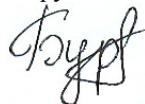


На правах рукописи



БУРЦЕВА Мария Владимировна

**ГИДРОТЕРМАЛЬНОЕ МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЕ В
КАРБОНАТИТАХ ЗАПАДНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ И ИНДИИ**

Специальность 25.00.11 – геология, поиски и разведка
твердых полезных ископаемых, минерагения

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Улан-Удэ
2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Геологическом институте СО РАН

Научный руководитель: кандидат геолого-минералогических наук
Рипп Герман Самуилович

Официальные оппоненты: доктор геолого-минералогических наук
Владыкин Николай Васильевич

кандидат геолого-минералогических наук
Мальцева Галина Дмитриевна

Ведущая организация: Институт геологии рудных месторождений,
петрографии, минералогии и геохимии РАН

Защита состоится 2 марта 2012 г. в 11⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 003.002.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Геологическом институте СО РАН по адресу: 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а.

Факс: 8 (3012) 43-30-24, e-mail: meta@gin.bscnet.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Геологическом институте СО РАН, по адресу: 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а.

Автореферат разослан “23” января 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат геолого-минералогических наук



Смирнова О.К.

Введение

Актуальность исследования.

Карбонатиты являются одним из основных источников редкоземельных и редких элементов. В них концентрируются ниобий, тантал, цирконий и легкие РЗЭ. Кроме того, в повышенных количествах содержатся уран, торий, стронций, барий, скандий и некоторые другие элементы. Они образуют как самостоятельные соединения, так и изоморфно входят в структуры других минералов. Рудоносность этих пород рассмотрена в многочисленных публикациях (Багдасаров, 2001, 2005; Карбонатиты, 1969; Капустин, 1971; Самойлов, 1977; Carbonatites, 1989 и др.). При этом на сегодняшний день наиболее изучены карбонатиты платформ и щитов, меньше внимания уделено проявлениям складчатых областей.

Говоря о повышенной концентрации редких элементов в карбонатитах, следует указать на их неравномерное распределение. В некоторых массивах редкометалльная минерализация отсутствует, в других она сосредоточена только в отдельных участках, в-третьих, установлена лишь спорадическая вкрапленность.

Исследованиями установлено (Mariano, 1989), что часть редкоземельной и редкометалльной минерализации в карбонатитах является гидротермальной. К числу таких примеров относятся месторождения Канганкунде (Малави) (Ngwenya, 1994; Wall & Mariano, 1996), Барра до Итапирауйа (Бразилия) (Andrade et al., 1999), Карасуг (Никифоров и др., 2006), Вуориярви (Булах и др., 1961), Себляярское (Булах и др., 1998) и некоторые Хибинские (Zaitsev, 1996; Zaitsev et al., 1998).

На территории Западного Забайкалья в последние годы установлена карбонатитоносная провинция, сформировавшаяся в этап позднемезозойского внутриконтинентального рифтогенеза (Рипп и др., 2000). В этот период в регионе отмечается вспышка щелочно-основного вулканизма, подтверждающая правомерность выделения позднемезозойского этапа тектонической и магматической активности. Карбонатиты в ее пределах характеризуются повышенными (до промышленных) содержаниями РЗЭ (Аршанское), стронция (Халютинское). После магматической стадии формирования карбонатиты были подвержены гидротермальным изменениям. А так как проблема преобразования рудоносных карбонатитов в связи с гидротермальными изменениями в известной нам литературе освещена еще недостаточно, то эти проявления послужили объектами специальных исследований. В целях оценки роли гидротермальных процессов в преобразовании карбонатитов нами проведено также изучение других проявлений Западного Забайкалья (Ошурковское, Южное), а также Индии, которые, в отличие от Западно-Забайкальских проявлений, сформировались в платформенных условиях. Образцы пород нам любезно

были предоставлены доктором Ш. Виладкаром (Центр исследований карбонатитов, Индия). Результатом совместных исследований стали публикации по проявлениям Амба Донгар и Аршанскому (Canadian Mineralogist, 2009; Известия Сибирского отделения секции наук о Земле РАН, 2010), Невании (Mineralogy and Petrology, 2010) и Хамамбетту (Canadian Mineralogist, в печати).

Цель и задачи исследований. Целью исследований была оценка роли постмагматических процессов в распределении рудных компонентов в карбонатитах.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Изучение минерального, химического и изотопного состава неизмененных и измененных карбонатитов.
2. Оценка РТ-условий постмагматических процессов в карбонатитах по данным изучения минеральных парагенезисов, геотермометров и термохимического исследования включений в минералах.
3. Установление закономерностей трансформации рудной минерализации в результате наложения гидротермальных процессов на карбонатиты.

Объекты исследования.

Исследования были проведены на проявлениях карбонатитов Западного Забайкалья (Аршанское, Халютинское, Южное, Ошурковское) и Индии (Амба Донгар, Хамамбетту, Невания). Расположение изученных проявлений показано на рисунке 1.

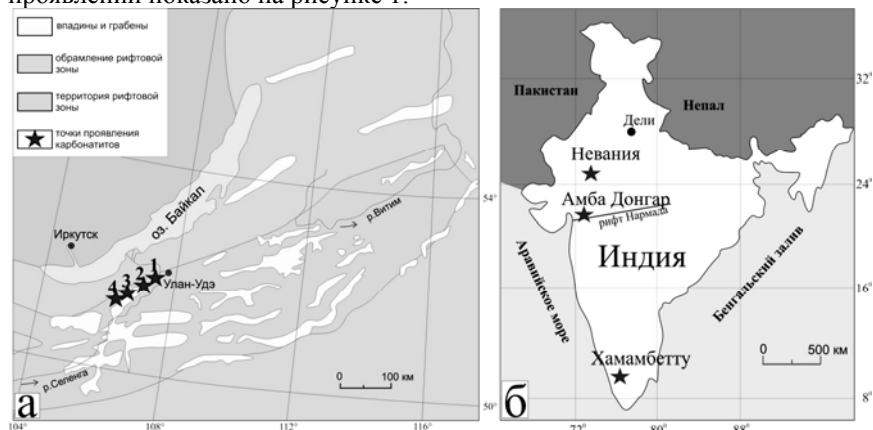


Рис. 1. Участки расположения карбонатитов: а) Западное Забайкалье: 1 – Ошурковский, 2 – Халютинский, 3 – Аршанский, 4 – Южный; б) Индия: Невания, Амба Донгар, Хамамбетту.

