

Карбонатиты в гипербазитах обрамления Ильмено-Вишневогорского щелочного комплекса (минералогия, геохимия и условия образования)

Недосекова И.Л., Прибавкин С.В., Пушкарев Е.В.

Институт геологии и геохимии Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия

Работа посвящена карбонатитам, залегающим в альпинотипных метаморфизованных массивах гипербазитов, в кровле миаскитовых интрузий Ильмено - Вишневогорского щелочного комплекса. Охарактеризована геологическая позиция карбонатитов, строение тел, распределение редкометальной и редкоземельной акцессорной минерализации, типоморфизм породообразующих минералов и геохимические особенности пород. По сравнению с карбонатитами Вишневогорского массива миаскитов, карбонатиты в гипербазитах в разной степени обогащены TR, Th, Y. Они представлены доломит - кальцитовыми разновидностями с тетраферри-флогопитом и рихтеритом и рудной пирохлоровой минерализацией. Кроме того, в гипербазитах широко развиты доломитовые карбонатиты с редкометально - редкоземельной акцессорной минерализацией - монацитом, эшинитом, ортитом, редкоземельным пирохлором, колумбитом. По данным кальцит - доломитовой, пирит - пирротиновой, ильменит - магнетитовой геотетрмометрии, особенностям состава породообразующих минералов доломит - кальцитовые карбонатиты в гипербазитах формировались в условиях альбит - кальцитовой и амфибол - доломит - кальцитовой фации, а доломитовые карбонатиты - в условиях хлорит - серицит - анкеритовой фации карбонатитов. В отличие от карбонатитов миаскитовых массивов в гипербазитах широко проявлены карбонатиты среднетемпературных фаций, ранее не известные в Ильмено - Вишневогорском щелочном комплексе и считающиеся не характерными для этого формационного типа карбонатитов.

Введение

Карбонатиты в Ильмено-Вишневогорском щелочном комплексе на Южном Урале известны с 50х годов XX века. Они детально охарактеризованы Э.М. Бонштедт - Куплетской [7], Е.С. Ильменевым [17], А.Г. Жабиным [15, 16], Е.М. Еськовой [14], Н.В. Свяжиным [35], Б.М. Роненсоном [29], В.Я. Левиным совместно с Б.М. Роненсоном [21, 22, 23, 24] и другими исследователями.

В качестве карбонатитов карбонатные образования Ильменогорско - Вишневогорского комплекса были впервые выделены А.Г. Жабиным в 1959 году по аналогии их минерального состава и геохимических особенностей с платформенными карбонатитами щелочно - ультраосновной формации пород [15]. В результате продолжительной дискуссии о правомерности отнесения к карбонатитам Ильмено-Вишневогорского комплекса большинство исследо-

Рис. 1. Схема геологического строения Ильмено - вишневогорского комплекса (по В.Я. Левину, Б.М. Роненсону и др. [1997]).

1 - граниты Аракульского массива, 2 - граниты, монзониты Аргазинского массива, 3 - миаскиты интрузивных тел, 4 - карбонатиты, автохтонные миаскиты, нефелин - полевошпатовые мигматиты, полевошпатовые породы, фениты Центральной щелочной полосы, 5 - карбонатиты Вишневогорского миаскитового массива, 6 - карбонатиты в Булдымском гипербазитовом массиве, 7 - фениты экзоконтактов миаскитовых интрузий, 8 - осадочно - вулканогенные образования Тагило - Магнитогорской зоны, 9 - плагиосланцы и кварциты сланцевого обрамления Сысертско - Ильменогорского срединного массива, 10 - кристаллические сланцы ядра срединного массива, 11 - метаморфизованные гипербазиты Булдымского массива, 12 - Кыштымский сбросо - сдвиг. I-VII – участки: I – Ишкульский, II – Байдашевский, III – Увильдинский, IV – Потанинский, V – Светлозерский, VI – Вишневогорский, VII – Булдымский.

вателей выделяют их в самостоятельный формационный тип карбонатитов карбонатит-нефелин-сиенитовой формации [8, 21], или "карбонатитов, связанных с линейными зонами щелочных метасоматитов и нефелиновыми сиенитами" [12], позднее названный Ю.А. Багдасаровым формацией "карбонатитов линейно - трещинных зон" [1, 3].

Согласно исследованиям В.Я. Левина и Б.М. Роненсона [23, 24] карбонатиты являются составной частью Ильмено-Вишневогорского карбонатит-миаскитового комплекса, сформировавшегося путем метасоматоза и анатексиса, на фронте мантийного потока карбонатитовых флюидов и интрузий миаскитового расплава. Домагматические карбонатиты, предшествующие появлению выплавок миаскитовой магмы, залегают в корневых частях интрузий миаскитов, среди нефелиновых мигматитов и фенитов ("подинтрузивный субкомплекс" по В.Я. Левину, [24]), слагая Центральную щелочную полосу, располагающуюся между Ильменогорским и Вишневогорским массивами миаскитов (рис. 1). Постмиаскитовые карбонатиты залегают в эндоконтактовой части Вишневогорского миаскитового массива ("интрузивный субкомплекс") и в его фенитовом ореоле - в фенитизированных плагиогнейсах вишневогорской свиты и в метаморфизованных массивах гипербазитов ("надинтрузивный субкомплекс").

Карбонатиты "интрузивного и подинтрузивного субкомплекса" (Вишневогорское, Потанинское, Ишкульское, Байдашевское, Светлоозерское, Увильдинское месторождения) детально изучены в последние 40 лет в процессе геологических съемок, поисков и разведок месторождений редких металлов, полевошпатового и нефелинового сырья. Результаты исследований, как упоминалось выше, изложены в нескольких монографиях и многочисленных статьях. Менее изученными являются карбонатиты "надинтрузивного субкомплекса", в частности апогипербазитовые карбонатиты с редкометально-редкоземельной минерализацией, которым посвящена эта работа.

Карбонатиты в альпинотипных метаморфизованных массивах гипербазитов, залегающих в кровле миаскитовых интрузий, в докембрийских метаморфических породах Сысертско-Ильменогорского антиклинория, установлены Н.В. Свяжиным [35], В.Я. Левиным [23], В.О. Поляковым [31]. Они обнаружены в Булдымском, Халдихинском, Спирихинском гипербазитовых массивах в Вишневых горах [24], а также в гипербазитах Ильменских гор [31]. Наиболее широко процессы карбонатитообразования проявлены в Булдымском гипербазитовом массиве, на примере которого нами будут рассмотрены основные закономерности геологического строения, минералогии и геохимии карбонатитов, залегающих в гипербазитах обрамляющих щелочной комплекс.

Геологическая позиция и строение тел карбонатитов

Булдымский гипербазитовый массив находится в северной части Ильмено-Вишневогорского щелочного комплекса, в 100 метрах к северо-западу от Вишневогорского массива миаскитов, в котором разрабатывается Вишневогорское редкометальное месторождение (см. рис. 1). Булдымский массив залегает в фенитизированных метаморфических породах вишневогорской свиты (PR1), в ядре синклинальной складки, согласно с вмещающими породами. Он представляет собой линзовидное тело площадью около 1 кв. километра и мощностью до 250 метров. Сложен массив регенерированными (метаморфическими) оливиновыми, оливин-энстатитовыми породами и серпентинитами, а в периферической части энстатит-антофиллит-актинолитовым, актинолитовыми и актинолит-хлоритовыми породами. В породах массива широко проявлены процессы амфиболизации, флогопитизации, доломитизации, хлоритизации и оталькования. Булдымский массив традиционно относился к альпинотипным гипербазитам раннего протерозоя [9, 10]. В.Я. Левин, Б.М. Роненсон относят его к платформенным гипербазитам архейско-протерозойского возраста [24].

Доломитовые жилы с апатитом, монацитом, титаномагнетитом, ильменитом, цирконом в Булдымском гипербазитовом массиве были известны с 1937 года [6]. В 1966 году Н.В. Свяжин отнес их к карбонатитам, считая их наряду с кальцитовыми карбонатитами Вишневогорского миаскитового массива, продуктами единого постмагматического процесса карбонатизации [35]. В 1981 году В.Я. Левиным в Булдымском гипербазитовом массиве были обнаружены новые разновидности редкометальных карбонатитов. При последующем изучении установлено их широкое развитие в породах массива.

Карбонатиты в Булдымском массиве залегают в системе разломов северо-восточного простирания, погружающихся в северо-западном направлении. Они представляют собой линейные метасоматические зоны

амфибол-флогопит-доломит-кальцитового состава, содержащие акцессорную редкометальную и редкоземельную минерализацию. Протяженность зон

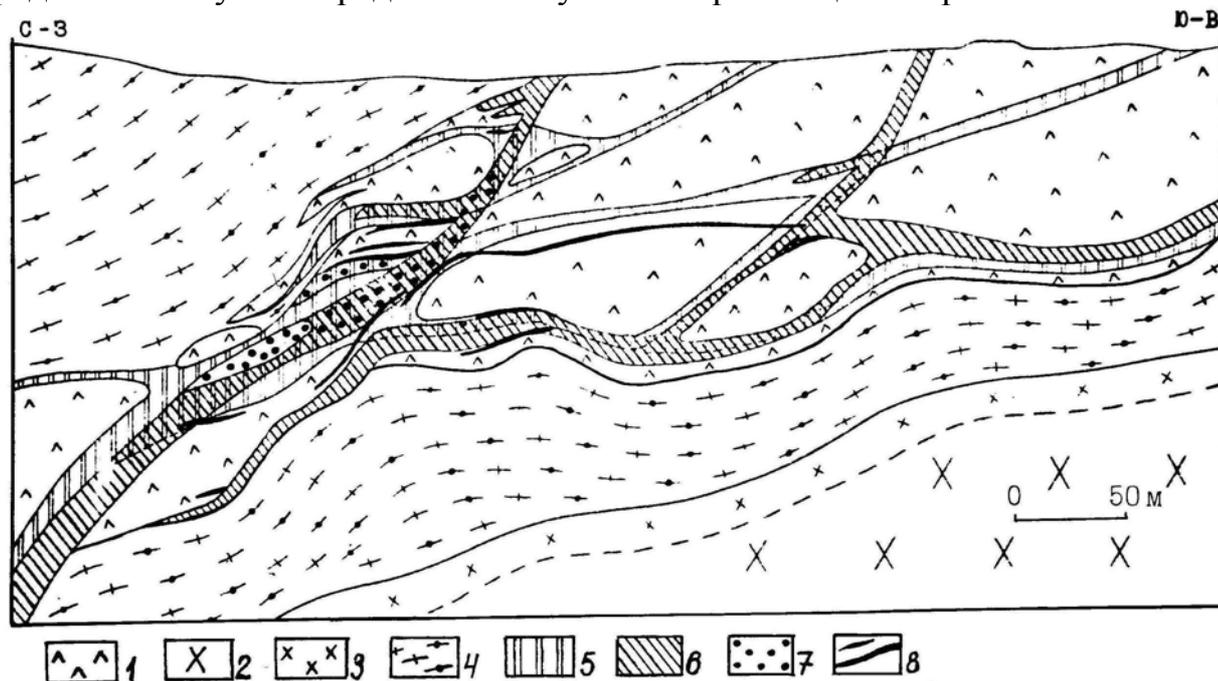


Рис. 2. Разрез Буддымского гипербазитового массива (составлен И.Л. Недосековой, 1985).

1 - оливиновые, оливин-энстатитовые породы и серпентиниты, 2 - миаскиты, 3 - сиениты, 4 - фенитизированные породы вишневогорской свиты (PR1), 5 - флогопит-рихтеритовые метасоматиты, 6 - флогопитовые метасоматиты, 7 - доломит-кальцитовые карбонатиты, 8 - доломитовые карбонатиты и хлорит-карбонат-амфиболовые метасоматиты.

