

ТЕРМОКРИОМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФЛЮИДНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ В КАЛЬЦИТЕ ПИРОХЛОРОВЫХ КАРБОНАТИТОВ (РУДНАЯ ЗОНА 140 ВИШНЕВОГОРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ НИОБИЯ, ЮЖНЫЙ УРАЛ)

© 2019 г. С. В. Прибавкин, И. Л. Недосекова, А. А. Гараева

Рассматриваются состав и температуры гомогенизации вторичных флюидных включений в кальците пироклоровых карбонатитов рудной зоны 140 Вишневогорского месторождения ниобия в связи с проблемой генезиса карбонатитов Ильмено-Вишневогорского щелочного комплекса. Показано, что флюидные включения в кальците имеют температуру гомогенизации 220–310°C и состоят из водного раствора NaCl + KCl соленостью от 2.4 до 6.7 мас. % эквивалента NaCl и водяного пара. Высказано предположение о связи включений с гидротермальным этапом преобразования пород комплекса на постколлизийной стадии развития Уральского складчатого пояса.

Расплавные и флюидные включения минералогической среды служат одним из главных источников генетической информации, помогающим установить исходный состав расплава и особенности его эволюции. Они несут в себе важную информацию о РТ-параметрах кристаллизации пород и условиях рудогенеза.

Данная работа посвящена изучению водно-солевых флюидных включений в кальцитах карбонатитов рудной зоны 140 Вишневогорского месторождения пироклора. Интерес к их изучению вызван крайне ограниченными данными по включениям в карбонатитах Ильмено-Вишневогорского комплекса (ИВК) [Таланцев, Петрова, 1991] и призван расширить наши знания условий формирования карбонатитов и рудной минерализации этого уникального по происхождению объекта.

Щелочные породы Ильмено-Вишневогорского комплекса, представляющего собой глубинный по происхождению массив нефелиновых сиенитов (миаскитов), расположены в осевой части Сысертско-Ильменогорского метаморфического блока, локализуясь в ядре крупных антиклинорных складок [Роненсон, 1966; Левин и др., 1997; Недосекова и др., 2009; Nedosekova et al., 2013; и др.]. Связанные с щелочными породами комплекса карбонатиты расположены в подынтрузивной (карбонатиты Увильдинского и Потанинского месторождений центральной щелочной полосы) и апикальной (карбонатиты рудных зон 147, 140, 125 Вишневогорского месторождения) частях миаскитовых плутонов.

На северном замыкании Вишневогорского миаскитового массива расположена наиболее богатая пироклором рудная зона 140. Согласно материалам [Левин и др., 1997] она сложена карбонатитами, альбититами и миаскитовыми пегматоидами и контролируется сочетанием разрывных структур двух типов: надвигами, поверхность которых

совпадает с гнейсовидностью миаскитов или пересекает ее под острым углом, и пучками разрывов на запрокинутых крыльях складок течения. Протяженность зон надвигов до 1.5 км, мощность 5–10 м. Надвиги сопровождаются складками волочения в лежащем боку и трещинами оперения, отходящими от них под острым углом. Карбонатиты приурочены к зонам надвигов, где образуют систему ветвящихся жил мощностью от нескольких сантиметров до 1.5–2.0 м. Жилы имеют множество раздувов и пережимов, сложены крупнозернистым кальцитом с редкими крупными кристаллами биотита, апатита, полевых шпатов, пироклора, акцессорным ильменитом, пирротинитом, пиритом, реже встречаются бастнезит, анкилит, стронцианит.

Исследование флюидных включений проводилось на термокриостоліке THMSC-600 фирмы Linkam с длиннофокусным объективом $\times 100$, установленном на микроскопе Amplival по стандартной методике. Состав основных солевых компонентов раствора определялся по температурам эвтектики [Борисенко, 1977], концентрация солей во флюиде рассчитывалась по температурам плавления последних кристалликов льда для солевой системы NaCl-H₂O [Bodnar, 1993]. Температуры гомогенизации определялись по точке перехода газа в раствор.