Состав большей части изученных проявлений соответствует кальциевым карбонатитам и только некоторые из них ложатся в поле магникокарбонатитов (Невания и часть Халютинских) (рис. 2).

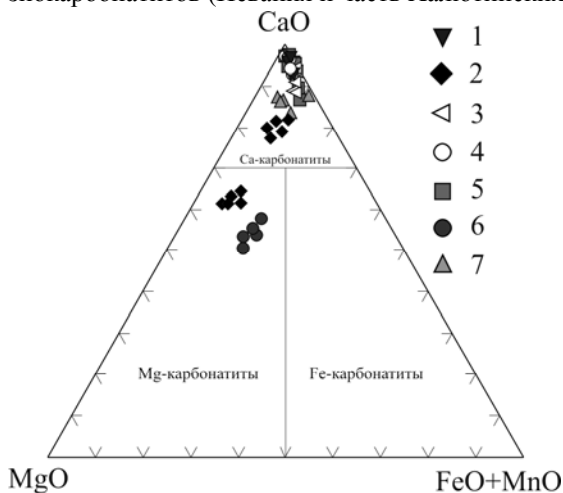


Рис. 2. Составы (мас. %) изученных карбонатитов. Проявления: 1 – Аршанское, 2 – Халютинское, 3 – Южное, 4 – Ошурковское, 5 – Амба Донгар по (Viladkar, 1996), 6 – Невания по (Viladkar, 1998), 7 – Хамамбетту.

Фактический материал и методы исследований.

В основу работы положены результаты, полученные автором при проведении работ на проявлениях Юго-Западного Забайкалья в период 2006-2011 г, материалы лаборатории Магматического рудообразования Геологического Института СО РАН, а также пробы и образцы из проявлений карбонатитов Индии, предоставленные сотрудником Центра исследований карбонатитов, доктором Виладкаром Ш. Исследования проводились по плановым темам лаборатории. Они включали петрохимическое, минералогическое, геохимическое (в том числе изотопное), термобарогеохимическое изучение пород.

При проведении анализа химического состава пород были использованы следующие методы: фотометрический, атомно-абсорбционный, потенциометрический и пламенно-фотометрический. Измерительные приборы: атомно-абсорбционный спектрофотометр ААС-№1 (Германия), спектрофотометр СФ-46 (Россия), иономер Анион – 4100. (аналитики Г.И. Булдаева, И.В. Боржонова, Э.М. Татьянакина). Содержания элементов-примесей определены ICP-MS (Иркутск, Институт геохимии СО РАН) и рентгено-флюоресцентным методом (VRA-30, Карл Цейс Иена, Германия) (Б.Ж. Жалсараев), редкоземельных элементов спектральным с предварительным химическим обогащением (спектрограф ДСФ-13 с решеткой 1200 штр/мм, Россия, Микроденситометр 100, Германия) (Т.И. Казанцева, Л.А. Левантуева) и ICP-MS (Иркутск, Институт геохи-

мии СО РАН). Состав минералов определен на модернизированном рентгеновском микроанализаторе MAP-3 (С.В. Канакин). В зависимости от состава минералов съемки проводились при 15-20 kV, ускоряющем напряжении тока зонда от 20 до 40 нА, времени измерения 20 сек и диаметре зонда 2-3 мкм. С целью получения более достоверного состава минералов, как правило, анализ проводился в нескольких точках. Микроструктурные особенности, взаимоотношения и однородность состава минералов изучались на электронном микроскопе LEO-1430 с энергодисперсионным спектрометром Inca Energy-300 (Н.С. Карманов).

Изотопному изучению были подвергнуты минералы из неизменных карбонатитов и гидротермалитов. Изотопные составы кислорода и углерода в карбонатных, кислорода в оксидах, апатите, силикатных и серы в сульфатных минералах определены в лаборатории стабильных изотопов Аналитического Центра ДВО РАН на прецизионных масс-спектрометрах Finigan MAT-252 и 253. Погрешность анализов не превышала для оксидов $\pm 0,05$, для карбонатов $\pm 0,02$, для сульфатов $\pm 0,01$.

Rb – Sr изохронный возраст карбонатитов и изотопные отношения стронция в безрубидиевых минералах определены В.Ф. Посоховым на масс-спектрометре МИ-1201 (ГИН СО РАН) и Finigan MAT (Байкальский аналитический центр коллективного пользования, г. Иркутск) и Институте геологии и геохронологии РАН (г. Санкт-Петербург) (аналитик В.М. Саватенков). U-Pb возраст карбонатитов определен по циркону (SHRIMP II) в ЦИИ ВСЕГЕИ (аналитик А.Н. Ларионов).

Включения в минералах изучены в 10 полированных пластинах толщиной до 0,3 мм оптическими и термобарогеохимическими методами. Для исследования были использованы пироксен и кварц из фенитов и монацит из карбонатитов. При проведении термометрических опытов с включениями использовался микроскоп Olympus VX51 с высокотемпературной камерой "Lincam 1500". Скорость нагревания образцов варьировала в среднем 15°C/мин.

За время работы было просмотрено более 50 прозрачных шлифов, выполнено свыше 1000 микронзондовых и электронномикроскопических анализов. При подготовке диссертации использовано 115 анализов стабильных изотопов, свыше 100 химических анализов макрокомпонентов, 60 анализов микрокомпонентов. Fe^{3+} и Fe^{2+} в минералах рассчитаны методом, описанным в работах (Brod et al., 2001; Robinson et al., 1982).

Оценка температур образования по апатит-флогопитовому термометру дана по (Ludington, 1993). Изотопно-кислородные температуры для пар сосуществующих (равновесных) минералов были определены по формуле: $1000 \ln \alpha = A \times 10^6/T^2(K)$, где $1000 \ln \alpha$ = разность изотопного состава кислорода, А = коэффициент фракционирования для пар минера-

лов, T = температура по Кельвину (Chacko et al., 2001). Температура и фугитивность кислорода для пары ильменит–магнетит вычислены с использованием программы ILMAT-1.20 (Powell and Powell, 1977; Spenser and Lindsley, 1981; Andersen and Lindsley, 1985).

Научная новизна работы.

1) Получены новые данные по минералогии и геохимии гидротермальноизмененных карбонатитов Западного Забайкалья и Индии.

2) Выявлена направленность процессов преобразования в них минералов на постмагматическом этапе. Установлено, что в связи с гидротермальными процессами происходили: перекристаллизация пород, замещение минералов, рафинирование их от примесей и переотложение последних с образованием новых минеральных видов, привнос гидротермальными растворами кремнезема, марганца и редкоземельных элементов.