составляет сотни метров, мощность до пятидесяти метров. Контакты тел с вмещающими гипербазитами неровные, извилистые. Кроме того, встречаются жильные тела пегматоидных карбонатитов, мощностью до нескольких метров.

В телах амфибол-флогопит-карбонатных метасоматитов часто проявлена зональность: центральные части сложены доломит-кальцитовыми породами, затем их сменяют доломит-кальцит-флогопитовые метасоматиты и далее доломит-кальцит-флогопит-рихтеритовые метасоматиты (рис. 2). Краевые части зон сложены хлорит-карбонат-амфиболовыми метасоматитами, часто содержащими доломит, реже кальцит, и реликтовые минералы гипербазитов - оливин и энстатит (обычно серпентинизированные). Контакты между зонами как резкие, так и постепенные. Зональность тел обусловлена уменьшением числа минералов от зоны к зоне на единицу в направлении от периферических частей тел к центральным. Полная метасоматическая колонка процесса карбонатитообразования включает 5 минеральных ассоциаций, соответствующих зонам: исходные гипербазиты / амфибол-хлорит-доломит-кальцит / рихтерит-флогопит-доломит-кальцит / флогопит-доломит-кальцит / доломит-кальцит / кальцит. Мощность центральных

доломит-кальцитовых зон не превышает десяти метров. Суммарная мощность зон карбонат-флогопитовых и карбонат-флогопит-рихтеритовых

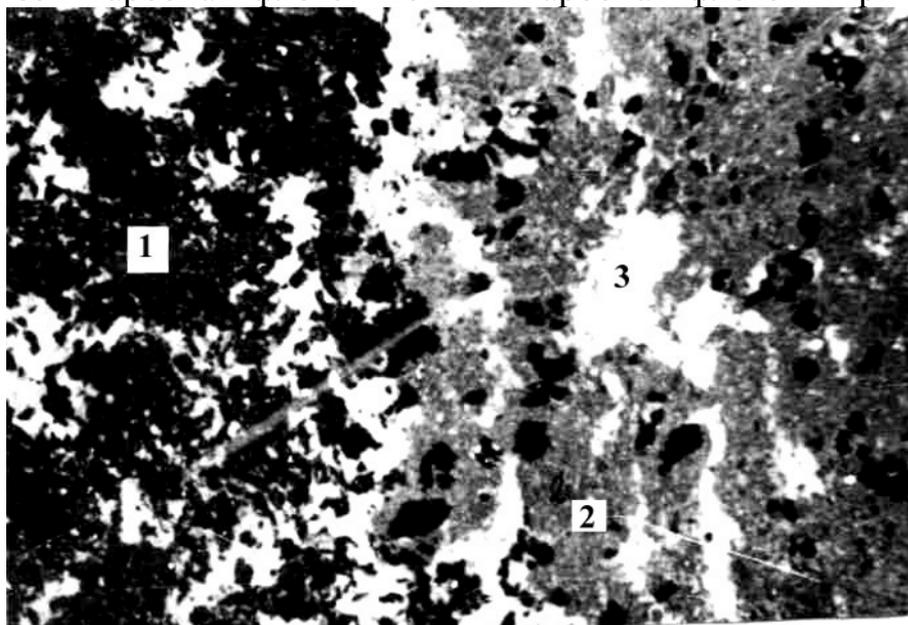


Рис. 3. Карбонат-флогопит-рихтеритовый метасоматит (ув. 0,6х, полировка штуфа).

Черное - флогопит, серое - рихтерит, белое - карбонаты.

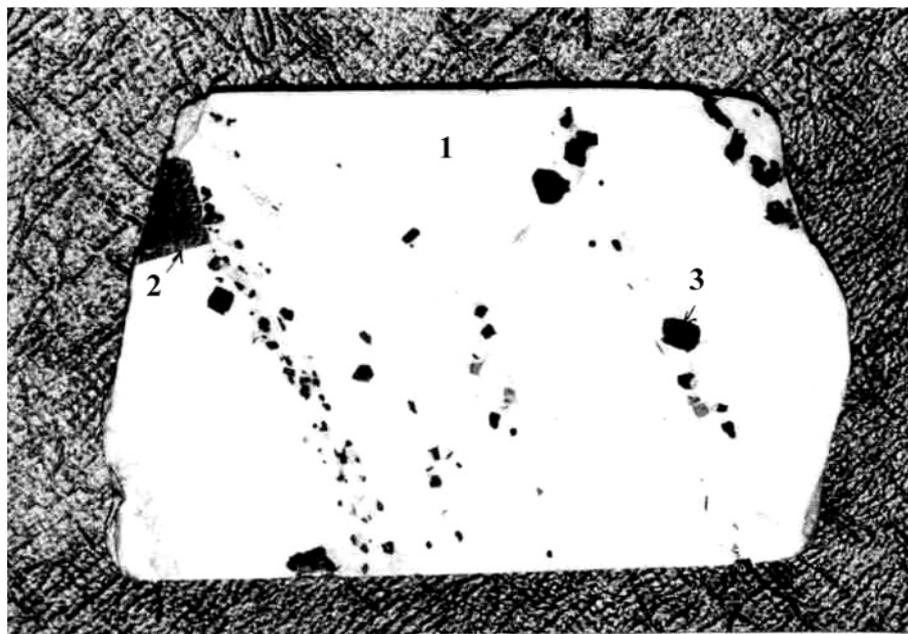


Рис. 4. Доломит - кальцитовый карбонатит с флогопитом и пирохлором (ув. 0,6х, полировка штуфа).

1 - карбонат, 2 - пирохлор, 3 - флогопит.

метасоматитов, слагающих периферические части, в 1,5 – 2 раза больше и достигает двадцати метров. Менее мощные тела метасоматитов представлены краевыми фациями флогопит-рихтеритовых и флогопитовых

метасоматитов с незначительным количеством карбонатов, в составе которых преобладает доломит. Кроме того, в породах массива встречаются мелкие

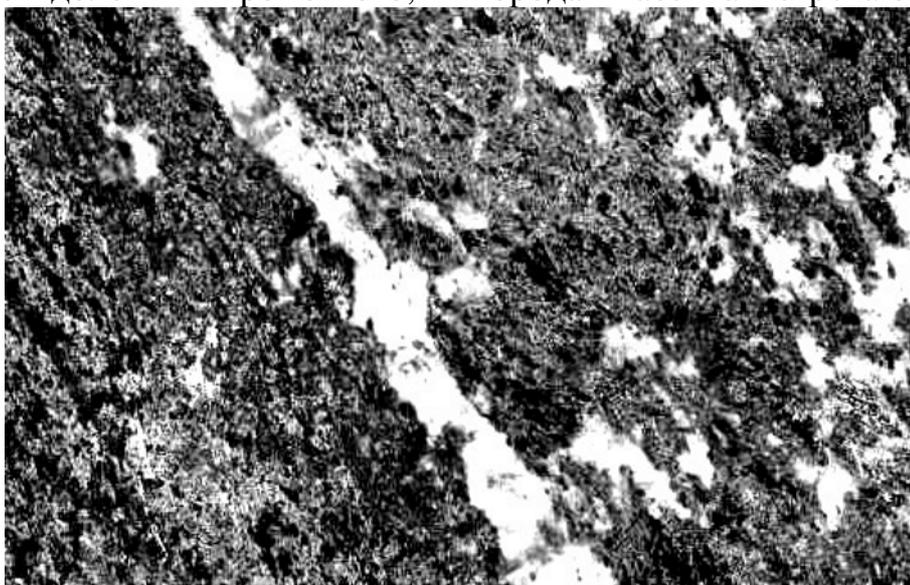


Рис. 5. Полосчатый флогопит-карбонат-рихтеритовый метасоматит (ув. 0,7^x, полировка штуфа).

Черное - флогопит, серое - рихтерит, белое - карбонаты.

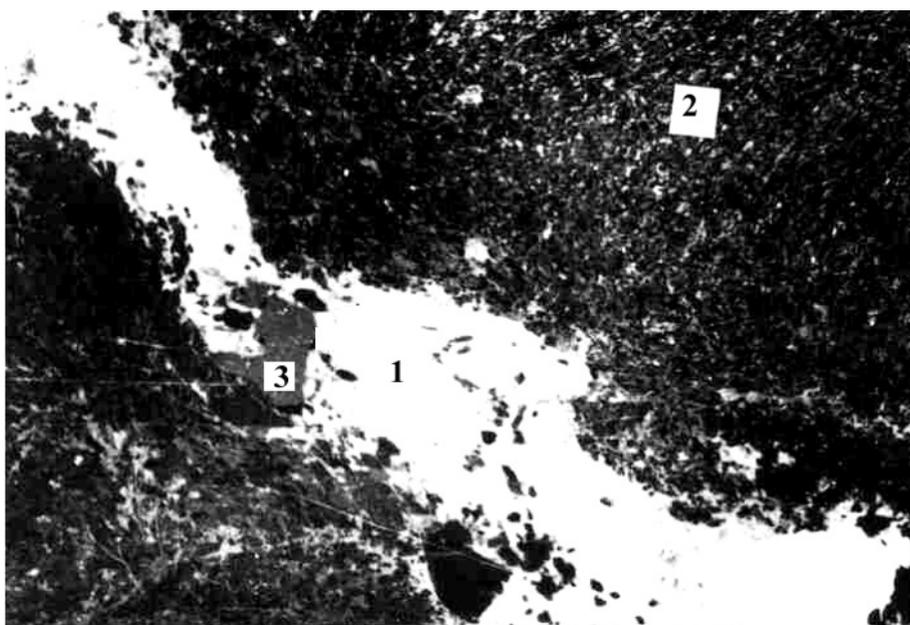


Рис. 6. Доломит - кальцитовый прожилок во флогопит - рихтеритовом метасоматите (ув. 0,8^x, полировка штуфа).

1 - карбонаты, 2 - флогопит - рихтеритовый метасоматит, 3 - магнетит.

прожилки доломита с хлоритом, серпентином, монацитом, реже колумбитом и стронцианитом.

Породы карбонатитов и карбонат-флогопит-рихтеритовых метасоматитов из периферических частей зон имеют типичные метасоматические

текстурно-структурные особенности: сланцевато-полосчатые и пятнисто-полосчатые текстуры, неравномернозернистое строение, неравномерное распределение слагающих их минералов в виде пятен, цепочек, полос и скоплений (рис. 3, 4, 5). Наряду с мелкозернистыми разностями (3-5мм) встречаются гигантозернистые разновидности карбонатитов, в которых отдельные кристаллы амфиболов и слюд достигают нескольких сантиметров. Отмечены случаи, когда кристаллы флогопита ориентированы зонами роста в направлении от центра тел к их периферии, что свидетельствует о росте кристаллов в твердой среде. В целом, наряду с одновременным, отмечается более позднее по отношению к силикатам образование доломита и кальцита, которые часто образуют прожилки, секущие сланцеватость флогопит-рихтеритовых пород (рис. 6).

Жильные пегматоидные карбонатиты представляют собой породы доломит-кальцитового состава, содержащие до 40% идиоморфных кристаллов слюд и амфиболов размером до 20 см, разноориентированных, часто раздробленных, перемещенных и залеченных карбонатным материалом. Карбонатная масса более мелкозернистая по сравнению с силикатами (размеры зерен до 0,5 см), с отдельными более крупными кристаллами доломита. В приконтактных частях карбонатит-пегматиты обычно более мелкозернистые, кристаллы силикатов не более 1 см и ориентированы параллельно контактам тел.