В кальцитовых карбонатитах (обр. В-140-39) рудной зоны 140 Вишневогорского месторождения ниобия нами были изучены флюидные включения, условно разделенные на первичные и вторичные. К первичным отнесены включения, равномерно распределенные в объеме кальцита, в виде отдельных изолированных вакуолей, а также приуроченные к трещинам внутри зерен, не достигающих внешних границ. Они имеют ограниченную или овальную форму размером 5–15 мкм с меняющимся соотношением газа и жидкости от 1:4 до 2:3. К вторичным включениям отнесены те, что приурочены к тре-

Таблица 1. Результаты термокриометрического изучения газовой-жидких включений в кальците

№	Размер, мк	T _{гом} , °C	T _{эвт} , °C	T _{лд} , °C	% NaCl экв.	V, %
Первичные						
1.4	6.4	298	-31.8	-4.1	6.6	30
1.5	5.2	267	-22.6	-4.7	7.4	40
1.3	8.2	277	-	-4.1	6.6	20
1.6	9.6	254	-22.5	-3.3	5.4	15
1.7	4.8	293	-	-4.2	6.7	30
1.8	6.5	282	-	-4.5	7.2	40
1.10	13.8	241	-24.8	-4.5	7.2	15
3.1	15.2	222	-23.5	-3.5	5.7	15
3.1a	14.7	219	-23.5	-3.5	5.7	15
3.9	12.6	235	-29.1	-4.2	6.7	20
3.10	10.3	273	-24.8	-4.7	7.4	20
4.11	10.3	307	-27.5	-3.2	5.3	30
3.3	11.4	219	-31.2	-3.4	5.6	20
4.6	12.3	236	-25.3	-3.8	6.2	15
Вторичные						
3.6	16.5	208	-22.4	-4.2	6.7	≤10
3.2	23.8	193	-23.6	-3.8	6.2	≤10
3.4a	10.6	184	-22.8	-2.8	4.7	≤10
3.4	12.1	176	-22.3	-2.6	4.3	≤10
4.7	10.7	168	-24.7	-2.6	4.3	≤10
4.3	46.3	159	-25.4	-2.3	3.9	≤10
3.5	14.5	155	-21.2	-1.7	2.9	≤10
1.9	26.4	136	-	-1.4	2.4	≤10
3.8	25.2	-	-	-1.5	2.6	≤10

Примечание. Приведены вариации значений температур гомогенизации (T_{гом}), эвтектики (T_{эвт}), плавления последней льдинки (T_{лд}), а также солёности (% NaCl экв.) и заполненности включений паром (V).

щинам различного характера. Среди них преобладают вытянутые, реже имеющие отрицательную форму включения, с размерами по длинной стороне от 10 до 50 мкм и более с соотношением газа и жидкости 1:9.

Температура гомогенизации первичных флюидных включений наступает при 220–307°C. Концентрация солей в них определена по температуре плавления последней льдинки в интервале от -4.7 до -3.2°C и соответствует величине солёности 5.3–7.4 мас. % эквивалента NaCl (табл. 1, рис. 1). Судя по значению температуры эвтектики, находящейся в интервале от -22.5 до -31.8°C, в солевом составе раствора включений преобладает NaCl с примесями KCl и, возможно, MgCl₂. Вторичные флюидные включения гомогенизируются в жидкость в диапазоне температур 136–208°C. Они обладают низкой солёностью, меняющейся от 6.7 до 2.4 мас. % эквивалента NaCl, и температурой эвтектики от -21.2 до -25.4°C, отвечающей раствору NaCl с примесью

KCl (см. табл. 1, рис. 1). В газовой фазе включений обоих типов не обнаружены признаки низкокипящих газов: углекислоты, метана и др., только водяной пар, в связи с чем давление рассчитывалось как давление насыщенного пара воды и составляло 0.025–0.090 кбар.