3) Определены P – T –условия постмагматических процессов в карбонатитах.

4) Выявлено, что источниками гидротерм послужили: а) флюиды, выделившиеся при магматической дистилляции материнского очага, б) вовлеченные в гидротермальный процесс вадозовые воды.

Практическая значимость.

Установленные закономерности трансформации рудного вещества на постмагматической стадии вызывают необходимость учета влияния таких процессов при определении природы рудной минерализации, перспективности карбонатитовых проявлений и оценки технологических свойств карбонатитов.

Апробация работы и основные публикации. Результаты исследований по теме диссертации опубликованы в 18 работах: в 3 статьях (одна в печати) и 15 тезисах докладов. Основные положения работы докладывались на: X Международном Симпозиуме имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых “Проблемы геологии и освоения недр”, г. Томск, 2006; конференции посвященной 50-летию Сибирского отделения РАН и 80-летию чл.-кор. РАН Ф.П. Кренделева, “Геохимия и рудообразование радиоактивных, благородных и редких металлов в эндогенных и экзогенных процессах”, г. Улан-Удэ, 2007; Международной научно-практической конференции, посвященной 50-летию Бурятского ордена Трудового Красного Знамени геологического управления «Проблемы геологии, минеральных ресурсов и геоэкологии Западного Забайкалья» г. Улан-Удэ, 2007; XII Международном Симпозиуме имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых “Проблемы геологии и освоения недр”, г. Томск, 2008; Международной молодежной школе-семинаре “Рудоносность ультрамафит-мафитовых и карбонатитовых комплексов складчатых областей” Улан-Удэ, 2008; конференции молодых ученых

“Современные проблемы геохимии”, Иркутск, 2009; II Всероссийской молодежной научной конференции “Минералы: строение, свойства, методы исследования”, Миасс, 2010; Научной сессии ГИН СО РАН 2010; XI Всероссийском петрографическом совещании с участием зарубежных ученых “Магматизм и метаморфизм в истории Земли”, Екатеринбург, 2010; Пятой Сибирской международной конференции молодых ученых по наукам о Земле, Новосибирск, 2010; Всероссийской молодежной научной конференции “Геология Западного Забайкалья”, Улан-Удэ, 2011; конференции молодых ученых “Современные проблемы геохимии”, Иркутск, 2011.

Защищаемые положения.

I. Минеральные ассоциации карбонатитов изученных проявлений формировались в два этапа – магматический и гидротермальный.

II. Следствием постмагматических процессов явились:

а) перекристаллизация карбонатной матрицы, сопровождавшаяся изменением структурно-текстурных особенностей пород; б) растворение и замещение неустойчивых минералов; в) рафинирование минералов от примесей и переотложение последних в составе новообразований; г) дополнительный привнос гидротермальными растворами таких компонентов как PЗЭ, Mn и Si.

III. Источником гидротерм послужили: 1) продукты магматической дистилляции материнского очага, 2) воды вадозового происхождения.

Объем и структура работы.

Диссертация состоит из 4 глав, введения, заключения и списка литературы. Работа имеет объем 176 машинописных страниц, в том числе 100 рисунков, 79 таблиц. Список литературы состоит из 149 наименований, включая 85 публикаций зарубежных изданий.

Автор выражает глубокую признательность и благодарность научному руководителю к.г.-м.н. Г.С. Риппу за помощь, советы и долготерпение в проведении исследований и при подготовке работы. Автор искренне благодарен Н.Н. Егоровой за консультации при проведении петрографического изучения пород и А.Г. Дорошкевич за помощь в термометрических, минералогических и геохимических исследованиях, а также И.А. Избродину и М.О. Рампилову оказавшими содействие при подготовке работы.

Автор признателен к.г.-м.н. Н.С. Карманову и С.В. Канакину за выполнение электронно-микроскопических исследований и высококачественных микронзондовых анализов, а также А.А. Цыреновой, И.В. Борженовой, Г.И. Булдаевой, Н.Л. Гусевой, Б.Ж. Жалсараеву, Т.И. Казанцевой, Л.А. Левантуевой и В.Ф. Посохову.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Геологическом институте СО РАН, г. Улан-Удэ при финансовой поддержке грантов РФФИ: 08-05-98028-р-Сибирь-а, 11-05-00324; Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых (МК 2873.2010.5), научных школ (НШ-863.2008.5 и НШ-3848.2010.5).

Глава 1. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Интерес к исследованию карбонатитов обусловлен тем, что, с одной стороны, изучение этих пород, являющихся производными щелочных ультраосновных и основных комплексов, дает ценную информацию о процессах, происходящих в верхней мантии, о глубинах, условиях зарождения и последующей дифференциации силикатных и карбонатитовых магм, связи их с кимберлитовым магматизмом; с другой стороны, с ними связаны крупные месторождения ниобия, РЗЭ, циркония, железа, апатита, вермикулита и флюорита (Палабора, Ковдор, Аруша, Маунтин Пасс, Амба Донгар).

Понятие о рудных и безрудных карбонатитах ввели А.А. Фролов (1960), Л.К. Пожарицкая (1960) и Е.М. Эпштейн (1959), а проблемам рудоносности карбонатитов и связи с ними различных типов месторождений посвящены многочисленные публикации (Багдасаров и др., 2001, Woolley, 1989). Список месторождений, связанных с карбонатитами, приведен в монографических работах (Carbonatites, 1989, Карбонатиты, 1969, Багдасаров, 2001, 2005).

Формирование рудной минерализации в карбонатитах происходит как на собственно карбонатитовом этапе, так и при постмагматических процессах. При этом редкометалльное оруденение в карбонатитах нередко рассматривается как вторичное, образовавшееся в результате гидротермально-метасоматических процессов (Капустин, 1971, Самойлов, 1977).

Ю.Л. Капустин (1971) выделил два типа карбонатитов: ранние и поздние, отличающихся комплексом минеральных признаков, составами руд. Образование поздних карбонатитов он связывает с гидротермально-метасоматическими процессами, для которых им дана детальная минералогическая и петрографическая характеристика.