Доломит-кальцитовые карбонатиты образуют характерные структуры в виде червеобразных выделений доломита на границах и внутри зерен кальцита (рис. 7). Подобные структуры известны в карбонатитах альбит-кальцитовой фации Гулинского массива [37] и субвулканических карбонатитах месторождения Панда-Хилл (Мбея, Танганьика) [38] и интерпретируются этими исследователями как эксоллюзионные. Часто встречается и вторичный доломит, образующий округлые зерна и их скопления, тяготеющие к силикатным минералам (рис. 8). Вторичная доломитизация карбонатитов подробно рассматривается Ю.Л. Капустиным [18].

Акцессорные минералы карбонатитов и закономерности их распределения

Акцессорные минералы карбонатитов и флогопит-рихтеритовых метасоматитов представлены пирохлором, гатчеттолитом, цирконом, ильменитом, монацитом, эшинитом, ортитом, чевкинитом, ферсмитом, колумбитом, магнезиоколумбитом, магнетитом, апатитом, пирротинном, пиритом, пентландитом, халькопиритом. Реже встречаются стронцианит, молибденит, хондродит, хромит, гематит, миллерит, корунд, кварц, флюорит.

Необходимо отметить существование двух парагенезисов редкометальных минералов в карбонатитах Булдымского массива. Пирохлор

встречается преимущественно в центральных частях зон - в доломит-кальцитовых карбонатитах и сопровождающих их метасоматитах. Редкоземельные, часто ниобий-содержащие, акцессорные минералы – мона-

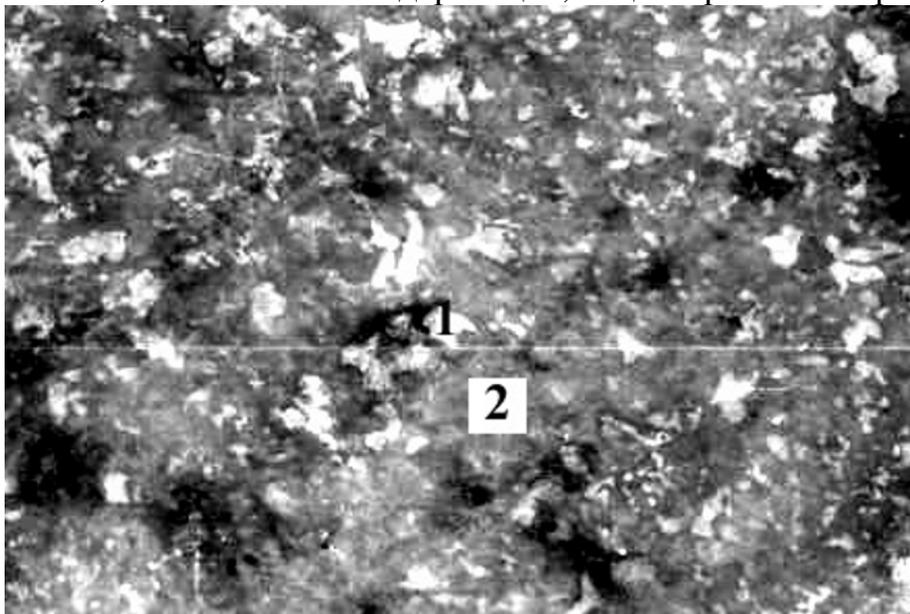


Рис.7. Доломит-кальцитовый карбонатит
(ув. 1,5х, образец окрашен раствором ализарина в соляной кислоте).

Светлый - доломит, серый - кальцит.

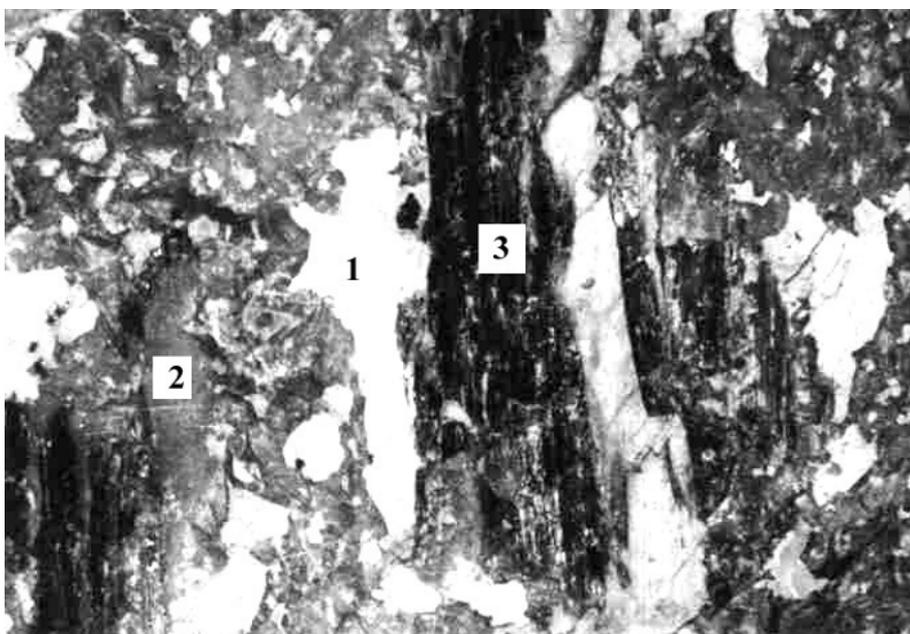


Рис. 8. Доломит - кальцитовый карбонатит с рихтеритом
(ув. 1,5х, образец окрашен раствором ализарина в соляной кислоте).

Светлое - доломит, серое - кальцит, черное - рихтерит.

цит, ортит, чевкинит, эшинит, ферсмит, редкоземельный пирохлор, и, кроме того, колумбит, магнезиоколумбит, стронцианит, молибденит встречаются в

краевых частях зон - в хлорит-карбонат-амфиболовых метасоматитах. Этот набор акцессорных минералов характерен также для доломитовых карбонатитов и сопровождающих их менее мощных зон метасоматитов хлорит-амфиболового, флогопитового и флогопит-амфиболового состава, в которых карбонатная составляющая присутствует в виде доломита. Кроме того, здесь отмечаются хромит, хондродит, сфен, корунд, кварц, флюорит. Циркон, апатит, магнетит, ильменит, сульфиды встречаются в обоих парагенезисах (рис. 9).

Редкометалльные минералы (пирохлор, циркон, колумбит, эшинит, монацит) в карбонатитах образуют идиоморфные кристаллы, а во флогопит-рихтеритовых метасоматитах - зерна неправильной формы с реликтовыми включениями амфиболов и слюд. Для пирохлоров характерны процессы замещения ферсмитом, эшинитом и позднее колумбитом, фиксирующие смену щелочных условий на более кислые [11, 20]. Эти процессы проявлены и в центральных частях тел - во флогопит-рихтеритовых и флогопитовых метасоматитах и в доломит-кальцитовых карбонатитах. Новообразованные фазы эшинита и магнезиоколумбита в ассоциации с монацитом встречаются в доломитовых карбонатитах. Прожилки сульфидов (пирротина, пирита, халькопирита), секущие все минералы щелочных метасоматитов и карбонатитов, являются наиболее поздними образованиями.

Существование двух широко развитых парагенезисов акцессорных минералов в карбонатитах Булдымского массива (с минералами ниобия в доломит-кальцитовых карбонатитах и с редкоземельно-ниобиевыми минералами в доломитовых карбонатитах) фиксирует эволюцию карбонатитообразующих растворов от щелочных к более кислым и соответствуют различным температурным фациям карбонатитов по В.С. Самойлову - амфибол-доломит-кальцитовой и хлорит-серицит-доломитовой [33].

Данные детального изучения акцессорных редкометалльных минералов опубликованы ранее [25, 26, 27, 20].

Типоморфизм породообразующих минералов карбонатитов

Породообразующие минералы карбонатитов Булдымского массива представлены карбонатами - кальцитом, доломитом, ферродоломитом, амфиболами ряда винчит-рихтерит-арфведсонит, слюдами ряда флогопит-тетраферрифлогопит.

Кальциты. Зерна кальцита часто содержат вытянутые ориентированные вроски доломита, представляющего собой продукты распада твердых растворов. Кальцит содержит значительные количества железа, марганца и магния (0.31-1.78% MgO, 0.6-1.54% FeO, 1.3-1.6 % MnO) [36]. Содержание в нём минала (Mg, Fe, Mn) CO₃ составляет 4-9%. В кальцитах устанавливаются высокие содержания стронция (1.15-1.37% SrO) и редких земель (0,17-0,28%

TR). Таких содержаний стронций обычно достигает в кальцитах высокотемпературной калишпат-кальцитовой фации (0.32-1.45% Sr), хотя высокостронциевые кальциты встречаются и в низкотемпературных фациях. Высокие содержания магния Mg (0.07-1.81%) также характерны для высоко-

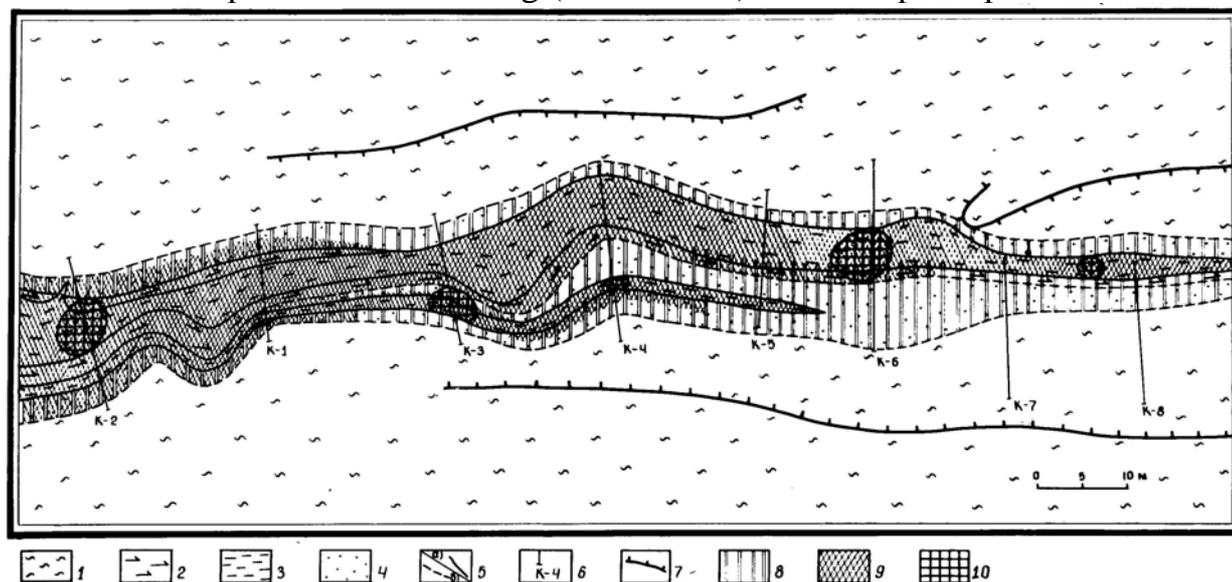


Рис. 9. Схема распределения акцессорных минералов в зоне карбонат-амфибол-флогопитовых метасоматитов в Булдымском массиве (составлена И.Л. Недосековой, 1985).

1 - серпентиниты, 2 - флогопит-рихтеритовые метасоматиты, 3 - флогопитовые метасоматиты, 4 - хлорит-карбонат-амфиболовые метасоматиты, 5 - геологические границы, 6 - линии и номера канав, по которым было проведено опробование, 7 - контур карьера, 8 - 10 - зоны распределения акцессорных минералов: 8 - монацит, 9 - циркон, 10 - пироксен.

температурных кальцитов калишпат-кальцитовой и альбит-кальцитовой фаций [Самойлов, 1977]. Содержания FeO (0.15-0.68%) и MnO (0.06-0.72%) в кальцитах этих фаций ниже. Обогащенность железом (до 5% FeO) и марганцем (до 6.05% MnO) более характерна для кальцитов хлорит-серицит-анкеритовой фации. Высокие содержания железа (0.95% FeO) и марганца (1.1% MnO) [Кононова, 1979] в высокотемпературных кальцитовых карбонатах из миаскитов являются особенностью кальцитов Ильмено-Вишневогорского комплекса.