Исследование флюидных включений в кристаллах кальцита ранних карбонатитов (севитов I) Потанинского участка и апатита брекчиевидных карбонатитов Увильдинского участка центральной щелочной полосы было выполнено ранее А.С. Таланцевым [Таланцев, Петрова, 1991]. Главным результатом этого исследования явилась находка первичных многофазных натро-кальциево-углекислотных флюидных включений карбонатитообразующей среды, захваченных при температуре свыше 400°C и высоком давлении. Они содержали кристаллики содовых минералов (нахколита, пирсонита, ньерерита), водный солевой раствор солёностью 16 мас. % эквивалента NaCl и газовую фазу CO₂.

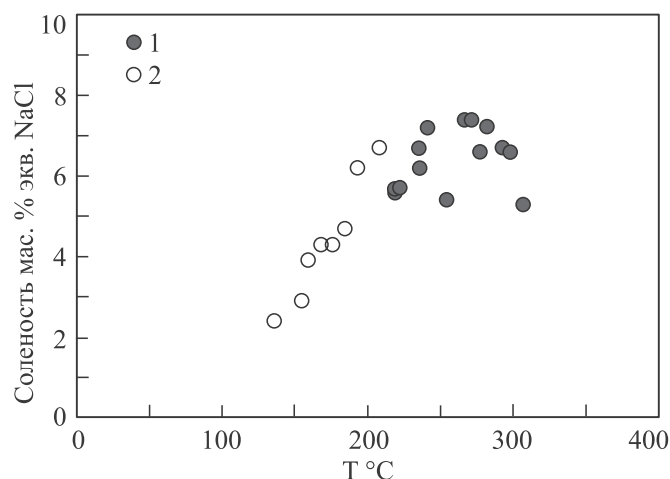


Рис. 1. Диаграмма соленость–температура гомогенизации для условно первичных (1) и вторичных (2) флюидных включений.

В нашем образце таких включений не выявлено, тем не менее полученные данные во многом идентичны данным о составе вторичных флюидных включений в работе [Таланцев, Петрова, 1991]. Согласно этим авторам, вторичные включения являются двухфазными, группирующимися по поверхностным зонам роста и залеченным трещинам. Температуры их гомогенизации варьируют от 110 до 250°C, в них отсутствует обособленная фаза CO₂, что указывает на потерю флюидом углекислоты на конечном этапе развития карбонатитообразующей системы вследствие ее открытости, то есть связью с дневной поверхностью. Поэтому все изученные нами включения в интерпретации [Таланцев, Петрова, 1991] являются вторичными.

Согласно той же работе, оценка температур образования поздних карбонатных прожилков методом доломит-кальцитовой термобарометрии характеризует этап завершения карбонатитового процесса и в большинстве случаев совпадает с данными по флюидным включениям. Например, для тонкого кальцит-анкеритового прожилка, секущего брекчиевидные карбонатиты Увильдинской полосы, были получены значения температур 165°C и гидростатической нагрузки 0.22 кбар, что соответствует глубине 2.5–3.5 км (расчет глубины произведен из предположения об открытости системы согласно данным флюидных включений). Близкие значения, отвечающие 150–240°C и 0.17–0.22 кбар, получены и для других бикарбонатных прожилков центральной щелочной полосы. Несколько более высокие значения температур и давлений, отвечающие 280°C и гидростатической нагрузке 0.33–0.41 кбар, по предположению А.С. Таланцева [Таланцев, Петрова, 1991], характеризуют завершение карбонатитообразования в рудной зоне 140 Вишневогорского месторождения.