Поздние карбонатиты развиты в Салланлатвийском массиве, а в проявлениях Юго-Восточной Сибири они слагают крупные тела. В Гулинском комплексе, также как и массиве Кандагуба, присутствуют обе группы пород. В последнем поздние карбонатиты преобладают над ранними (Piliřiuk et al., 2001). Поля жил карбонатитов с ториево-редкоземельной минерализацией (близкие к поздним карбонатитам) известны в Фримонт

Каунти, Леми Каунти (Капустин, 1971). Они представлены зонами карбонатизации с флюоритом, минералами TR, Th и Ti, развитыми вблизи массивов Айрон-Хил, Магнет-Ков, а единичные жилы известны в проявлениях штатов Колорадо, Аризона, Монтана, Нью-Мехико и Аляска. Флюорит-барит-бастнезит-кальцитовые руды с повышенными концентрациями стронция встречаются на месторождении Маунтин-Пасс, а флюорит-барит-бастнезит-гематитовые руды проявлены в Салмон-Бей. Широко развиты поздние карбонатиты в многочисленных массивах Африки (Спицкоп, Тундулу, Круидфонтейн, Луеш). Редкоземельные флюорит-бастнезит-кальцитовые руды с повышенными количествами стронцианита (10-30%) и барита (2-5%) установлены на проявлении Канганкунде (Южная Африка).

В литературе описано пока еще немного проявлений карбонатитов, на которых детально изучались постмагматические процессы. Они показывают, что на гидротермальной стадии в карбонатитах образуются такие минералы как бастнезит, паризит, синхизит, монацит и анкилит. Эти минералы выполняют трещины или пустоты, ассоциируют с кварцем, флюоритом, баритом, гематитом, сульфидами. Минералы встречаются в виде вкрапленности или поликристаллических агрегатов, замещающих более ранние минералы. На месторождении Тамазет (Марокко) в измененных кальцитах содержание SrO уменьшилось с 2,8 мас. % до 0,5 мас. % и образовались мелкие ксеноморфные зерна стронцианита. Вторичный кальцит здесь слагает прожилки в стронцианите, барите и фторкарбонатах РЗЭ (Marks et al., 2009). На месторождении Барра до Итапирауа (Бразилия) по (Ruberti et al., 2008) в результате гидротермальных процессов в карбонатитах образовались кварц, барит, флюорит, стронцианит и фторкарбонаты РЗЭ (паризит, синхизит и бастнезит). Аналогично этому результатом гидротермальных процессов в карбонатитах Тундулу (Малави) явились кварц-баритовые жилы, содержащие паризит, синхизит и бастнезит (Ngwenya, 1994).

Главы 2 – 3. ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ, ГЕОХИМИЧЕСКИЕ И МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЙ КАРБОНАТИТОВ ЗАПАДНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ И ИНДИИ

В главах 2-3 приведены результаты детального изучения минерального состава карбонатитов Западного Забайкалья (Аршанское, Халютинское, Южное и Ошурковское проявления) и Индии (проявления Амба Донгар, Хамамбетту и Невания). Описание дано по схеме: “Геологическое строение участка и петрохимические особенности карбонатитов”, “Минеральный состав карбонатитов (минералы магматической стадии и постмагматической стадии)”, “Состав стабильных изотопов”. Они вклю-

чают типизацию минералов по способу образования, описание первичных магматических и гидротермальных парагенезисов, в том числе состав минеральных фаз, примесных элементов, изотопные составы С и О, результаты термобарогеохимического изучения препаратов и оценку температур по минеральным и изотопным геотермометрам.

Глава 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Проведенные исследования позволили выявить главные особенности гидротермальноизмененных карбонатитов, которые явились основой для следующих трех защищаемых положений:

1. Минеральные ассоциации карбонатитов изученных проявлений формировались в два этапа – магматический и гидротермальный.

Магматическая природа как Индийских так и Западно-Забайкальских карбонатитов обоснована в работах многочисленных исследователей (Рипп и др., 2000; Дорошкевич и др., 2004; Doroshkevich et al., 2008; Doroshkevich et al., 2010; Viladkar, 1996; Dar, 1964; Phadke et al., 1968). Свидетельством этому служат форма геологических тел (штоки, дайки и плащобразные тела), подобных магматическим образованиям, наличие высокотемпературных околоконтактных процессов (фенитизация, биотитизация), уровень содержания редких и редкоземельных элементов, бария, стронция подобный карбонатитам других регионов.

На Аршанском и Южном проявлениях результаты термобарогеохимического изучения бастнезита, являющегося ранним минералом, дают температуры, превышающие 520°C (Дорошкевич, 2004). На Халютинском и Ошурковском проявлениях в магнетите присутствуют ламеллы ильменита, представляющие структуры распада твердого раствора, которые, как известно, возникают при температуре не ниже 550°C.

На проявлении Невания в карбонатитах температура магматического этапа, определенная по апатит-биотитовому термометру (Ludington, 1993), варьирует от 693 до 978°C, по ильменит-магнетитовому термометру в интервале 463°C – 669°C (Powell and Powell, 1977; Spenser and Lindsley, 1981; Andersen and Lindsley, 1985). На проявлении Хамамбетту образование наиболее высокотемпературного парагенезиса карбонатитов по апатит-биотитовому термометру (Ludington, 1993) происходило при температуре от 790 до 980°C.

Изотопные составы кислорода (SMOW), углерода (PDB) и сульфатной серы (STD), в магматических минералах изученных проявлений, аналогичен мантийным меткам. В карбонатах Южного, Халютинского, Ошурковского и Аршанского проявлений величина $\delta^{18}\text{O}$ лежит в интервале 6-10 ‰, $\delta^{13}\text{C}$ -5...-7,4 ‰. Значения $\delta^{18}\text{O}$ в апатите и силикатных ми-

нералах в этих проявлениях варьирует от 3,9 до 7,8 ‰, а величины $\delta^{34}\text{S}$ в сульфатах от 10,6 до 13,2 ‰.

Температуры рассчитанные по изотопным составам кислорода в существующих первичных минералах для наиболее ранней генерации на Ошурковском проявлении составили 932–946°C, а для собственно карбонатитового парагенезиса 625°C. На Халютинском проявлении температура образования карбонатитов варьирует от 622°C до 777°C (Дорошкевич и др., 2009).

Гидротермальный этап обосновывается в первую очередь результатами термометрических исследований и характером минеральных выделений. Образовавшиеся на этой стадии минералы, образуют оторочки вокруг магматических: монацит по апатиту (Невания, Хамамбетту), паризит по бастнезиту (Южное, Аршанское и Халютинское проявления). Гидротермальные минералы встречаются в виде кальцитовых, стронцианитовых, кварцевых прожилков (все изученные проявления Западного Забайкалья и Амба Донгар, Индия).

