

ЭКСПЕРТИЗА И АНАЛИТИЧЕСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

ВОЗМОЖНАЯ МНОЖЕСТВЕННОСТЬ ИСТОЧНИКОВ КАРБОНАДО

В.А. Петровский, гл. науч. сотр. ИГ Коми НЦ УрО РАН, д-р геол.-минер. наук, petrovsky@geo.komisc.ru

А.Е. Сухарев, ст. науч. сотр. ИГ Коми НЦ УрО РАН, канд. геол.-минер. наук, sukharev@geo.komisc.ru

Рассмотрен материал, демонстрирующий некоторые региональные особенности бразильских карбонадо, необъяснимые в представлениях об их первоначальном едином источнике. Приводятся данные по примесной обогатенности и структурным характеристикам, которые свидетельствуют о заметной неоднородности карбонадо.

Ключевые слова: карбонадо, алмаз, ИНАА, РЗЭ.

THE POSSIBLE MULTIPLICITY OF THE SOURCES OF THE CARBONADOS

V.A. Petrovsky, Chief Researcher, IG Komi SC UB RAS, Ph. D., petrovsky@geo.komisc.ru

A.E. Sukharev, Senior Researcher, IG Komi SC UB RAS, Doctor of Geology and Mineralogy, sukharev@geo.komisc.ru

A material demonstrating some regional peculiarities of the Brazilian carbonado, unexplained in the notions of their original single source, is considered. Data are presented on impurity enrichment and structural characteristics, which demonstrate a noticeable heterogeneity of carbonado.

Keywords: carbonado, diamond, INAA, REE.

Введение

Карбонадо – загадочная микрополикристаллическая разновидность алмаза, генезис которой до сих пор остается во многом неясным. Подобно объяснению происхождения монокристалльных промышленных алмазов, существует представление о мантийно-магматической природе карбонадо [1–4]. А.А. Маракушев выдвинул предположение о том, что карбонадо может быть результатом перекристаллизации (рекристаллизации) монокристалльных изначально магматических алмазов в условиях земной коры [5]. В.Т. Дубинчуком и его коллегами [6], Ф.В. Каминским [7], а также М. Озимой и его коллегами [8] рассматривалась возможность образования карбонадо из органического углерода при естественном радиоактивном облучении. Е.В. Францесон и Ф.В. Каминский [9] обратили внимание на близость изотопного состава карбонадо и биогенного углерода, что подтолкнуло их к идее происхождения карбонадо как продукта метаморфизма углеродистых пород. Определенной популярностью также пользуется гипотеза космогенного происхождения карбонадо. Так, В.Дж. Смит и Дж.Б. Даусон [10] связали криптозернистость карбонадо, заметно облегченный состав углерода, наличие «земнокоровых» минеральных включений при отсутствии включений мантийного парагенезиса, а также находки лонсдейлитсодержащих карбонадо с возможностью объяснения происхождения карбонадо как продукта импактного метаморфизма пород земной коры (мишени), содержащих органический углерод или графит.

Близкую точку зрения высказывал В.А. Езерский, обнаруживший сходство карбонадо с продуктами ударного преобразования углей [11].