Доломиты - представлены разновидностями, относящимися к серии твердых растворов доломит-ферродоломит. Доломит из доломит-кальцитовых карбонатитов и сопровождающих их метасоматитов содержит 12-13% ферродоломитового минала. Содержания FeO (4.55-5.3%), MnO (1.9-2.0%), TR (0.034-0.054%), SrO (0.06-0.30%). Доломиты из доломитовых карбонатитов представлены ещё более железистыми разновидностями (до 36% ферродоломитового минала) [36], что по классификации У.А. Дира [13] соответствует анкеритам. Необходимо отметить, что в названии хлорит-серицит-анкеритовой фации отражены именно такие составы "анкеритов",

являющиеся по современной классификации ферродоломитами [28]. Содержание кутнагоритового минала в доломитах составляет 5%, что также характерно для пород этой фации.

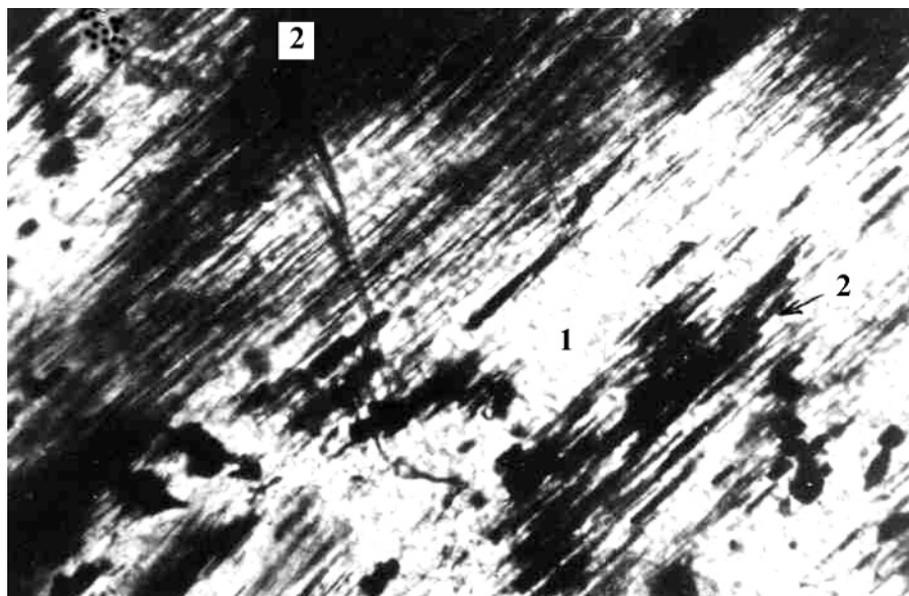


Рис. 10. Игольчатые включения железистых фаз в рихтеритах (без анализатора).
Ув. 100х.

1 - рихтерит, 2 - железистые фазы.

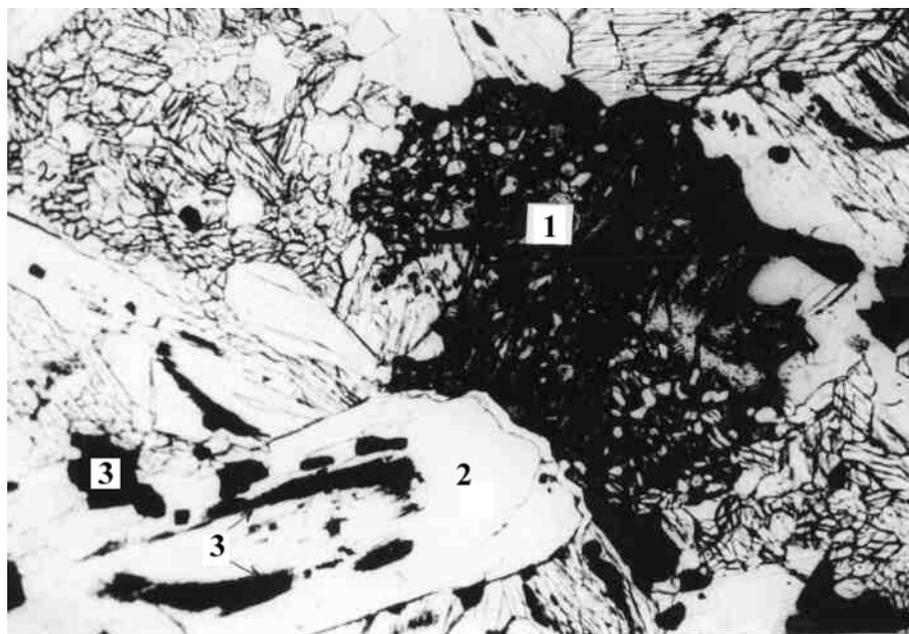


Рис. 11. Игольчатые включения железистых фаз в зоне роста рихтерита.
Рядом зерно пирохлора с включениями рихтерита. Ув. 45х.

1 - пирохлор, 2 - рихтерит, 3 - магнетит.

Амфиболы. Согласно номенклатуре амфиболов Б. Лика [40] амфиболы карбонатитов Булдымского массива относятся к группе натровых ($N_{av} > 1.32$)

ф.ед.) и кальцево-натровых ($0.67 < \text{Нав} < 1.34$ ф.ед.) амфиболов и представлены рядом арфведсонит-рихтерит-винчит. Составы рихтерита характерны для доломит-кальцитовых карбонатитов, рихтерита и арфведсонита - для флогопит-амфиболовых метасоматитов, винчита - для хлорит-карбонат-амфиболовых метасоматитов краевых частей зон. В амфиболах постоянно встречаются включения магнетита в виде октаэдрических кристаллов и игольчатые вроски магнетита, ориентированные в трех направлениях, представляющие собой продукты распада твердых растворов (рис. 10). Эти вроски часто приурочены к центральным и средним зонам роста кристаллов рихтерита (рис. 11).

Химические анализы амфиболов из различных зон карбонатитов и карбонатно-силикатных метасоматитов приведены в таблице 1. Амфиболы представлены существенно магниальными разностями ($\text{mg} = 75.4 - 94 \%$) с низкими содержаниями алюминия ($0.15-0.22$ ф.ед. Al^{IV}) и титана ($0.07-0.24\%$ TiO_2). Следует отметить и наличие "тетраэдрического железа" ($0.03-0.48$ ф.ед. Fe^{IV}) в изученных амфиболах. По данным кристаллохимических пересчетов Fe^{3+} может находиться как в октаэдрических (до 0.76 ф.ед.), так и в тетраэдрических (до 0.4 ф.ед.) позициях амфиболов. Хотя возможность вхождения Fe^{3+} в тетраэдрические позиции амфиболов пока не доказана ни структурными, ни спектроскопическими исследованиями, "тетраэдрическое" железо часто отмечается в амфиболах карбонатитов среднетемпературных фаций [33]. Низкие содержания алюминия и титана также характерны для амфиболов среднетемпературных фаций карбонатитообразования и отличают их от высокотемпературных амфиболов калишпат-кальцитовой фации (рис. 12).

Необходимо отметить высокие содержания фтора в амфиболах карбонатитов и флогопит-рихтеритовых метасоматитов ($2.16-2.88\%$ F), наивысшие содержания которых позволили выделить новые минеральные виды амфиболов - фторрихтерит и фтормагнезиоарфведсонит [4, 5]. Более низкие содержания фтора ($0.71-1.35\%$) отмечаются в амфиболах из хлорит-амфиболовых метасоматитов краевых частей зон.

Эволюция составов амфиболов в процессе карбонатитообразования выражается в увеличении железистости от периферических зон к центральным (от 3.88% до 11.52% $\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3$) и некотором её снижении в карбонатитах на заключительных стадиях процесса (7.65% $\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3$). Снижение железистости амфиболов, вероятно, связано с обособлением железа из структуры амфиболов в самостоятельные фазы.

Эволюционные тренды изменения химизма амфиболов иллюстрируются на диаграмме $\text{Ca} - \text{Mg} - \text{Fe}^{\text{общ}}$. По M.J. Le Bas and R.K. Srivastava [39] (рис. 13). Составы амфиболов Булдымского массива находятся в области тренда фенитизации богатых магнием пород и в области амфиболов, наиболее часто встречающихся в карбонатитах. В области G (область составов амфиболов, находящихся в равновесии с карбонатитовой магмой) амфиболов

булдымских карбонатитов не установлено, хотя один анализ амфибола находится на границе с этой областью. Это может свидетельствовать о том, что амфиболы карбонатитов Булдымского массива образовались при метасоматическом замещении гипербазитов.

Таблица 1.

Химические составы амфиболов из карбонатитов Булдымского массива (мас.%)

Минерал	Винчиты			Магнезиоарфведсониты				Рихтериты					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
№ обр.	К - 74	427	К2-11	2 - 21	97-26	100-26	К-15	13-17	86-26	309	33-11	5-1	5-2
SiO ₂	57.52	56.2	55.22	54	54.99	55.38	54.28	54.98	54.55	53.78	54.66	55.45	55.8
TiO ₂	0.15	0.07	0.16	0.12	0.24	0.18	0.2	0.21	0.19	0.19	0.18	0.2	0.22
Al ₂ O ₃	1.15	0.5	0.65	1.2	1.03	0.9	1.25	1.23	1.08	1.1	1.44	0.96	0.72
Fe ₂ O ₃	1.49	3.28	4.69	8.07	6	5.62	7.6	4.01	4.87	4.35	5.65	6.26	7.63
FeO	2.39	2.27	4.02	3.45	3.23	2.57	2.87	2.15	2.53	3.3	2.3	0.3	0
MnO	0.35	0.92	0.6	1.09	0.45	0.46	0.44	0.48	0.46	0.44	0.41	0.53	0.53
MgO	23.3	22.84	21.81	17.92	19.33	20.1	18.31	20.73	20.35	19.47	19.85	20.48	20.4
CaO	7.67	7.94	5.11	3.75	3.82	4.41	3.39	6.16	5.16	4.72	4.64	4.95	4.24
Na ₂ O	4.52	3.11	5	7.31	6.8	6.75	7.2	6.5	6.75	6.62	6.75	6.85	7.02
K ₂ O	0.24	0.52	0.79	1.7	1.42	1.35	1.26	0.89	1.25	1.45	1.35	1.26	1.55
H ₂ O	0.69	1.01	0.46	0.67	0.41	0.67	0.72	0.6	0.7	0.82	0.78	0.89	0.88
F	0.71	1.35	2.34	2.05	2.68	2.68	2.88	2.16	2.6	2.68	2.6	2.62	2.68
O = F ₂	-0.29	-0.57	-0.99	-0.86	-1.13	-1.13	-0.81	-0.91	-1.09	-1.13	-1.09	-1.1	-1.13
Сумма	99.92	99.64	99.86	100.17	99.27	98.28	97.99	98.28	99.4	97.79	99.5	99.66	100.6
Si	7.69	7.61	7.48	7.62	7.72	7.68	7.73	7.68	7.71	7.71	7.67	7.78	7.77
Al iv	0.22	0.08	0.1	0.2	0.17	0.2	0.21	0.15	0.18	0.19	0.27	0.16	0.12
Ti	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Fe ⁺³ iv	0.08	0.31	0.4	0.17	0.09	0.1	0.04	0.16	0.09	0.08	0.04	0.04	0.09
Fe ⁺³ vi	0.07	0.02	0.14	0.69	0.54	0.49	0.76	0.13	0.42	0.39	0.51	0.62	0.71
Fe ⁺²	0.27	0.26	0.46	0.41	0.38	0.3	0.34	0.25	0.29	0.4	0.27	0.04	0
Mg	4.65	4.61	4.4	3.77	4.04	4.2	3.89	4.33	4.23	4.16	4.16	4.28	4.23
Mn	0.04	0.1	0.07	0.13	0.05	0.05	0.05	0.06	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06
Ca	1.1	1.15	0.74	0.57	0.59	0.66	0.52	0.85	0.77	0.72	0.7	0.74	0.63
Na	1.17	0.82	1.31	2	1.85	1.83	1.98	1.77	1.82	1.84	1.84	1.86	1.9
K	0.03	0.08	0.12	0.26	0.15	0.21	0.23	0.12	0.19	0.23	0.21	0.23	0.28
ОН	0.61	0.91	0.42	0.63	0.38	0.63	0.49	0.57	0.065	0.78	0.73	0.84	0.82
F	0.3	0.58	1	0.91	1.18	1.19	1.29	0.97	1.15	1.22	1.15	1.16	1.18
mg	93.1	92.4	88.2	75.4	80.9	83.6	76.5	90.9	85.1	83.5	83.3	84.9	83.1
Fe ³⁺ /Fe ²⁺	0.55	1.27	1.17	2.1	1.66	1.95	2.35	1.16	2.32	1.17	2.04	*	*