По результатам изучения включений во флюоритах из карбонатитов Аршанского проявления температура равна 370–400°C (Дорошкевич, 2004). Вторичные газовой-жидкие включения в бастнезитах гомогенизируются при 290–360°C. Во флюоритах низкотемпературной гидротермальной стадии гомогенизация вторичных флюидных включений происходила при 130–170°C. Изучение газовой-жидких включений в монаците проявления Хамамбетту, гомогенизовавшихся в интервале 220–290°C, также свидетельствует об их гидротермальной природе.

На месторождении Амба Донгар сформировались калиевые и натриевые метасоматиты. По данным термобарогеохимического изучения образование натриевых фенитов происходило при 420°C, а калиевых при 120°C. Изучением включений во флюорите (Roedder, 1973) установлено, что формирование его происходило из низкосолевых (0,8–1,8 мас. % экв. NaCl), CO₂-содержащих водных флюидов при температуре 100–150°C.

Среди гидротермалитов часто присутствуют редкоземельные минералы. Источником части РЗЭ явились первичные апатит, бастнезит, монацит. При замещении бастнезита образовались паризит, синхизит, алланит. На Амба-Донгар взаимодействие, привнесенных РЗЭ с апатитом, привело к появлению вокруг зерен последнего оторочек флоренсита. Гидротермальное происхождение флоренсита отмечено в карбонатитах Канганкунде (McKie, 1962), а фторкарбонаты редких земель аналогичного происхождения описаны в карбонатитах Канганкунде, Африка (Wall et al., 1996) и Барра до Итапирауа, Бразилия (Ruberti et al., 2008).

В результате гидротермальных процессов происходила трансформация изотопных составов кислорода, углерода, серы, стронция, возникла

их изотопная гетерогенность. В перекристаллизованном кальците величина $\delta^{18}\text{O}$ стала подобной значениям характерным для измененных гидротермальными процессами карбонатитов (Santos and Clayton, 1995).

II. Следствием постмагматических процессов явились:

а) перекристаллизация карбонатной матрицы, сопровождавшаяся изменением структурно-текстурных особенностей пород; б) растворение и замещение неустойчивых минералов; в) рафинирование минералов от примесей и переотложение последних в составе новообразований; г) дополнительный привнос гидротермальными растворами таких компонентов как RЗЭ, Mn и Si.

Перекристаллизация карбонатной матрицы, сопровождавшаяся изменением структурно-текстурных особенностей пород. В первичных массивных, равномернозернистых и полосчатых породах (рис. 3 а) появляются такситовость, прожилковые, цементные, коррозионные текстуры. Они сопровождаются образованием поздних генераций кальцита, доломита, представленных гнездообразными выделениями, прожилками (рис. 3 б, в), которые нередко встречаются и во вмещающих породах.

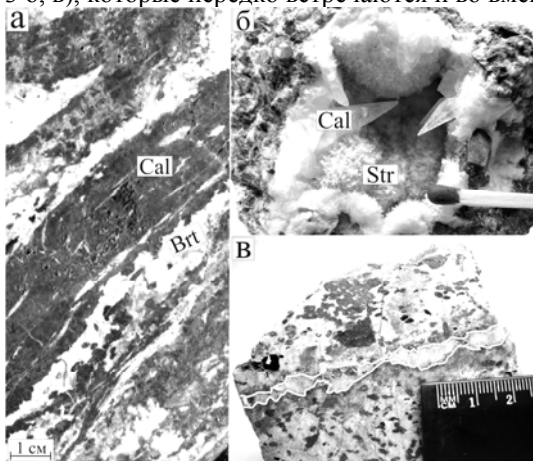


Рис. 3. Халютинское месторождение: а) полосчатая текстура, Cal – кальцит, Brt – барит; б) гнездообразное выделение поздних стронцианита (Str) и кальцита, в) прожилок позднего кальцита в карбонатите.

Растворение и замещение неустойчивых минералов. При воздействии постмагматических растворов многие минералы становятся неустойчивыми, корродируются и замещаются другими минералами. Примером этого может служить бастнезит (рис. 4), который замещается паризитом (Аршанское, Южное, Халютинское проявления).

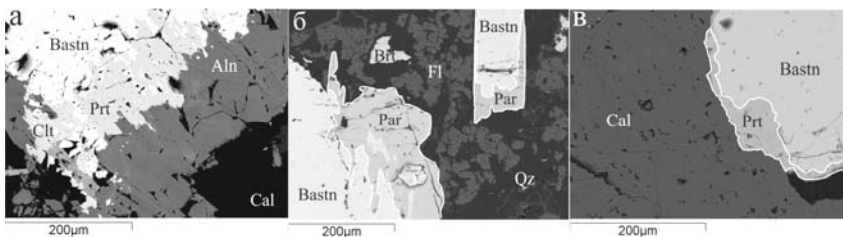


Рис. 4. Паразит (Prt), развивающийся по бастанезиту (Bastn). а) Аршан, б) Южный, в) Халюта. Aln – алланит, Cal – кальцит, Clt – целестин, Brt – барит, Fl – флюорит, Qz – кварц.

На проявлениях Амба Донгар и Невания пиррохлор под воздействием гидротермальных растворов превращен в агрегат колумбита и кварца (рис. 5).

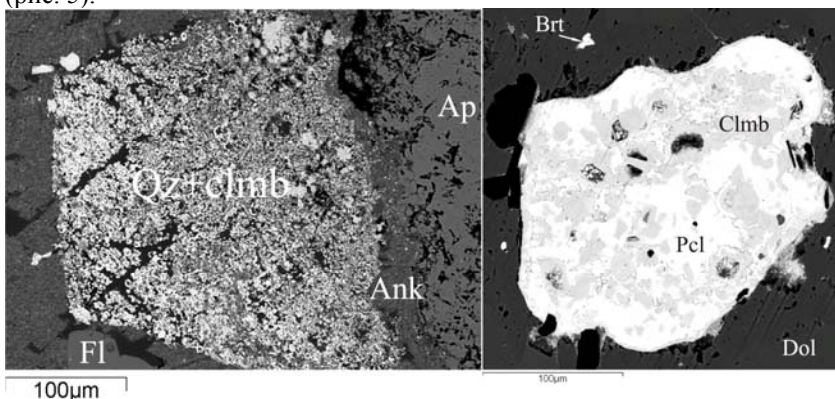


Рис. 5. а) Амба Донгар. Псевдоморфоза мелкозернистого кварц-колумбитового (Qz-clmb) агрегата по пиррохлору. б) Невания. Псевдоморфное замещение пиррохлора (Pcl) колумбитом. Ap – апатит, Ank – анкерит, Fl – флюорит, Dol – доломит, Brt – барит.