Борьба идей в дискуссии происхождения карбонадо чем-то напоминает бесконечную гонку вооружений. Как только кто-то найдет достойное «средство защиты», тут же оппоненты находят разящее «средство нападения». В качестве типового примера можно рассмотреть объяснение происхождения карбонадо, предложенное не так давно Б.А. Мальковым [12], который выдвинул в качестве очередного «неоспоримого» аргумента импактного происхождения тезис о присутствии атомарного кремния (Si^0) в решетке алмаза карбонадо как показателя гипербарических условий его происхождения, ставящий, образно говоря, окончательную точку в решении «вопроса карбонадо». В ряду новых гипотез о происхождении карбонадо это без преувеличения свежая мысль. На поверку, однако, выяснилось, что данные Р.М. Минеевой и ее коллег [13], на которые ссылается Б.А. Мальков, вовсе не указывают прямо на присутствие кремния в решетке алмаза. Так, знакомство со статьей [13] показывает, что этим авторам удалось установить в карбонадо парамагнитный центр, являющийся аналогом хорошо изученного R1-центра, выявляемого при помощи электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) в алмазах, подвергшихся облучению. В этой же работе можно найти, что парамагнитные R1-центры обнаруживали в природных алмазах типа IIa и IIb после облучения электронами или нейтронами. Отметим, что R1-центр устанавливался в поликристаллических алмазах в трубке «Удачная» (Якутия) А.И. Горшковым и его соавторами [14]. Р.М. Минеева и ее соавторы специально отмечают, что они не подвергали облучению и отжигу образцы карбонадо для активации изучаемых парамагнитных центров, что обычно делается в исследованиях, в которых используется ЭПР. Однако из данных и литературного обзора Р.М. Минеевой и ее коллег [13] вовсе не следует, что карбонадо может являться единственным в своем роде уникальным необлученным в природе алмазом, содержащим R1-центр. По-видимому, Б.А. Мальков не учел накопленные к настоящему времени сведения о естественном радиационном облучении карбонадо, среди которых можно выделить установленные в карбонадо радиогенные гало [15], торий и уран [16], а также признаки радиационно-термических воздействий [17]. Можно прогнозировать, что не только в карбонадо, но, возможно, и в монокристалльных алмазах, особенно с радиационной зеленой окраской, характерной для алмазов из докембрийских россыпей, кому-нибудь, может, удастся обнаружить R1-центр. Кроме того, важно отметить, что Р.М. Минеевой и ее коллегами сообщается о присутствии атомарного кремния в карбонадо, установленного при помощи рентгеноэлектронного анализа – метода, прямо не указывающего на вхождение восстановленного кремния в структуру алмазной решетки карбонадо. Выводы же о природе R1-центра в карбонадо, участии и форме вхождения в него кремния – это выстраданная точка зрения этих авторов. Здесь, как это нередко бывает в радиоспектроскопии, ряд заключений, положенных в основу итогового вывода о природе дефекта, не исключает опоры на вполне разумные предположения и убедительные доводы, тем не менее не являющиеся прямыми доказательствами.

Наконец, в ряду новых гипотез нельзя не отметить выдвинутую относительно недавно идею С. Хаггерти [18] о внеземном космогенном происхождении карбонадо, образовавшегося при взрыве досолнечной сверхновой. Эта гипотеза и вовсе выносит споры о происхождении карбонадо за пределы геологических процессов, идущих на планете Земля. Достаточно подробные обзоры различных гипотез происхождения карбонадо имеются в работах [19–21].

Одно совершенно ясно: карбонадо является одним из древнейших образований, с возрастом, приближающимся к возрасту «приютившей» его планеты Земля. Помимо все еще неясных условий его происхождения, мы к тому же не так много знаем о «земнокоровай биографии» карбонадо. Между тем значение геологических событий в истории карбонадо, сравнимых по возрасту и длительности с возрастом самой Земли, включая историю литогенеза коллекторов карбонадо, переоценить невозможно. Можно полагать, что многие из них

основательно «замаскировали» минералогические черты изначальных микрополикристаллических агрегатов.

В данной статье мы помещаем материал, демонстрирующий некоторые региональные особенности бразильских карбонадо, необъяснимые в представлениях об их первоначальном едином (т.е. однородном) источнике. Здесь мы в основном используем данные, которые уже публиковались нами ранее и которые отчасти нами реинтерпретируются.

Образцы и методы исследований

Рабочая коллекция алмазов была представлена образцами карбонадо и монокристаллическими алмазными индивидами, извлеченными из молодых россыпей Бразилии в процессе полевых работ при непосредственном участии М. Мартинса (профессор Федерального Университета штата Минас Жерайс, Бразилия).

Определение элементного состава примесей в монокристалльных алмазах (16 индивидов) и карбонадо (6 образцов) проводилось при помощи инструментального нейтронно-активационного анализа (ИНАА) Н.Н. Догадкиным в ГЕОХИ РАН (г. Москва). При построении диаграмм проводилась нормировка полученных данных на значения хондритового стандарта, взятого из работы [22].