Важным результатом, следующим из полученных нами данных и данных предшественников [Таланцев, Петрова, 1991], является то, что вторичные флюидные включения как в центральной щелочной полосе, так и в апикальной части Вишневогорского миеаскитового массива на севере (рудная зона 140) близки по составу и температурам гомогенизации, а также близки условиям образования доломит-анкерит-кальцитовых парагенезисов в поздних карбонатных прожилках и друзовых агрегатах кальцита из секущих миеаскитовый массив трещинных зон. Связь этих включений с завершением процесса карбонатитообразования, когда на заключительных этапах системы становятся открытыми и теряют углекислоту, а давление снижается до гидростатической нагрузки, как полагал А.С. Таланцев [Таланцев, Петрова, 1991], вероятно. Например, близкие по температурному режиму и составу остаточные флюиды фиксируются в карбонатитах ряда щелочных комплексов [Samson et al., 1995; Xie et al., 2009]. Тем не менее нет очевидной связи между их составом и карбонатитообразованием, поскольку включения такого состава встречаются в самых разных геологических обстановках и характеризуют самые разные геологические объекты [Рёддер, 1987], в том числе подобные включения могут отвечать метаморфогенному по своей природе флюиду, как это предположено для поздних включений из карбонатитов Силиниярве [Routiainen, 1995].

В настоящее время на основании многочисленных U-Pb датировок циркона [Кононова, 1980; Чернышов и др., 1987; Kramm et al., 1993; Краснобаев и др., 2010, 2013, 2014; Недосекова и др., 2009, 2014, 2015, 2016; и др.], Sm-Nd, Rb-Sr, K-Ar породно-минеральных изохрон [Kramm et al., 1983; Недосекова, 2012; Недосекова, Беляцкий, 2012], а в последнее время и U-Pb систематики минералов группы пироклора [Недосекова и др., 2018 и литература в ней] предложена двухэтапная модель формирования ИВК, в соответствии с которой породы щелочного комплекса закончили формирование около ~390–380 млн лет назад и в дальнейшем претерпели высокоградийный метаморфизм и ремобилизацию вещества при переходе от коллизионного к постколлизионному этапу, отвечающему возрасту 280–220 млн лет. Такой метаморфизм, по-видимому, мог быть обусловлен значительной глубиной погружения пород метаморфического блока, а также их разогревом в результате пластических деформаций и воздействия тепла молодых монцодиорит-граносиенит-гранитных интрузий увильдинско-кисегачского комплекса с возрастом 274–240 млн лет [Ронкин и др., 1997а, б; Шардакова, Савельев, 2014].

Принимая такую трактовку образования пород щелочного комплекса, можно предположить взаимодействие карбонатитов и щелочных пород с метаморфогенным коровым флюидом, следы кото-

рого могли быть записаны развитием необычных для щелочных пород минеральных ассоциаций, а также смещением изотопных меток. Так, известно, что при процессах зеленосланцевого и амфиболитового метаморфизма карбонатитов происходят освобождение минералов от элементов-примесей – выделение Sr и TR из карбонатов и апатита с образованием стронцианита, синхизита, монацита, алланита; ферсмитизация и колумбитизация пироклора; появление не характерных для карбонатитов минералов – кварца, талька, хлорита, алланита, тремолит-актинолита, связанных с добавкой компонентов окружающих пород; изменение изотопных составов кислорода и углерода в сторону осадочных карбонатов [Attoh et al., 2007; Rukhlov, Bell, 2009; Ласточкин и др., 2011; Moecher et al., 2011; Goswami, Vasu, 2013; Chakhmouradian et al., 2016; и др.].