Более устойчив апатит, но его края нередко корродированы (Амба Донгар, Хамамбетту, Невания). В результате этого содержание стронция и РЗЭ в минерале понижается. На Амба Донгар апатит не только корродирован, но и замещен флоренситом (рис. 8).

Рафинирование минералов от примесей и переотложение компонентов с образованием новых минеральных фаз. Перекристаллизация карбонатов в результате гидротермальных процессов сопровождалась рафинированием минералов от примесей. В доломите и кальците многих проявлений карбонатов, изначально содержание SrO составляло не менее 1-2 мас. % (Аршан, Халюта, Невания, Ошурково), достигая иногда более 5 мас. % (Хамамбетту). В перекристаллизованных карбонатах содержание стронция падает до сотых долей % (рис. 6). Вынесенные эле-

менты нередко образуют новые минеральные фазы. Среди последних наиболее распространены кальцит, монацит, алланит, целестин и стронцианит.

На проявлениях Хамамбетту, Аршан, Халюта, Южный, Невания, Амба Донгар, выделившийся стронций зафиксировался в виде новообразований целестина и стронцианита, которые образуют прожилки, вкрапленность и гнездообразные скопления неправильной формы, в том числе во вмещающих породах за пределами карбонатитовых тел.

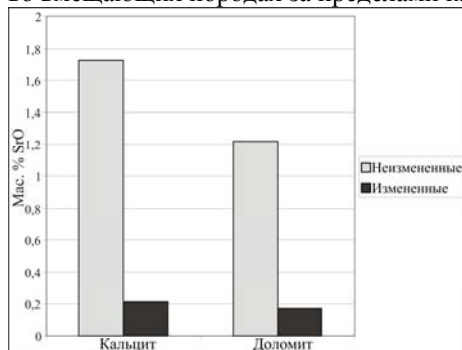


Рис. 6. Обобщенная диаграмма соотношения концентраций стронция в магматических (первичных) и гидротермальных карбонатах (количество проб – 140).

Аналогичный процесс отмечен и в апатитах. Изначально содержания стронция и РЗЭ в первичных апатитах достигали нескольких мас. %, а в измененных они понизились до десятых долей мас. % (рис. 7).

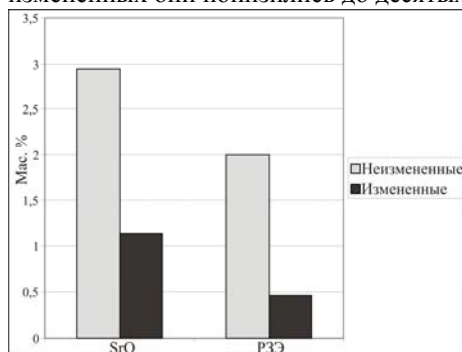


Рис. 7. Обобщенная диаграмма соотношения концентраций стронция и РЗЭ в магматическом (первичном) и гидротермальноизмененном апатите из карбонатитов Амба Донгар, Хамамбетту, Невании (количество проб – 60).

Миграция редкоземельных элементов из апатита сопровождалась появлением по краям зерен и трещинкам новообразованных монацита, флоренсита (рис. 8). Подобное рафинирование апатита от РЗЭ в результате поздних процессов описано и в других проявлениях карбонатитов. Так, в провинции Слэйв (Канада) перекристаллизация также сопровождалась образованием монацита в апатите (Villeneuve et al., 1998), а на Мушугайском месторождении с этим процессом связано появление в карбонатитах агрегатных скоплений перьеррита (Рипп и др., 2005).

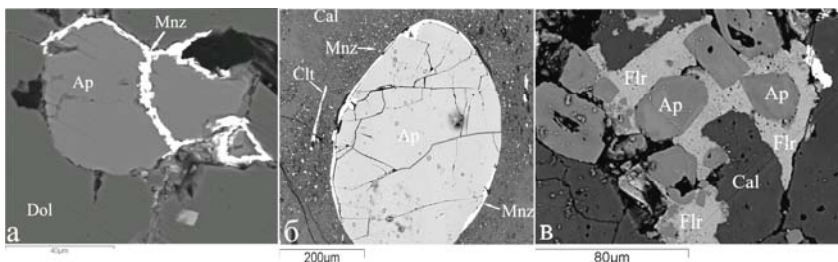


Рис. 8. Выделения монацита (Mnz) по периферии зерен апатита (Ap): а) Неванья, б) Хамамбетту. в) замещение апатита флоренситом (Flr) на Амба Донгар. Dol – доломит, Cal – кальцит, Clt – целестин.

Дополнительный привнос компонентов гидротермальными растворами. Привнос гидротермальными растворами кремния и алюминия обусловил образование алланита, кварца, флоренсита. Появление среди гидротермалитов паризита, синхизита, монацита, барита, стронцианита указывает на повышенную концентрацию в растворах бария, стронция, серы и редкоземельных элементов. Это согласуется с экспериментами Вендландта и Харрисона (1979), которые, при изучении системы карбонатитовый расплав – CO₂, показали обогащение флюидной фазы редкоземельными элементами.

В растворах содержался также марганец, о чем свидетельствует увеличение содержания этого элемента в гидротермальных минералах (рис. 9), появление его собственных минеральных фаз (голландита).

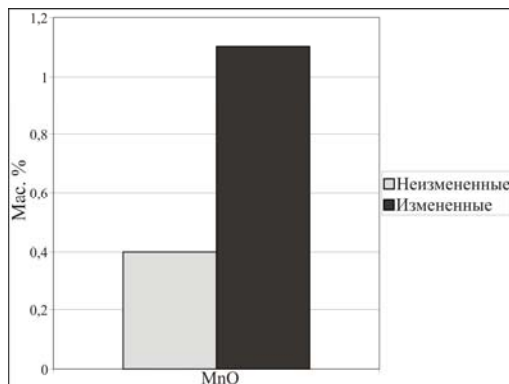


Рис. 9. Обобщенная диаграмма соотношения концентрации марганца в магматических (первичных) и гидротермальных карбонатах (количество проб – 120).

III. Источником гидротерм послужили: 1) продукты магматической дистилляции материнского очага, 2) воды вадозового происхождения.