Результаты и их обсуждение

Анализ рентгеноструктурных характеристик карбонадо (выборка 32 сколотых фрагментов образцов) проводился в ИГ КОМИ НЦ УрО РАН (г. Сыктывкар) Г.Н. Каблисом методом Дебая на трубке БСВ-22 на железном или медном аноде в камере РКД-57. Анализировались рефлексы линий рентгеновского излучения K_{α} и K_{β} в области углов отражения $2\theta = 10\div 150^{\circ}$. Абсолютно достоверными были признаны те фазы, которые давали на дебаеграмме три и более линии, не совпадающие с линиями других фаз при условии соответствия при этом соотношения интенсивностей линий справочным. Кристаллическими фазами, определяющимися с хорошей достоверностью, были признаны те фазы, которые давали на дебаеграмме либо менее трех собственных линий, либо положение линий отличалось от справочных данных на величину, незначительно превосходящую значение погрешности, а также если не соблюдалось справочное соотношение интенсивностей. Подобные несоответствия, к сожалению, встречаются при рентгеноструктурном анализе минералов достаточно часто и могут быть вызваны разными причинами. Кристаллическими фазами, определяющимися с плохой достоверностью, признавались те фазы, которые давали на дебаеграмме одну или две линии с минимальной интенсивностью. По дебаеграммам с использованием стандартных алгоритмов производился расчет параметров элементарной ячейки алмаза (погрешность оценки варьирует от 0.001 до 0.007 Å).

Данные *ИНАА* [23]¹ показывают, что образцы карбонадо в значительной мере обогащены редкоземельными элементами (РЗЭ) по сравнению с хондритовым веществом [22]. Содержания РЗЭ в карбонадо варьируют от десятых до первых тысяч ppm (рис. 1). Соответствующие суммы РЗЭ в карбонадо изменяются от нескольких десятков до нескольких тысяч ppm, т.е. для карбонадо весьма характерна очень значительная (порядковая!) дифференцированность в уровнях концентрирования РЗЭ. Общая тенденция соотношений РЗЭ выражается в превалировании легких лантаноидов над тяжелыми, однако La/Yb-отношение варьирует от десятых единиц до нескольких сотен, т.е. может быть не только больше единицы, но и даже меньше.

Судя по данным, которые мы опубликовали в работе [23], монокристалльные алмазы имеют похожий наклон кривых концентрирования, в них также легкие лантаноиды преобладают над тяжелыми. Однако общая сумма редкоземельных элементов, за редким исключением, меньше, чем в карбонадо, на один, а то и на два порядка. Для бразильских монокристалльных алмазов тоже характерна значительная изменчивость по уровню обогащенности

¹ В работе [23] не были приведены данные по барью.

РЗЭ — от десятитысячных и тысячных (пороговых) до первых сотен ppm. В большинстве случаев содержание РЗЭ ниже хондритовых кларков или вовсе ниже порога обнаружения (почти у половины образцов).

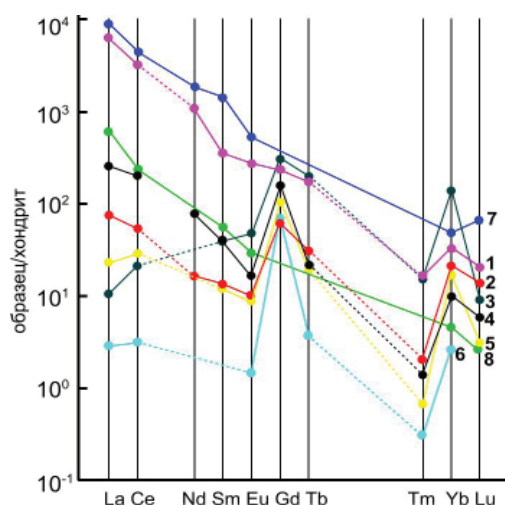


Рис. 1. Распределения РЗЭ в карбонадо

1 — MGC4; 2 — MGrC2; 3 — MGC6/6; 4 — MGC0; 5 — MGC6/7; 6 — ChDC2; 7 — гояцит [24]; 8 — кимберлиты в целом [24]. Нормировка проводилась на значения хондритового стандарта [22]