В карбонатитах рудной зоны 140 Ильмено-Вишневогорского комплекса действительно отмечаются появление карбонатов редких земель и стронция (стронцианита, бастнезита, анкилита), а также ферсмитизация пироклора [Попова и др., 2018], но эти процессы не имеют значительного распространения. Кроме того, они тесно ассоциируют с развитием шамозита, вермикулита, цеолитов, гиббсита, указывая на изменения уровня низов зеленосланцевой – цеолитовой фации. Этому уровню отвечают и температуры рассмотренных нами флюидных включений. Сделанные наблюдения, а также мантийные метки $\delta^{18}\text{O} = 8.1\text{‰}$, $\delta^{13}\text{C} = -7.7\text{‰}$ в кальцитах рудной зоны 140 [Недосекова и др., 2009, 2012] позволяют высказать предположение о том, что молодые события в метаморфическом блоке оказали незначительное влияние на вещество карбонатитов и щелочных пород. Повидимому, они были ограничены развитием локальных высоко- и среднетемпературных сдвиговых зон, вдоль которых формировались протолиты и бластомилониты по миаскитам, карбонатитам и гнейсам [Медведева, 2007; Медведева и др., 2013, 2018; и др.]. Эти процессы могли привести и к омоложению U-Pb, Rb-Sr, K-Ar систем минералов, в связи с длительным перемещением пород в верхнюю кору, вызванным процессами коллизии и постколлизийного растяжения, сопровождающимися сдвиговыми деформациями. При этом вопрос о том, насколько сильное влияние оказал позднепалеозойский метаморфизм на породы ИВК, остается открытым. Нельзя исключать того, что такой метаморфизм на уровне амфиболитовой фации мог привести к полной перекристаллизации карбонатитов, уничтожению всех первичных включений и их замену “вторичными” включениями, связанными с метаморфогенным или смешанным флюидом.

В заключение отметим, что приведенные данные состава флюидных включений в карбонатите рудной зоне 140 Вишневогорского месторожде-

ния ниобия показывают их консервацию на самых поздних стадиях тектонической эволюции щелочно-карбонатитового комплекса, когда его породы были выдвинуты в верхнюю кору. В связи с этим возникает проблема отнесения таких включений к гидротермальному этапу завершения карбонатитообразования в щелочном комплексе или к этапу регрессивного метаморфизма, вызвавшего перекристаллизацию карбонатитов комплекса на постколлизийной стадии развития Уральского складчатого пояса. Решение данной проблемы требует дополнительных исследований.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 17-05-00154 и темы АААА-А18-118052590034-0 государственного задания ИГГ УрО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Борисенко А.С. Изучение солевого состава газово-жидких включений в минералах методом криометрии // Геология и геофизика. 1977. № 8. С. 16–27.
- Кононова В.А. Щелочные магматические серии пород и источники слагающего их вещества (по данным изотопных соотношений Sr, O, C) // Докл. сов. геол. к XXXVI сессии МГК, петрология. 1980. С. 30–40.
- Краснобаев А.А., Вализер П.М., Анфилогов В.Н., Немов А.Б., Бушарина С.В. Цирконология пегматитов Ильменских гор // Докл. АН. 2014. Т. 457, № 4. С. 455–459.
- Краснобаев А.А., Вализер П.М., Бушарина С.В., Медведева Е.В., Бережная Н.Г. Замещение – причина: минералогическая, геохимическая, возрастная гетерогенности цирконов миаскитов – следствие (Ильменские горы, Южный Урал) // Докл. АН. 2013. Т. 452, № 4. С. 424–430.
- Краснобаев А.А., Русин А.И., Вализер П.М., Бушарина С.В. Цирконология кальцитовых карбонатитов Вишневогорского массива (Южный Урал) // Докл. АН. 2010. Т. 431, № 3. С. 382–385.
- Ласточкин Е.И., Рупп Г.С., Дорошкевич А.Г. Минералогия метаморфизованных карбонатитов проявления Веселое (Северное Забайкалье) // Геология рудных месторождений. 2011. Т. 53, № 3. С. 267–279.
- Левин В.Я., Роненсон Б.М., Самков В.С. и др. Щелочно-карбонатитовые комплексы Урала. Екатеринбург: Уралгеолком, 1997. 272 с.
- Медведева Е.В. Зональность гранатов из метаморфических пород Ильменских гор (Южный Урал) // Литосфера. 2007. № 5. С. 171–180.
- Медведева Е.В., Котляров В.А., Немов А.Б. Милонитизированные породы ильменогорского комплекса (Южный Урал) // Вестн. ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2013, № 11. С. 7–10.
- Медведева Е.В., Немов А.Б., Котляров В.А. Новые данные о милоните основного состава из Ильменского миаскитового массива (Южный Урал) // Вестн. ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2018. № 6. С. 16–24.
- Недосекова И.Л. Возраст и источники вещества Ильмено-Вишневогорского щелочного комплекса (Ю. Урал): геохимические и Rb-Sr, Sm-Nd, U-Pb и Lu-Hf изотопные данные // Литосфера. 2012. № 5. С. 77–95.
- Недосекова И.Л., Крестьянинов Е.А., Замятин Д.А.,