Примечание. mg = 100 Mg/ Mg + Feобщ. + Mn. 1 - 3 - из хлорит - карбонат - амфиболовых метасоматитов. 4 - 8 - из флогопит-амфиболовых метасоматитов, 9 - 13 - из доломит-кальцитовых карбонатитов. 1 - 11 - химические анализы, аналитик В.В. Семенова (кафедра геохимии ЛГУ), Т.К. Кринова (ИГЗ УНЦ АН), 12-13 - данные микрозондового анализа (Университет штата Юта.

отделение геохимии, Солт - Лейк - Сити, США) * - Соотношение Fe^{3+}/Fe^{2+} не рассчитывалось, т.к. микронзондовым анализом определено $Fe^{общ}$.

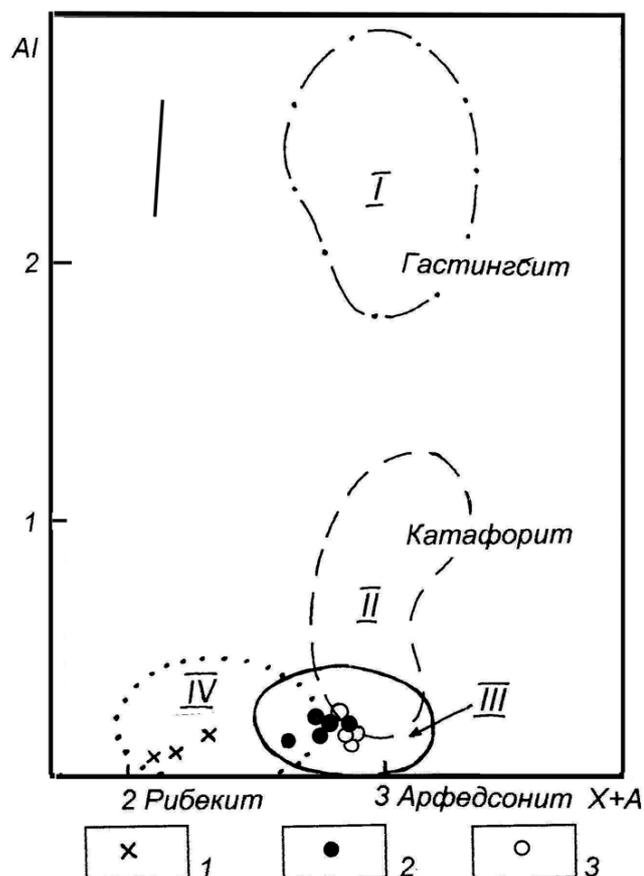


Рис.12. Диаграмма Al - (X + A). Зависимость состава амфиболов от температуры (по В.С. Самойлову [33]).

Al - содержание алюминия в форм. ед. I - амфиболы из пород калишпат-кальцитовой фации, II - амфиболы из карбонатитов альбит-кальцитовой фации, III - амфиболы из карбонатитов амфибол-доломит-кальцитовой фации, IV - амфиболы из карбонатитов хлорит-серицит-анкеритовой фации. 1-3 - амфиболы Булдымского массива: 1 - из хлорит-карбонат-амфиболовых метасоматитов, 2 - из флогопит-амфиболовых метасоматитов, 3 - из доломит-кальцитовых карбонатитов.

Слюды представлены железисто-магнезиальными ($mg = 78 - 95\%$), низкоглиноземистыми ($0.8-1.05$ ф.ед. Al^{IV}), низкотитанистыми ($0.24-0.99\%$ TO_2) разновидностями ряда флогопит-тетраферрифлогопит ($0 - 0.16$ ф.ед. Fe^{IV}) (таблица 2). Бурые тетраферрифлогопиты с обратной схемой абсорбции характерны для доломит-кальцитовых карбонатитов и метасоматитов, зеленовато-бурые флогопиты с неявно выраженной схемой абсорбции – для флогопит-рихтеритовых метасоматитов, зеленые флогопиты с прямой схемой абсорбции – для флогопитовых метасоматитов. В доломит-кальцитовых карбонатитах в кристаллах тетраферрифлогопита встречаются реликтовые слои зеленого флогопита с прямой схемой абсорбции. Замещение флогопита

тетраферрифлогопитом связывают с высокой щелочностью среды и повышенным потенциалом кислорода [2, 30].

По химизму изученные флогопиты и тетраферрифлогопиты близки между собой. В слюдах так же, как и в амфиболах, постоянно встречаются

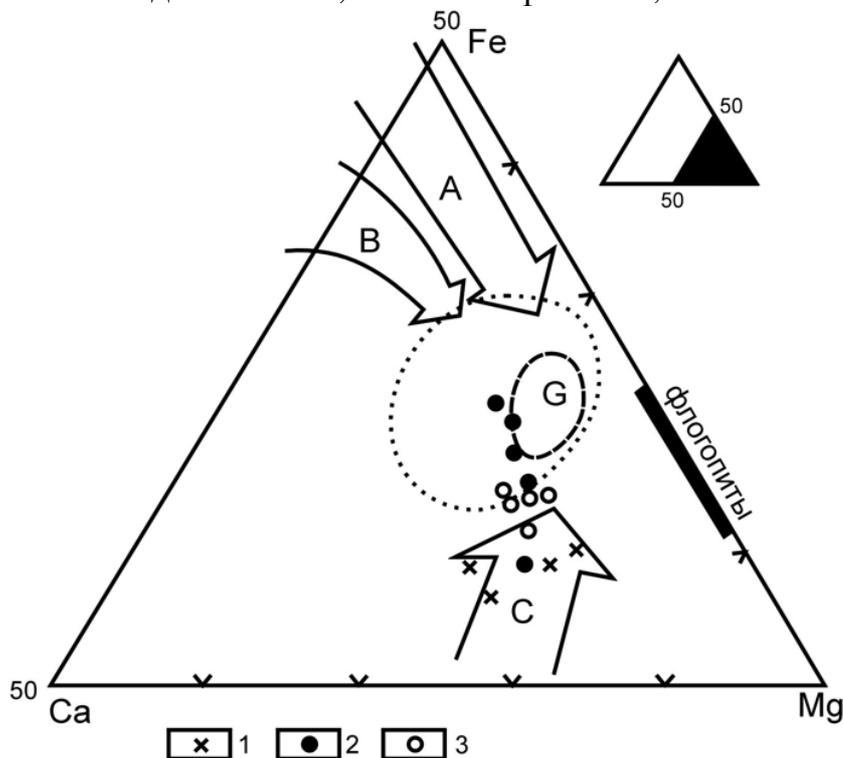


Рис. 13. Ca-Mg-Fe^{общ.} диаграмма для амфиболов из карбонатитов и фенитов (по M.J. Le Bas and R.K. Srivastava [39]).

G - область амфиболов, находящихся в равновесии с карбонатитовой магмой (пунктир). Точками оконтурена область амфиболов, наиболее часто встречающихся в карбонатитах. Стрелками показаны эволюционные тренды изменения химизма амфиболов в фенитизированных гранитах, гнейсах и пелитах (A), амфиболитах (B) и богатых магнием породах (C). 1 - 3 - амфиболы Булдымского массива: 1 - из хлорит-карбонат-амфиболовых метасоматитов, 2 - из флогопит-амфиболовых метасоматитов, 3 - из доломит-кальцитовых карбонатитов.

ориентированные включения игольчатого магнетита и гексагональные пластинки гематита, располагающиеся в плоскостях спайности слюды. Устанавливается закономерное увеличение в слюдах окисного железа от периферических зон в телах метасоматитов к центральным, сложенным карбонатитами (от 0.13 до 0.46 Fe³⁺/Fe²⁺). Максимальное отношение Fe³⁺/Fe²⁺ (0.75 – 0.77) фиксируется в доломитовых карбонатитах (см. табл. 2). Известно, что обогащение окисным железом слюд обычно происходит при снижении температуры минералообразования [33].

Содержания фтора в слюдах также очень высоки (2.4–4.42% F). Максимальные содержания фтора устанавливаются в слюдах из флогопит – рихтеритовых и флогопитовых метасоматитов (до 4.42% F). В слюдах

доломитовых карбонатитов содержания фтора - 3.7–3.9%, в доломит – кальцитовых карбонатитах несколько ниже (2.4 – 3.22% F).

Составы слюд Булдымских карбонатитов близки составам слюд альбит – кальцитовой и амфибол-доломит-кальцитовой фации (рис. 14) и отличаются от слюд высокотемпературных фаций с высокими содержаниями алюминия

Таблица 2.

Химические составы слюд из карбонатитов Булдымского массива (мас.%)