Мы далеки от мысли, что РЗЭ являются структурными примесями в алмазе и замещают атомы углерода в его решетке. По всей видимости, вариации содержаний редких земель в алмазах отражает присутствие в них различных минералов-узников, являющихся действительными концентраторами РЗЭ. В монокристалльных алмазах, выросших в мантии, такими минералами являются гранат и перовскит. Однако необычайно высокая амплитуда содержаний РЗЭ в карбонадо и высокие валовые концентрации РЗЭ в отличие от монокристалльных алмазов связаны с редкоземельными алюмофосфатами (так называемыми флоренситами²), не являющимися мантийными минералами и, по-видимому, формационно привязанными к метаосадочным комплексам, в которых карбонадо длительно находилось. На диаграмме рис. 1 вместе с данными по алмазам приведена кривая концентрирования РЗЭ, в гояците весьма схожая по наклону и высоте с кривыми для карбонадо. Забавно, но факт: есть немало работ, в которых редкоземельные составы карбонадо сравниваются с составами кимберлитовых пород. При этом авторы могут отмечать сходство распределений как отражение некоего генетического сходства и тех и других [24]. Однако выглядит это все же больше как сходство в способности концентрировать легкие лантаноиды таких минералов, как карбонаты (кимберлиты) и алюмофосфаты (метаосадочные коллекторы). Отметим, что карбонаты и флоренситы, в общем-то, являются минералами, формирующимися в условиях земной коры, в то время как алмазы имеют более глубокий мантийный генезис. И монокристалльные алмазы, и карбонадо — одни из самых древних «долгоживущих» минералов на земле, их

² По данным, опубликованным в работе [26], алюмофосфаты изучаемой коллекции карбонадо представляют собой твердые растворы четырех разновидностей: ксенотим-флоренситовую, монацит-флоренситовую, монацит-(Ca-Ba-Sr-Pb) алюмофосфатную и флоренсит-(Ca-Ba-Sr-Pb) алюмофосфатную, — представляющих собой два бинарных ряда, а именно: крандаллит-горсейксит (Ca-Ba) и гояцит-плюмбогуммит (Sr-Pb).

возраст насчитывает миллиарды лет. Они формировались задолго до «земнокоровых» карбонатов и флоренситов в совершенно иных геологических условиях.

Помимо РЗЭ, в карбонадо, по данным ИНАА, присутствуют Ва, Fe, Cr, Co, Zn, Sb, Cs, Sc, Th, U. Обращают на себя внимание довольно высокие содержания центростремительных элементов (т.е. тяготеющих к центру Земли) – хрома и железа, составляющих в среднем десятки и тысячи ppm соответственно. Среднее содержание хрома в карбонадо близко к кларкам хондритов, кислым породам (гранитоиды) и некоторым осадочным породам (песчаники) [25]. Концентрации центростремительного кобальта (единицы ppm) близки к кларкам гранитоидов, однако есть примеры с отсутствием этого элемента. Во всех образцах без исключения был обнаружен скандий в количестве единиц ppm, что схоже с различными кларковыми величинами, исключая кларки базальтов, глин и сланцев. Также во всех образцах было установлено присутствие тория и урана, варьирующих, соответственно, в диапазонах от единиц до десятков ppm и от десятых долей до десятков ppm. Эти уровни концентрирования у обоих элементов близки к их кларкам базальтов, кислых и осадочных пород. В нескольких образцах было установлено присутствие бария в количествах от десятков до сотен ppm, что близко к средним значениям содержания элемента базальтов, кислых и осадочных пород. Остальные элементы – цинк, сурьма и цезий – были встречены лишь в единичных примерах, которые не репрезентативны.