- Андреичев В.Л. Типохимизм и эволюция карбонатов карбонатитов Ильмено-Вишневогорского щелочного комплекса и карбонат-хлоритолитовых пород Силачского комплекса (Южный Урал) // Ежегодник-2011. Тр. ИГГ УрО РАН. Вып. 159. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2012. С. 111–122.
- Недосекова И.Л., Белоусова Е.А., Беляцкий Б.В. Изотопный состав гафния и редкие элементы как идентификаторы генезиса циркона при эволюции щелочно-карбонатитовой магматической системы (Ильмено-Вишневогорский комплекс, Урал, Россия) // Докл. АН. 2015. Т. 461, № 5. С. 569–574.
- Недосекова И.Л., Белоусова Е.А., Беляцкий Б.В. U-Pb возраст и Lu-Hf изотопные системы цирконов Ильмено-Вишневогорского щелочно-карбонатитового комплекса, Ю. Урал // Литосфера. 2014. № 5. С. 19–32.
- Недосекова И.Л., Беляцкий Б.В. Возраст и источники вещества Ильмено-Вишневогорского щелочного комплекса (Ю. Урал): изотопные Rb-Sr, Sm-Nd, U-Pb и Lu-Hf данные // Докл. АН. 2012. Т. 446. С. 71–76.
- Недосекова И.Л., Беляцкий Б.В., Белоусова Е.А. Редкие элементы и изотопный состав гафния как индикаторы генезиса циркона при эволюции щелочно-карбонатитовой магматической системы (Ильмено-Вишневогорский комплекс, Урал, Россия) // Геология и геофизика. 2016. Т. 57, № 6. С. 1135–1154.
- Недосекова И.Л., Владыкин Н.В., Прибавкин С.В., Баянова Т.Б. Ильмено-Вишневогорский миаскит-карбонатитовый комплекс: происхождение, рудоносность, источники вещества (Урал, Россия) // Геология рудных месторождений. 2009. Т. 51, № 2. С. 157–181.
- Недосекова И.Л., Коротеев В.А., Беляцкий Б.В., Шарыгин В.В., Лепехина Е.Н., Прибавкин С.В. U-Pb датирование рудных ниобиевых минералов группы пироклора (Ильмено-Вишневогорский карбонатит-миаскитовый комплекс, Южный Урал) // Литосфера. 2018. Т. 18, № 5. С. 758–773.
- Попова В.И., Попов В.А., Блинов И.А., Котляров В.А. Новые данные о пироклорах щелочных пегматитовых рудных зон Вишневых гор (Южный Урал) // Минералогия. 2018. Т. 4, № 3. С. 46–58.
- Рэддер Э. Флюидные включения в минералах. В 2 т. Т. 2. М.: Мир, 1987. 632 с.
- Роненсон Б.М. Происхождение миаскитов и связь с ними редкометалльного оруденения. М.: Недра, 1966. 174 с.
- Ронкин Ю.Л., Бушляков И. Н., Агуп Ф., Лепехина О.П. K-Ar и Rb-Sr изотопная систематика гранитоидов Кисегачского массива Ильменогорского комплекса // Гранитоидные вулканоплутонические ассоциации: тез. докл. всерос. сов. Сыктывкар: ИГ КНЦ РАН, 1997а. С. 44–46.
- Ронкин Ю.Л., Смирнов В.Н., Лепехина О.П., Щекунова О.С. Возрастное положение и генезис монцодиорит-гранитной формации восточного склона Среднего Урала: Rb-Sr изотопные ограничения // Магматизм, метаморфизм и глубинное строение Урала: тез. докл. VI Урал. петрограф. сов. Ч. 2. Екатеринбург, 1997б. С. 193–196.
- Таланцев А.С., Петрова Г.А. Условия и механизм формирования карбонатитов Ильменогорско-Вишневогорского щелочного комплекса. Свердловск: УрО АН СССР, 1991. 71 с.