Анализом изотопных составов кислорода и углерода в карбонатах проявлений Аршан, Халюта, Ошурково и Южный выявлено существен-

ное отличие первичных и постмагматических минералов. В перекристаллизованных и новообразованных минералах фиксируется изотопная гетерогенность. При этом изотопные составы и тренды их эволюции, в значительной мере, определены источниками гидротерм. В одних случаях получены свидетельства о вовлечении в гидротермальную систему вод вадозового источника, в других – состав обусловлен преобразованиями под действием остаточных постмагматических растворов, выделившихся из материнского очага.

Источником гидротерм послужили продукты магматической дистилляции материнского очага. Считается, что в связи с высокой флюидонасыщенностью карбонатитовый расплав последовательно переходит в расплав-рассол и затем в гидротермальный раствор (Лапин, 1980). Гидротермы, поступающие из карбонатитового очага, предполагаются для Халютинского, Ошурковского, Южного проявлений (Дорошкевич и др., 2009). В результате, перекристаллизованные карбонаты обогатились тяжелым кислородом и легким углеродом (рис. 10). Еще более контрастно эта тенденция зафиксировалась в гидротермальных прожилках кальцита и стронцианита (Халютинское проявление). Утяжеление кислорода отмечено и в других минералах, подвергшихся изменению. Оно зафиксировано в мартитизированном магнетите, хлоритизированном флогопите.

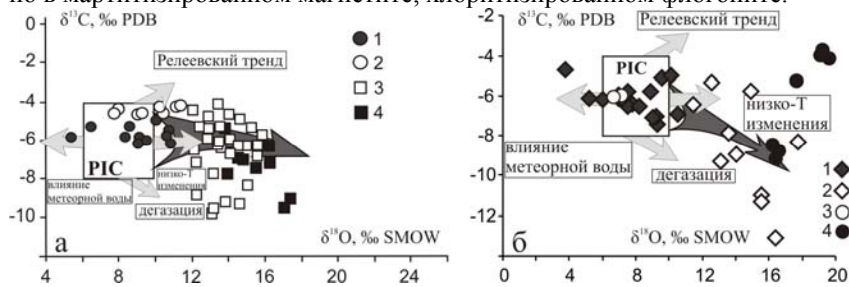


Рис. 10. Тренды эволюции изотопных составов С и О в карбонатах на гидротермальном этапе. а) **Халютинское месторождение** – неизменные карбонаты: кальцит (1) и доломит (2); рекристаллизованный кальцит (3), кальцит и стронцианит из гидротермальных прожилков (4). б) **Ошурковский**: 1 - неизменные поздними процессами карбонаты, 2 - кальциты рекристаллизованных карбонатов; **Южный участки**: 3 - неизменные поздними процессами карбонаты, 4 - кальциты рекристаллизованных карбонатов. PIC - поле составов О и С магматических карбонатов по (Taylor et al., 1967). Светлыми стрелками показаны тренды эволюции изотопного состава кислорода и углерода в карбонатах по (Demeny, 2004).

Источником гидротерм послужили воды вадозового происхождения. Влияние вадозовых вод отчетливо зафиксировано в карбонатах Аршанского месторождения. Здесь участие метеорных вод на посткарбо-

натитовом этапе обусловило изотопный сдвиг по кислороду вплоть до отрицательных значений $\delta^{18}\text{O}$ и коррелируется со степенью преобразования минералов. Так, если величина $\delta^{18}\text{O}$ в первичном бастнезите (6‰) ложится в контур мантийного квадрата (рис. 11), то в частично замещенном паризите уменьшилась до +2‰, а в алланите, являющимся конечным продуктом изменения бастнезита и паризита, опустилась до -4,0 ‰. Аналогично этому в неизменном флогопите величина $\delta^{18}\text{O}$ равна +4,4‰, в его хлоритизированной разновидности уменьшилась до -0,5‰. Перекристаллизованные и новообразованные фторкарбонаты, кальциты из прожилков обогащены легким кислородом (вплоть до отрицательных значений $\delta^{18}\text{O}$). Подобное участие метеорного источника в гидротермальных растворах отмечено в породах комплекса Фен (Andersen, 1987).

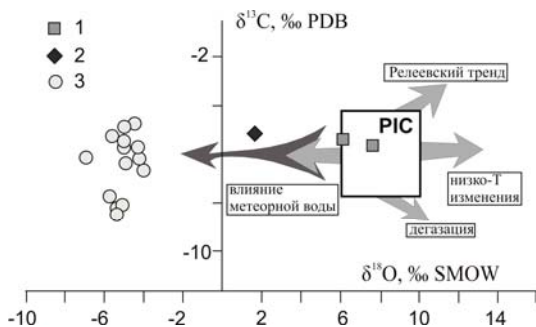


Рис. 11. Тренд эволюции изотопных составов С и О в карбонатах на гидротермальном этапе на Аршанском месторождении: 1 – бастнезит магматический, 2 – бастнезит частично замещенный паризитом и алланитом, 3 – рекристаллизованный кальцит. PIC – поле составов О и С магматических карбонатов по (Taylor et al., 1967).

Светлыми стрелками - показаны тренды эволюции изотопного состава кислорода и углерода в карбонатах по (Demeny, 2004).

Заклучение

Проведенные исследования позволяют сделать несколько выводов, касающихся оценки качества рудоносных карбонатов. Постмагматические процессы в карбонатах, с одной стороны, обуславливают ухудшение качества руд, с другой – их улучшение.

К числу первых относится:

1. Появление резкой неоднородности в распределении рудных компонентов. Последняя, в значительной мере, определяется характером тектонических нарушений и интенсивностью постмагматических процессов. На Халютинском месторождении этим обусловлены вариации содержания стронция от десятых долей % до 15-20 мас. % SrO.

2. Ухудшение качества руд в результате замещения технологичных минералов менее технологичными. На Аршанском проявлении главным источником РЗЭ является бастнезит. В результате гидротермальных процессов он замещался паризитом, а затем алланитом. Так как алланит не

представляет промышленной значимости, доля извлекаемых редкоземельных элементов уменьшилась примерно на 15 %. При сравнении составов РЗЭ от бастнезита к паризиту и далее к алланиту фиксируется уменьшение роли лантана и увеличение – неодима.

3. Вынос части рудных компонентов за пределы карбонатитовых тел, где они выполняют трещины, пустоты во вмещающих породах (рис. 3). Примером этого служат стронцианитовые прожилки во вмещающих породах Халютинского месторождения и проявления Амба Донгар.

4. Привнос с гидротермальными растворами кремнезема и его неравномерное распределение в карбонатитах. Содержание кварца иногда достигает (как, например на Аршан-Халютинском участке) 30-75 % объема пород.