Минерал	Зеленовато-бурые флогопиты				Зеленые флогопиты			Тетраферри-флогопиты			Бурые флогопиты	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
№ п/п	К -13	К -8	318	97-26	К-18	1-29	3311	3311-2	8а	92-26	3-95	К-17
SiO ₂	41.23	40.45	41.32	41.48	39.96	41.97	38.73	40.54	41.52	40.12	42.6	42.7
TiO ₂	0.5	0.76	0.57	0.69	0.62	0.6	0.99	0.69	0.6	0.5	0.12	0.24
Al ₂ O ₃	10.34	11.39	9.9	10.2	11.94	12.25	11.82	10.48	9.53	9.94	12.3	11.12
Fe ₂ O ₃	1.52	1.82	1.14	2.2	2.18	2.03	2.82	2.98	2.52	2.85	1.77	1.82
FeO	5.85	7.54	7.54	6.63	7.22	6.68	7.61	5.82	5.52	5.78	2.01	2.27
MnO	0.21	0.24	0.24	0.22	0.34	0.72	0.35	0.23	0.66	0.18	0.51	0.36
MgO	24.56	22.7	23.73	22.71	22.73	22.3	20.76	23.58	24.84	24.4	26.96	27.4
CaO	0.07	н.о.	н.о.	0.01	0.1	н.о.	0.26	н.о.	0.11	0.26	0	0
Na ₂ O	0.77	0.66	0.66	0.67	0.54	0.7	0.59	0.67	0.74	0.63	1.35	0.54
K ₂ O	10.5	10	10.5	10.75	10	10.25	10.5	10.15	11.05	10.63	9.6	10.62
H ₂ O	2.15	1.24	2.08	1.66	1.83	1.21	3.36	3.27	1.13	2.26	0.88	0.76
F	4.42	4.4	3.91	3.28	4.04	2.8	2.4	2.6	2.9	3.22	3.7	3.9
O = F ₂	-1.86	-1.85	-1.65	-1.38	-1.7	-1.17	-1.01	-1.09	-1.22	-1.36	-1.56	-1.64
Сумма	100.21	99.35	100	99.17	99.8	100.3	99.18	100.27	99.79	99.41	100.24	100.15
Si	2.99	2.94	3.02	3.05	2.89	3	2.91	2.96	2.99	2.93	2.96	2.97
Al	0.88	0.97	0.85	0.88	1.02	1.03	1.05	0.9	0.81	0.86	1.01	0.91
Ti	0.03	0.04	0.06	0.04	0.03	0.05	0.06	0.04	0.03	0.03	0.01	0.04
Fe ^{3+iv}	0.08	0.05	0.03	0.03	0.06	0	0	0.1	0.14	0.16	0.02	0.08
Fe ^{3+vi}	0	0.05	0	0.09	0.06	0.11	0.16	0.06	0	0	0.07	0.02
Fe ²⁺	0.35	0.46	0.46	0.41	0.44	0.4	0.48	0.35	0.33	0.35	0.12	0.13
Mn	0.01	0.01	0.02	0.04	0.02	0.04	0.02	0.01	0.04	0.01	0.03	0.02
Mg	2.65	2.46	2.57	2.49	2.47	2.38	2.32	2.56	2.66	2.66	2.8	2.85
Ca	0.01	0	0	0.01	0.01	0	0.02	0	0	0.02	0	0
Na	0.11	0.09	0.09	0.09	0.08	0.1	0.08	0.09	0.1	0.09	0.18	0.07
K	0.97	0.93	1	1	0.92	0.93	1	0.94	1.01	0.99	0.85	0.94
OH	1.04	0.6	1.01	0.81	0.89	0.6	1.68	1.59	0.54	1.11	0.41	0.35
F	1.01	1	0.88	0.76	0.93	0.63	0.57	0.6	0.67	0.75	0.81	0.86
mg	85.7	82.2	84.2	82.2	82.6	81.2	77.8	85.9	87.7	88.1	92.7	95
Fe ³⁺ /Fe ²⁺	0.29	0.22	0.13	0.29	0.27	0.27	0.33	0.46	0.42	0.46	0.75	0.77

Примечание. m = 100 Mg/(Mg + Fe + Mn). 1 - 4 - из флогопит - рихтеритовых метасоматитов, 5 - из флогопитовых метасоматитов, 6 - 10 - из доломит - кальцитовых карбонатитов, 11 - 12 - из доломитовых карбонатитов, 7 - 8 - реликтовая зона зелёного флогопита (7) в кристалле бурого тетраферрифлогопита (8). Аналитики - В.В. Семенова (кафедра геохимии ЛГУ), Т.К. Кримова (ИГЗ УНЦ АН)

(1.93 ф.ед. Al^{IV}) и титана (2.28% TiO₂) [33].

Составы слюд булдымских карбонатитов нанесены нами показаны на диаграмму Al₂O₃–MgO–FeO^{общ.} (рис. 15), предложенной М.И. Ле Бас для

иллюстрации составов слюд, образующихся при кристаллизации из карбонатитовых магм [39]. Составы слюд апогипербазитовых карбонатитов Булдымского массива находятся в поле составов слюд, наиболее часто встречающихся в карбонатитах. В поле слюд, равновесных с карбонатитовыми магмами (поле G), попадают слюды из пегматоидных карбонатитов Булдымского гипербазитового массива. Особенности составов

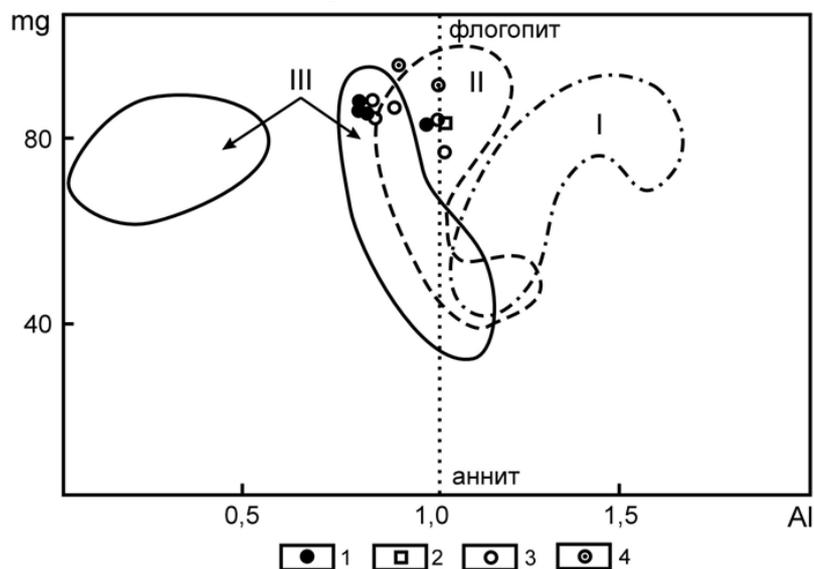


Рис.14. Изменение магнезиальности (mg) и глинозёмистости (Al в форм. ед.) слюд из карбонатитов в зависимости от температуры (по В.С. Самойлову [33]).

I - слюды из карбонатитов калишпат - кальцитово-флогопитовой фации, II - слюды из карбонатитов альбит-кальцитовой фации, III - слюды из карбонатитов амфибол-доломит-кальцитовой фации. 1-4 - слюды Булдымского массива: 1 - из флогопит-амфиболовых метасоматитов, 2 - из флогопитовых метасоматитов, 3 - из доломит-кальцитовых карбонатитов, 4 - из доломитовых карбонатитов.

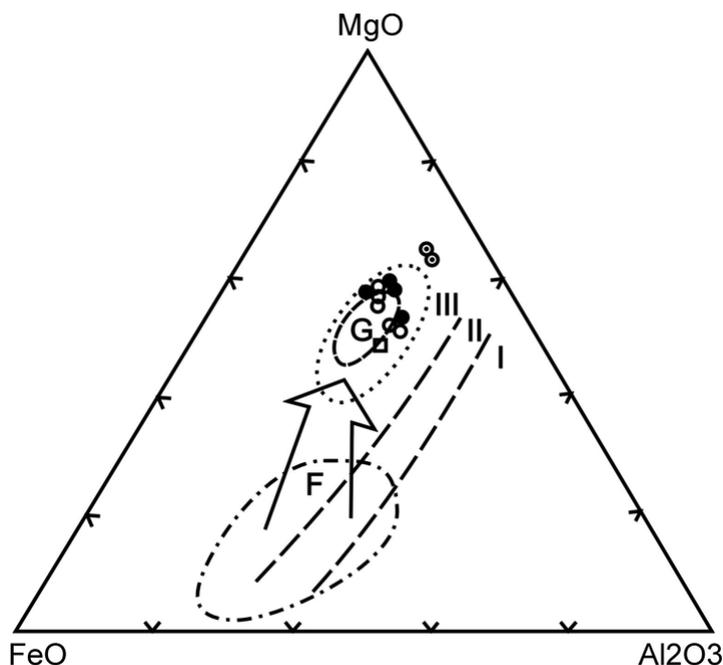


Рис. 15. Диаграмма $Al_2O_3 - MgO - FeO$ общ. для слюд из карбонатитов и фенитов (по М.Л. Le Bas and R.К. Srivastava [39]).

G - область составов слюд, находящихся в равновесии с карбонатитовой магмой (пунктир). Точечная линия - область слюд, наиболее часто встречающихся в карбонатитах. Стрелка F - составы слюд, образующиеся при фенитизации. Точечно - пунктирная линия - составы слюд большинства магматических и метаморфических пород. Условные обозначения для слюд карбонатитов Булдымского массива приведены на рис.14.

слюд карбонатит-пегматитов Булдымского массива ($mg = 86$, $Al_2O_3 - 10.5\%$, $TiO_2 - 0.69\%$, $Na_2O - 0.67\%$) полностью соответствуют особенностям химизма слюд, равновесных с карбонатитовыми магмами.

Геохимия карбонатитов

Химические составы карбонатитов и апогипербазитовых метасоматитов приведены в таблице 3. Состав редких и редкоземельных элементов выполнены методом индукционно-связанной плазмы на современном, высокочувствительном приборе «Элемент-2» в г. Новоуральске (табл. 4).

Все анализированные образцы имеют типично высокие значения Sr, Ba, LREE и значительные вариации Nb, Zr, Ti, V, Th, сходные со среднемировыми составами кальцио- и магнезиокарбонатитов (рис. 16) [42].

При формировании метасоматической колонки связанной как с доломит-кальцитовыми, так и с доломитовыми карбонатитами по гипербазитам наблюдается последовательное обогащение пород всеми редкоземельными и редкими элементами (рис. 16). При этом доломитовые карбонатиты характеризуются более высокими содержаниями легких РЗЭ, что связано с присутствием монацита и их редкоземельной спецификой, по сравнению с доломит-кальцитовыми. Специфика доломитовых карбонатитов выражается и в более высоких содержаниях Th, Y.

Содержания Nb, Zr, Ti, V сильно варьируют внутри каждой зоны обоих типов карбонатитов, что связано с вхождением этих элементов в самостоятельные фазы – пирохлор, циркон, титаномагнетит, ильменит. Содержания ниобия возрастают от периферических зон к центральным, достигая максимальных значений в доломит-кальцитовых карбонатитах (до 2000 г/т). Цирконием обогащены зоны флогопитовых метасоматитов. Ванадий и титан концентрируется во флогопит-рихтеритовых и флогопитовых метасоматитах (260 г/т V и 0,5% Ti), заметно снижаясь в карбонатитах.

Стронцием и барием обогащены доломит-кальцитовые карбонатиты (до 12200 г/т и 540 г/т соответственно) при высоком Sr /Ba отношении (19 - 22). В доломитовых карбонатитах содержится до 6600 г/т Sr и до 300 г/т Ba с большими вариациями стронций-бариевого отношения ($Sr/Ba = 12-28$), что характерно для метасоматических образований [34]. Содержание никеля и кобальта в рихтерит-флогопитовых и флогопитовых метасоматитах (до 2.4% Ni, до 280 г/т Co), выше, чем во вмещающих их гипербазитах, что связано с

высоким содержанием в этих зонах сульфидов (пентландита, пирротина, пирита).

При сравнении геохимических особенностей карбонатитов Ильменогорско-Вишневогорского комплекса можно отметить, что по содержания редких элементов карбонатиты Булдымского массива наиболее близки постмиаскитовым карбонатитам Вишневогорского массива, отлича-

Таблица 3.

Химические составы пород Бульдымского массива (мас.%)

Порода	Кол-во проб	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	ППП	S	H ₂ O
Карбонатиты														
Долomit-кальцитовые карбонатиты	6	7.28	0.06	1.02	3.3	1.68	9.78	41.1	0.67	0.52	0.01	33.87	0.02	0.03
Долomitовые карбонатиты	5	3.67	0.04	0.98	4.56	1.43	18.38	28.9	0.17	0.42	4.66	36.51	0.02	0.06
Карбонатно-силикатные метасоматиты														
Флогопитовые	6	45.51	0.5	8.36	10.94	0.38	21.77	1.73	1.66	7.57	0.01	1.58	0.09	0.06
Карбонат-флогопитовые	5	33.12	0.91	8.95	10.11	0.68	19.58	7.69	0.22	6.31	0.32	8.16	0.1	0.78
Флогопит-рихтеритовые	5	49.48	0.49	3.01	16	0.56	18.54	4.69	4.3	2.16	0.01	1.3	0.05	0.04
Карбонат-флогопит-рихтеритовые	5	31.64	0.41	3.02	12.07	1.14	15.94	21.3	3.25	1.7	0.01	10.76	0.22	0
Хлорит-амфиболовые	7	48.42	0.22	3.41	8.13	0.37	19.39	11.54	2.68	0.47	0.34	5.39	0.2	0.4
Хлорит-карбонат-амфиболовые	6	20.01	0.08	1.38	5.09	0.53	23.64	19.2	0.92	0.53	0.01	28.55	0.02	0.07
Гипербазиты														
Амфиболитовые гипербазиты	7	49.27	0.04	2.9	8.2	0.14	28.44	4.38	0.66	0.13	0.04	5.55	0.26	0.15
Оливин-энстатитовые породы	2	45.22	0.01	1.73	9.63	0.09	32.55	1.13	0.1	0.07	0.03	8.54	0.25	0.22
Оливиновые породы	2	40.42	0.03	2.3	10.42	0.09	34.62	0.31	0.14	0.03	0.01	10.12	0.92	0.2

Примечание. Рентгеноспектральный силикатный анализ выполнен в ЦЛПГО "Севзапгеология".