- Чернышов И.В., Кононова В.А., Крамм У., Грауерт Б. Изотопная геохронология щелочных пород Урала в свете данных уран-свинцового метода по цирконам // Геохимия. 1987. № 3. С. 323–338.
- Шардакова Г.Ю., Савельев В.П. Новые данные о составе и возрасте коллизионных гранитоидов разных структурных зон Среднего-Южного Урала // Геологические процессы в обстановках субдукции, коллизии и скольжения литосферных плит. Владивосток: ДВГИ ДВО РАН, 2014. С. 281–284.
- Attoh K., Corfu F., Nude P. U-Pb zircon age of deformed carbonatite and alkaline rocks in the Pan-African Dahomeyide suture zone, West Africa // Precambrian Res. 2007. V. 155. P. 251–260.
- Bodnar R.J. Revised equation and stable for determining the freezing point depression of H₂O-NaCl solution // Geochim. Cosmochim. Acta. 1993. V. 57. P. 683–684.
- Chakhmouradian A.R., Reguir E., Zaitsev A.N. Calcite and dolomite in intrusive carbonatites. I. Textural variations // Miner. Petrol. 2016. V. 110. P. 333–360.
- Goswami B., Basu S.K. Metamorphism of Proterozoic alpaite nepheline syenite gneiss from North Singhbhum Mobile Belt, eastern India // Miner. Petrol. 2013. V. 107. P. 517–538.
- Kramm U., Chernyshev I.V., Grauert B., Kononova V.A., Bröcker W. Zircon typology and U-Pb systematics: a case study of zircons from nepheline syenite of the Il'meny Mountains, Urals // Petrology. 1993. No. 5. P. 536–549.
- Kramm U., Blaxland A.B., Kononova V.A., Grauert B. Origin of the Ilmenogorsk-Vishnevogorsk nepheline syenites, Urals, USSR, and their time of emplacement during the history of the Ural fold belt: a Rb-Sr study // J. Geol. 1983. V. 91. P. 427–435.
- Moecher D.P., Anderson E.D., Cook C.A., Mezger K. The petrogenesis of metamorphosed carbonatites in the Grenville Province, Ontario // Can. J. Earth Sci. 2011. V. 34. P. 1185–1201.
- Nedosekova I.L., Belousova E.A., Sharygin V.V., Belyatsky B.V., Baynova T.B. Origin and evolution of the Il'meny-Vishnevogorsk carbonatites (Urals, Russia): insights from trace-elements compositions, Rb-Sr, Sm-Nd, U-Pb and Lu-Hf isotope data // Miner. Petrol. 2013. V. 107. P. 101–123.
- Poutiainen M. Fluids in the Siilinjärvi carbonite complex, eastern Finland. Fluid inclusion evidence for the formation conditions of zircon and apatite // Bull. Geol. Soc. Finland. 1995. V. 67 (1, 1b and 2). P. 3–18.
- Rukhlov A.S., Bell K. Geochronology of carbonatites from the Canadian and Baltic Shields, and the Canadian Cordillera: clues to mantle evolution // Miner. Petrol. 2009. V. 98. P. 11–54.
- Samson I.M., Liu W., Williams-Jones A.E. The nature of orthomagmatic hydrothermal fluids in the Oka carbonatite, Quebec, Canada: Evidence from fluid inclusions // Geochim. Cosmochim. Acta. 1995. V. 59, no. 10. P. 1963–1977.
- Xie Y., Hou Z., Yin S., Dominy S.C., Xu J., Tian S., Xu W. Continuous carbonatitic melt-fluid evolution of a REE mineralization system: Evidence from inclusions in the Maoniuping REE Deposit, Western Sichuan, China // Ore Geol. Rev. 2009. V. 36. P. 90–105.