Со вторыми связано:

1. Превращение некоторых минералов (целестина и баритоцелестина) в более технологичные (стронцианит). К этому же приводит рафинирование карбонатов от присутствующего в них стронция, апатитов от РЗЭ, с выделением таких минеральных фаз как монацит и стронцианит.

2. Привнос гидротермальными растворами дополнительного количества рудных компонентов. Например, в гидротермальноизмененных карбонатитах Амба Донгар, относительно первичных пород, существенно повысилось содержание таких элементов как Ва и РЗЭ.

Список опубликованных работ по теме диссертации

1. **Бурцева М.В.**, Виладкар Ш.Г. Гидротермальная редкометаллическая и редкоземельная минерализация щелочного карбонатитового комплекса Амба Донгар (Индия) // Материалы Всероссийской конференции с иностранным участием, посвященной 50-летию Сибирского отделения РАН и 80-летию чл.-кор. РАН Федора Петровича Кренделева. Изд-во БНЦ: Улан-Удэ, 2007. С. 44-47.

2. **Бурцева М.В.**, Дорошкевич А.Г. Посткарбонатитовые гидротермальные процессы Аршанского редкоземельного месторождения // Материалы международной научно-практической конференции, посвященной 50-летию Бурятского ордена Трудового Красного Знамени геологического управления. Изд-во БНЦ: Улан-Удэ, 2007. С. 26-28.

3. **Бурцева М.В.**, Дорошкевич А.Г. Минерально-геохимические особенности Торейской карбонатной жилы // Труды X Международного симпозиума студентов и молодых учёных имени академика М.А. Усова. Изд-во ТПУ: Томск, 2006. С. 75-77.

4. **Бурцева М.В.**, Дорошкевич А.Г. Посткарбонатитовые гидротермальные процессы Аршанского редкоземельного месторождения // Тру-

ды XII международного симпозиума студентов и молодых учёных имени академика М.А. Усова. Изд-во ТПУ: Томск, 2008. С. 159-161.

5. **Бурцева М.В.** Редкоземельная минерализация в карбонатитах Аршанского месторождения (Западное Забайкалье) // Материалы международной молодежной школы-семинара “Рудоносность ультрамафит-мафитовых и карбонатитовых комплексов складчатых областей”. Изд-во БНЦ: Улан-Удэ, 2008. С. 13-16.

6. **Бурцева М.В.**, Дорошкевич А.Г. Первые данные изучения флюидных включений в фенитах щелочно – основного карбонатитового комплекса Амба Донгар, Индия // Материалы XIII всероссийской конференции по термобарогеохимии совместно с IV симпозиумом APFIS ... 2008. С. 82-84.

7. **Бурцева М.В.**, Дорошкевич А.Г. Устойчивость минералов и подвижность элементов на этапе постмагматического преобразования карбонатитов // Материалы конференции молодых ученых “Современные проблемы геохимии”. Изд-во УРАН Института географии им. В.Б.Сочавы СО РАН: Иркутск, 2009. С. 124-127.

8. Doroshkevich A.G., Viladkar S.G., Ripp G.S., **Burtseva M.V.** Hydrothermal REE mineralization in the Amba Dongar carbonatite complex, Gujarat, India // The Canadian Mineralogist. 2009. Vol. 7. № 5. P. 1105-1116.

9. Рипп Г.С., Дорошкевич А.Г., **Бурцева М.В.**, Ласточкин Е.И., Виладкар Ш. Эндогенные постмагматические изменения в карбонатитах // Материалы Всероссийской петрографической конференции «Петрология магматических и метаморфических комплексов». ЦНТИ: Томск, 2009. С. 276-281.

10. **Бурцева М.В.** Гидротермальные процессы в карбонатитах Аршанского месторождения (Западное Забайкалье) // Материалы II Всероссийской молодежной научной конференции “Минералы: строение, свойства, методы исследования”. Миасс: УрО РАН, 2010. С. 106-107.

11. **Бурцева М.В.** Постмагматическая минерализация в карбонатитах Хамамбетту (Индия) // Материалы XLVIII Международной научной студенческой конференции “Студент и научно-технический прогресс”. Новосибирск: Новосиб. гос. ун-т, 2010. С. 67.

12. **Бурцева М.В.**, Дорошкевич А.Г., Рипп Г.С., Виладкар Ш. Эндогенные постмагматические изменения в карбонатитах // Тезисы докладов XI Всероссийского петрографического совещания с участием зарубежных ученых “Магматизм и метаморфизм в истории Земли”. Екатеринбург: Институт геологии и геохимии УрО РАН, 2010. Т.1. С. 92-93.

13. **Бурцева М.В.** Гидротермальная минерализация в редкоземельных карбонатитах Аршанского месторождения (Западное Забайкалье) //

Геология, поиски и разведка рудных месторождений. Известия Сибирского отделения секции наук о Земле РАН. 2010. № 1(36). С. 34-40.

14. **Burtseva M.V.**, Doroshkevich A.G., Ripp G.S. Endogenic carbonate mineralization in the area of Oshurkovski massif // *Geochemistry of magmatic rocks-2010. Abstracts of XXVII International conference School «Geochemistry of Alkaline rocks»*. Moscow-Koktebel', 2010. P. 32-33.

15. **Бурцева М.В.**, Дорошкевич А.Г., Рипп Г.С. Гидротермальная минерализация в карбонатитах Хамамбетту (Индия) // Тезисы докладов V Сибирской конференции молодых ученых по наукам о Земле. Новосибирск, 2010.

16. **Бурцева М.В.**, Рипп Г.С., Дорошкевич А.Г., Канакин С.В. Редкоземельные минералы в карбонатитах Юго-Западного Забайкалья // Материалы всероссийской молодежной научной конференции "Геология Западного Забайкалья". Улан-Удэ: Изд-во Бурятского госуниверситета, 2011. С.17-21.

17. **Бурцева М.В.**, Дорошкевич А.Г., Рипп Г.С. Геохимические особенности пород Ошурковского габбро-сиенитового массива // Материалы конференции молодых ученых "Современные проблемы геохимии". Изд-во Института географии им. В.Б.Сочавы СО РАН: Иркутск, 2011. С. 45-49.

18. **Burtseva M.V.**, Ripp G.S., Doroshkevich A.G., Viladkar S.G., Ram-mohan V. Features of mineral composition of the Khamambettu carbonatites (India) // *Canadian Mineralogist* in press).