Таблица 4

Содержания редких и редкоземельных элементов в карбонатитах и метасоматитах Булдымского массива (в ppm)

№	1	2	3	4	5	6	7	8
Обр.	44-3332	3-21	43-915	T-16	15-22	K-18	1-54	10-21
Li	3,98	51,74	11,92	18,22	17,31	189,33	0,09	3,48
Rb	0,76	45,54	43,90	52,02	12,85	596,79	0,41	0,12
Cs	0,07	2,23	0,82	0,83	0,92	8,48	0,02	0,02
Be	0,05	4,52	0,30	1,28	1,99	7,40	0,55	0,63
Sr	283,73	2313,33	10279,1	9546,90	43,98	189,53	6611,26	3796,21
Ba	46,28	98,43	223,69	484,03	80,90	1276,83	233,23	302,17
Sc	4,40	15,71	2,30	5,79	6,25	5,01	1,15	1,88
V	42,38	197,84	14,68	67,07	79,53	119,47	7,67	51,25
Cr	868,83	606,56	107,05	138,01	1178,10		23,43	34,97
Co	75,53	35,61	4,75	6,68	41,77	44,16	16,31	6,62
Ni	165,57	135,50	9,96	12,68	219,82	1849,76	12,51	30,29
Cu	0,32	8,97	23,70	23,90	17,84	0,91	19,66	23,68
Zn	29,61	236,26	48,76	88,02	62,35	703,47	46,52	8,36
Y	1,69	8,87	68,54	62,11	6,93	10,06	92,58	73,98
Nb	1,55	27,31	19,66	930,31	12,07	4517,34	87,86	14,84
Ta	0,04	0,23	0,02	1,24	0,63	110,91	0,08	0,14
Zr	1,60	32,06	1,75	42,34	5,06	15,10	23,78	36,55
Hf	0,03	0,54	0,13	0,51	0,12	0,41	0,43	0,46
Mo	0,19	0,63	0,57	0,62	0,07	0,09	1,22	0,00
Pb	1,38	4,36	14,05	22,87	1,71	14,40	23,27	58,56
Th	0,30	1,13	3,30	22,30	7,07	91,89	680,63	1418,28
La	13,55	27,68	598,44	577,43	31,95	194,29	2284,98	18958,7
Ce	13,96	88,21	1055,78	1022,21	48,72	332,67	4092,31	25500,3
Pr	0,78	7,95	59,42	58,07	3,98	28,19	179,71	913,42
Nd	1,83	24,46	202,11	180,13	11,18	81,87	542,64	2273,26
Sm	0,28	2,98	41,14	38,01	1,48	9,38	70,08	167,57
Eu	0,08	0,75	10,59	9,74	0,36	1,78	34,46	28,81
Gd	0,22	2,24	31,64	28,20	1,10	5,92	65,14	87,15
Tb	0,04	0,31	4,69	4,31	0,18	0,71	10,08	11,09
Dy	0,22	1,55	24,97	22,88	1,03	3,29	60,50	45,76
Ho	0,05	0,33	5,50	5,01	0,22	0,59	10,74	6,57
Er	0,16	0,91	16,10	14,54	0,72	1,32	22,91	12,31
Tm	0,02	0,14	2,44	2,20	0,10	0,16	3,00	1,31
Yb	0,14	1,02	17,02	15,40	0,61	0,85	16,48	6,23
Lu	0,02	0,16	2,63	2,37	0,10	0,11	2,04	0,77
Zr/Hf	57,21	59,88	13,22	82,56	40,86	36,44	55,44	79,56
Sr/Ba	6,13	23,50	45,95	19,72	0,54	0,15	28,35	12,56
Y/Yb	12,37	8,72	4,03	4,03	11,31	11,83	5,62	11,88
Nb/Ta	36,54	118,59	1104,81	747,96	19,16	40,73	1135,58	103,98
La/Yb	99,08	27,19	35,16	37,49	52,13	228,37	138,65	3045,50

Примечание. 1, 5 – слабо фенитизированный гарцбургит, 2 – кальцит-доломит-флогопит-амфиболовый метасоматит, 3 – флогопит-доломит-кальцитовый метасоматит, 4 – доломит-кальцитовый карбонатит, 6 – доломит-флогопитовый

метасоматит, 7 – доломитовый карбонатит, 8 – монацитсодержащий доломитовый карбонатит.

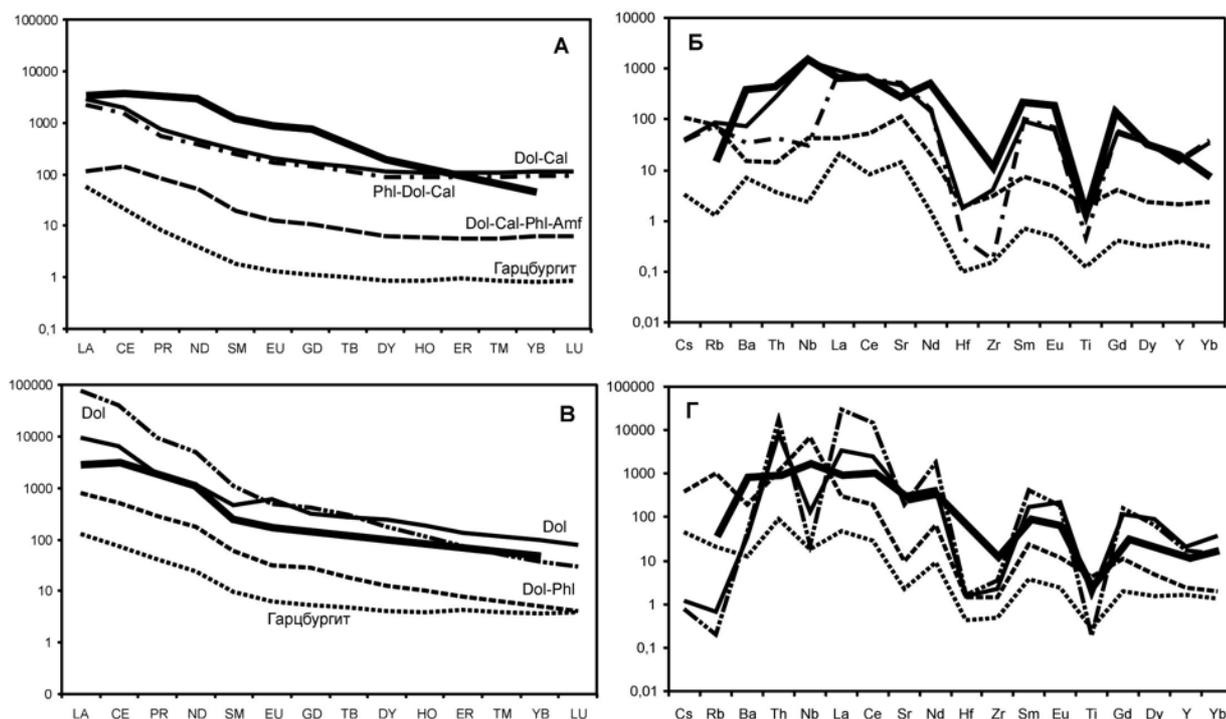


Рис. 16. Спайдер-диаграммы распределения РЗЭ и РЭ в доломит-кальцитовых (а, б), доломитовых (в, г) карбонатитах и щелочных метасоматитах Булдымского массива, и их сравнение со средними составами кальцио- и магнезиокарбонатитов [42].

Номера на диаграммах соответствуют номерам проб в табл. 4. Жирная сплошная линия – средний состав кальцио- и магнезиокарбонатита по [Woolley, Kempe, 1989].

ьясь от них лишь несколько более высокими содержаниями редких земель, хрома и никеля.

Условия образования карбонатитов

Температурные условия образования карбонатитов Булдымского массива были определены А.С. Таланцевым методом фазового соответствия при помощи доломит-кальцитового геотермометра. Нами использован пирит-пирротинный геотермометр [41], а также усовершенствованный титаномагнетитовый геотермометр Баддингтона - Линдсли [32].

По данным доломит-кальцитовой термометрии [36] образование карбонатитов Булдымского массива происходило в температурном интервале 575 – 230°C. Парагенезис доломит-кальцитовых карбонатитов с пироксеном наиболее высокотемпературный – 575 – 280°C, что соответствует калишпат-кальцитовой, (730 – 530°C), альбит-кальцитовой, (530 – 420°C), и амфибол-доломит-кальцитовой (420 – 275°C) фациям карбонатитов по В.С. Самойлову [33]. Для парагенезиса доломитовых карбонатитов с редкоземельной аксессуарной минерализацией определены температуры – 315-230°C, что

соответствует хлорит-серицит-анкеритовой фации карбонатитов (330– 200°C) [33].

Температура равновесия сосуществующих титаномагнетита и ильменита из доломит-кальцитовых карбонатитов характеризует нижнюю температурную границу распада титаномагнетита и равна 420°C.

По данным пирит-пирротиновой геотермометрии сульфидные прожилки в доломит-кальцитовых карбонатитах, образующиеся на заключительных этапах карбонатитообразования, сформировались при температурах 330-350°C.

Химические составы амфиболов и слюд доломит-кальцитовых карбонатитов соответствуют альбит-кальцитовой и амфибол-доломит-кальцитовой фации, что иллюстрируется на диаграммах зависимости составов амфиболов и слюд от температуры (рис. 12, 14). Составы карбонатов (высокая магнезиальность кальцитов (до 1.78% MgO)), значительные содержания в них стронция (до 1.37% SrO) и редких земель (до 0.28% TR), наличие структур распада твердого раствора доломита в кальцитах соответствуют особенностям этих фаций. Химические составы амфиболов и слюд из доломитовых карбонатитов (см. рис. 12, 14), а также составы доломитов, содержащих до 36 % ферродоломитового минала и 5% кутногоритового минала, характерны для карбонатитов хлорит-серицит-анкеритовой фации.

Выводы

1. Карбонатиты в гипербазитах являются продуктами процесса карбонатитообразования, связанного со становлением Ильменогорско-Вишневогорского щелочного комплекса. Они сформировались в результате внедрения карбонатитовых магм и последующего щелочно-карбонатного метасоматоза гипербазитов. Об этом свидетельствуют текстурно-структурные особенности пород, наличие простой и фациальной зональности в телах карбонатитов, значительная роль силикатов (амфиболов и флогопитов) в составе карбонатитовых зон и жил, зависимость состава карбонатитов от вмещающих пород (их обогащенность микропримесными элементами гипербазитов - хромом и никелем), характер эволюции минеральных ассоциаций и составов минералов карбонатитов. Наряду с метасоматическими карбонатитами в гипербазитах установлены пегматит-карбонатиты, текстурно-структурные особенности и составы минералов которых свидетельствуют о формировании их из высокотемпературных карбонатитовых жидкостей, находящихся в равновесии с силикатными минералами.

