–558. DOI: <https://doi.org/10.1130/dnag-gna-p1.541>.
- Shukla, M. K. 2018. A brief review on breccia: It's contrasting origin and diagnostic signatures. *Solid Earth Sciences*, 3(2), pp. 50–59. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sesci.2018.03.001>.
- Simandl, G. J., Paradis, S. 2018. Carbonatites: Related ore deposits, resources, footprint, and exploration methods. *Applied Earth Science*, 127(4), pp. 123–152. DOI: <https://doi.org/10.1080/25726838.2018.1516935>.
- Sitnikova, M. A., Zaitsev, A. N., Wall, F., Chakhmouradian, A. R. et al. 2001. Evolution of chemical composition of rock-forming carbonates in Sallanlatvi carbonatites, Kola Peninsula, Russia. *Journal of African Earth Sciences*, 32(1), pp. A34. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0899-5362\(01\)90063-6](https://doi.org/10.1016/S0899-5362(01)90063-6).
- Zaitsev, A. N., Sitnikova, M. A., Subbotin, V. V., Fernández-Suárez, J. et al. 2004. Sallanlatvi complex – a rare example of magnesite and siderite carbonatites. In *Phoscorites and Carbonatites from Mantle to Mine: the Key Example of the Kola Alkaline Province*. Eds.: F. Wall, A. N. Zaitsev. Mineralogical Society of Great Britain and Ireland, pp. 201–245. DOI: <https://doi.org/10.1180/MSS.10.07>.

Сведения об авторах

Сидоров Михаил Юрьевич – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Геологический институт КНЦ РАН, мл. науч. сотрудник; e-mail: eslingur@yandex.ru, sidorov@geoksc.apatity.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9992-6617>; ул. Ферсмана, 50а, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Апатитский филиал Мурманского государственного технического университета, преподаватель

Mikhail Yu. Sidorov – 14 Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Geological Institute KSC RAS, Junior Researcher; e-mail: eslingur@yandex.ru, sidorov@geoksc.apatity.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9992-6617>;
50a Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Apatity Branch of Murmansk State Technical University, Lecturer

Козлов Евгений Николаевич – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Геологический институт КНЦ РАН, канд. геол.-минерал. наук, науч. сотрудник; e-mail: kozlov_e.n@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7809-4866>

Evgeniy N. Kozlov – 14 Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Geological Institute KSC RAS, Cand. Sci. (Geol. & Miner.), Researcher; e-mail: kozlov_e.n@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7809-4866>

Фомина Екатерина Николаевна – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Геологический институт КНЦ РАН, мл. науч. сотрудник; e-mail: fomina_e.n@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9134-943X>

Ekaterina N. Fomina – 14 Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Geological Institute KSC RAS, Junior Researcher; e-mail: fomina_e.n@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9134-943X>