2. Карбонатиты в гипербазитах представлены доломит - кальцитовыми и доломитовыми разновидностями, различающимися набором редкометалльных аксессуарных минералов, составом пороодообразующих минералов и геохимическими особенностями. Доломит-кальцитовые

карбонатиты с рихтеритом и тетраферрифлогопитом содержат редкометальные акцессорные минералы (пирохлор, циркон, псевдоморфозы ферсмита, эшинита, колумбита по пирохлору) и обогащены стронцием, барием, редкими землями, ниобием, цирконием. *Доломитовые карбонатиты* с флогопитом (или хлоритом) и амфиболом ряда винчит-рихтерит содержат редкоземельную акцессорную минерализацию - монацит, эшинит, ортит, редкоземельный пирохлор и обогащены редкими землями, торием, иттрием.

3. Карбонатиты сопровождаются мощными зонами флогопит-рихтеритовых и флогопитовых, часто карбонатсодержащих, метасоматитов. Ниобиевые акцессорные минералы (пирохлор и др.) встречаются преимущественно в средних частях зон - в карбонат-флогопит-рихтеритовых метасоматитах. Редкоземельные акцессорные минералы приурочены к периферическим частям зон. *Флогопитовые метасоматиты* обогащены относительно других зон цирконием, барием, никелем и кобальтом, *флогопит-рихтеритовые метасоматиты* - хромом, никелем, кобальтом. Содержания стронция, ниобия и редких земель в силикатных метасоматитах в десятки раз ниже, чем в карбонатитах.

4. *Доломит-кальцитовые карбонатиты* формировались при температурах альбит-кальцитовой и амфибол-доломит-кальцитовой фации (500 – 300°C). Об этом свидетельствуют данные доломит-кальцитовой термометрии и особенности составов амфиболов и слюд - низкая глиноземистость и титанистость, обогащённость окисным железом, наличие в них "тетраэдрического" железа, высокие содержания фтора. Составы карбонатов (высокая магнезиальность кальцитов, значительные содержания в них стронция и редких земель, структуры распада твердого раствора доломита в кальцитах) также соответствуют особенностям этих фаций. *Доломитовые карбонатиты* формировались при более низких температурах хлорит-серицит-анкеритовой фации (300 – 200°C), что также подтверждается геохимическими особенностями минералов и пород.

5. Минеральные парагенезисы карбонатитов Булдымского массива, особенности состава слагающих их минералов, геохимические особенности пород сопоставимы с классическими карбонатитами ультраосновных щелочных комплексов. Они фиксируют эволюцию карбонатитообразующих расплавов-флюидов при образовании доломит-кальцитовых и доломитовых карбонатитов от щелочных к более кислым и соответствуют среднетемпературным фациям карбонатитообразования. Таким образом, в отличие от карбонатитов высокотемпературных фаций Вишневогорского массива миаскитов, в Булдымском массиве более широко проявлены карбонатиты среднетемпературных фаций, ранее не известные в Ильменогорско-Вишневогорском щелочном комплексе и считающиеся не характерными для этого формационного типа карбонатитов.

Работа выполнена по целевой программе междисциплинарных проектов УрО РАН, СО РАН и ДВО РАН 2004 года и гранта РФФИ (№ 05-05-64591-а).

Благодарности

Авторы выражают благодарность В.Н.Сазонову, В.В.Холоднову, Ю.А.Полтавцу за консультации и обсуждение материалов, а также Ю.Л.Ронкину, Г.В.Пальгуйевой за содействие в проведение геохимических и рентгеноструктурных анализов.

Литература

1. **Багдасаров Ю.А.** Линейно - трещинные тела карбонатитов - новая субформация ультраосновных - щелочных карбонатитовых комплексов// ДАН. 1979. Т.248. №2. С. 412 - 415.
2. **Багдасаров Ю.А., Власова Е.В., Скосырева М.В.** Типоморфизм слюд ультраосновных щелочных пород и карбонатитов// Изв. АН СССР. Сер. геол. 1985. №6. С. 78 - 92.
3. **Багдасаров Ю.А.** О полиформационности карбонатитов и объеме термина "карбонатит"// ЗВМО, 1992. №2. С. 110 - 116.
4. **Баженов А.Г., Недосекова И.Л.** Фторрихтерит - новый минеральный вид в группе амфиболов// ЗВМО, 1993. Ч.СХХ11. №3. С. 98 - 102.
5. **Баженов А.Г., Недосекова И.Л. и др.** Фтормагнезиоарфведсонит - новый минеральный вид в группе амфиболов (Ильменогорско - Вишневогорский комплекс, Ю.Урал)//ЗВМО, 2000, №6. С. 28 - 35.
6. **Белов В.В.** Монацит из района Вишневых гор// ЗВМО. 1937. Серия 11.Ч.66. Вып.4. С.648 -650.
7. **Бонштедт - Куплетская Э.М.** Минералогия щелочных пегматитов Вишневых гор. М. 1951. 105с.
8. **Бородин Л.С.** Карбонатитовые месторождения редких элементов // Геохимия, минералогия и генетические типы месторождений редких элементов. М., 1966. Т.Ш. С.215 - 256.
9. **Варлаков А.С., Кузнецов Г.П., Муркин В.П. и др.** Гипербазиты в геологическом строении Ильменогорского комплекса и его обрамления // Докембрийско-раннепалеозойская история развития Урала. Свердловск. 1980. С. 41 - 44.
10. **Варлаков А.С.** Петрография Булдымского гипербазитового массива Вишневогорского комплекса// Уральский минералогический сборник. Екатеринбург. 1993. №1. С.37-45.
11. **Гайдукова В.С.** Процессы изменения пирохлора в карбонатитовых месторождениях// Минеральное сырьё. 1960. Вып.1. С. 111 - 120.
12. **Гинзбург А.И., Самойлов В.С.** К проблеме карбонатитов// ЗВМО, 1983. Вып.2. Ч.112. С. 164-176.
13. **Дир У.А., Хаун Р.А., Зусман Дж.** Породообразующие минералы. М. 1966. Т.5. 406 с.
14. **Еськова Е.М., Жабин А.Г., Мухитдинов Г.Н.** Минералогия и геохимия редких элементов Вишневых гор. М., 1964. 301с.
15. **Жабин А.Г.** О новом типе карбонатитовых проявлений в связи со щелочным комплексом Ильменских-Вишневых гор на Урале // ДАН СССР, 1959. Т.128. №5. С. 1020 - 1022.
16. **Жабин А.Г., Самсонова Н.А.** Карбонатные породы из щелочного комплекса Вишневых гор на Урале// Труды ИМГРЭ. 1962. Вып.9. С. 224 - 240.
17. **Ильменев Е.С.** Штокверковое редкометальное оруденение в нефелиновых сиенитах// Изв. Вузов. Сер. Геология и разведка. №11. 1958. С. 51 - 58.
18. **Капустин Ю.Л.** Соотношения карбонатов в зонах метасоматической доломитизации карбонатитов// ДАН СССР. 1983. Т.268. №2. С. 397-401.

19. **Кононова В.А., Донцова Е.И., Кузнецова Л.Д.** Изотопный состав кислорода и стронция ильмено-вишневогорского щелочного комплекса и вопросы генезиса миаскитов // Геохимия, 1979. № 12. С. 1784 - 1795.
20. **Лебедева И.О., Недосекова И.Л.** О процессе эшинитизации пирохлора из карбонатитов Булдымского массива (Вишневые горы, Урал)//ЗВМО.1993.№ 2.С.69- 75.
21. **Левин В.Я., Роненсон Б.М., Левина И.А.** Карбонатиты щелочной провинции Ильменских-Вишневых гор на Урале //ДАН СССР, 1978. Т. 240. № 4. С. 930 - 933.
22. **Левин В.Я., Роненсон Б.М.** Карбонатиты Урала// Вопросы петрологии Урала. Свердловск. 1980. С. 112 - 125.
23. **Левин В.Я.** Проблемы интрузивного щелочного магматизма Урала// Вопросы геологической корреляции и металлогении Урала. М. 1983. С. 100 - 110.
24. **Левин В.Я., Роненсон Б.М., Самков В.С и др.** Щелочно - карбонатитовые комплексы Урала. Екатеринбург: Уралгеолком. 1997. 274 с.
25. **Недосекова И.Л., Поляков В.О., Баженова Л.Ф.** Акцессорные редкометалльные минералы апогипербазитовых фенитов и карбонатитов в Ильменогорско - Вишневогорском комплексе// Новые и малоизученные минералы и минеральные ассоциации Урала. Свердловск. 1986. С. 49 - 51.
26. **Недосекова И.Л., Лотова Э.В.** Находка стронцианита в Булдымском гипербазитовом массиве (Вишневые горы)// Материалы к топоминералогии Урала. Свердловск. 1986. С. 56 - 61.
27. **Недосекова И.Л., Поспелова Л.Н., Поляков В.О.** Магнезиальный колумбит из Булдымского массива (Вишневые горы)// Новые данные по минералогии Урала. Свердловск. 1988. С. 23.
28. **Никель Е.Х.** Твердые растворы в номенклатуре минералов// ЗВМО. 1992. №2. С. 91.
29. **Роненсон Б.М.** Происхождение миаскитов и связь с ними редкометалльного оруденения// Геология месторождений редких элементов. М. 1966. Вып. 28. 174с.
30. **Павлишин В.И., Платонов А.Н., Польшин Э.В. и др.** Слюды с железом в четверной координации//ЗВМО. 1978. Ч. 107. Вып. 2. С. 165 - 180.
31. **Поляков В.О., Недосекова И.Л.** Минералогия апогипербазитовых фенитов и карбонатитов южной части Ильменских гор// Минералы месторождений и зон техногенеза рудных районов Урала. Свердловск: УрО АН СССР. 1990. С. 24 - 35.
32. **Полтавец Ю.А.** Обсуждение титаномагнетитового геотермометра Баддингтона - Линдсли на основе сравнительного анализа равновесий шпинелидов магнетитовой серии// Изв. АН. Серия геол. 1975. № 6. С. 63 - 72.
33. **Самойлов В.С.** Карбонатиты (фазии и условия образования). М. 1977. 291 с.
34. **Самойлов В.С.** Геохимия карбонатитов. М. 1984. 190 с.
35. **Свяжин Н.В.** Доломитовые карбонатиты Вишневогорского комплекса ультраосновных и щелочных пород// Изв АН СССР. Сер. геол. 1966. №5. С. 65 - 72.
36. **Таланцев А.С., Петрова Г.А.** Условия и механизм формирования карбонатитов Ильменогорско - Вишневогорского щелочного комплекса. Свердловск, 1991. 70с.
37. **Чернышева Е.А.** Минералы карбонатитов как индикаторы условий их формирования. Новосибирск. 1981. 152 с.
38. **Veen A.H. van der.** Calcite - dolomite intergrowths in high - temperature carbonate rocks. - Amer. Mineral. 1965. V50. № 11 -12. P. 2070.
39. **Le Bas M.J. and Srivastava R.K.** The mineralogy and geochemistry of the Mundwava carbonatite dykes, Sirohi District, Rajasthan, India// Neues Jahrbuch fur Mineralogie. Abhandlungn. Stuttgart. 1989. Band 160. Helf 2. P. 207 - 227.
40. **Leak E.B.** Nomenclature of amphiboles// The canadian mineralogist. 1978. V.16. November Part 4. P. 501 - 520.
41. **Toulmin P, Barton P.B.** A themodynamic study of pyrite and pyrrhotite/ Geochim. Cosmochim. Acta. 1964. 28. P. 651 - 671.
42. **Wooley A.R., Kempe D.R.C..** Carbonatite: nomenclature, average chemical compositions, and element distributions. In Bell K. (ed) Carbonatites: genesis and evolution. Unwin Hyman, London. 1989. P. 1 - 14.