Даже при поверхностном анализе хорошо видно, что уровни обогащения следовыми элементами в значительной мере сближают карбонадо с породами земной коры, как будто они сами являются такими же породами, не имеющими ничего общего с мантией.

Состав примесей у монокристалльных алмазов более скудный в сравнении с карбонадо. Помимо РЗЭ, в монокристалльных алмазах были обнаружены лишь Fe, Cr, Co, Sc, Th, U, причем их средние содержания примерно на порядок ниже, чем у соответствующих элементов в карбонадо. Практически в половине примеров и вовсе никаких примесей в монокристалльных алмазах установить не удалось.

Как видно по этим данным, монокристаллические алмазы значительно чище карбонадо. Те незначительные концентрации, которые обнаруживаются в монокристалльных алмазах, связаны с микроскопическими минеральными мантийными включениями.

Рентгеноструктурная характеристика. Результаты изучения рентгеноструктурных характеристик бразильских карбонадо приводились нами ранее [27]. Анализ полученных дебаеграмм показал, что практически все карбонадо представляют собой поликристаллические агрегаты, состоящие из хаотически ориентированных кристалликов размером порядка 1–10 мкм, что хорошо согласуется с оценками размеров индивидов, сделанными при использовании сканирующего электронного микроскопа. Исключение составили два скола образцов карбонадо. Так, скол образца MGC6/2 представляет собой текстурированный поликристаллический агрегат (кристаллики имеют предпочтительную ориентировку), что выражается в неравномерном распределении интенсивности по дебаевскому кольцу. Один из сколов образца MGC0-2, а также скол образца MtGrC3 являются аморфными фазами, присутствие алмаза в которых достоверно не установлено.

Основной кристаллической фазой во всех сколах (кроме MGC0-2 и MtGrC3) является алмаз. На дебаеграммах четко регистрируются непрерывные линии алмаза, соответствующие отражениям от плоскостей (111), (220), (311) и (400). Полученный диапазон вариации рассчитанного параметра решетки алмаза по разным карбонадо составил от 3,555 до 3,581 Е. Распределение решеточных параметров для репрезентативной выборки карбонадо из штата Минас-Жерайс является бимодальным. На диаграмме (рис. 2) хорошо видно присутствие небольшой группы карбонадо (7 из 27 образцов, все из одного штата Минас-Жерайс) с параметрами кристаллической решетки, близкими к значениям параметров решетки алмаза (3,56 Е). В остальных случаях, исключая сколы с аморфной фазой, параметр решетки превышен, что, возможно, связано с дефектностью кристаллической структуры алмаза в карбо-

надо. В этом же ряду сколы карбонадо из штата Мату-Гроссу, скол единственного образца из штата Байя, а также скол образца MGS6/2 с текстурированным агрегатом. Можно отметить, что вместе с аморфностью отдельных участков у некоторых сколов карбонадо также наблюдалось варьирование параметра кристаллической решетки алмаза (до 7%).

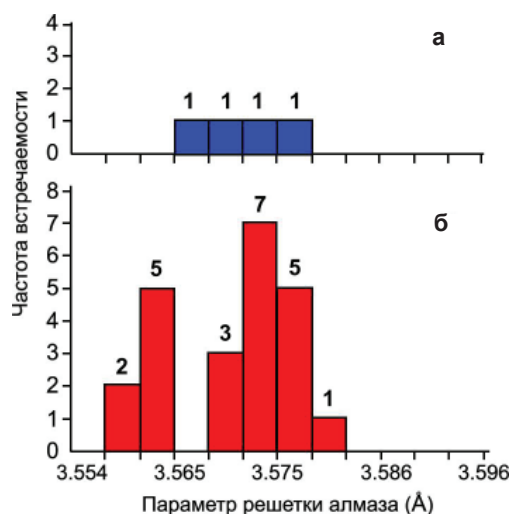


Рис. 2. Вариации структурных характеристик карбонадо из штатов Мату-Гроссу (а) и Минас-Жерайс (б)

По данным рентгеноструктурного анализа, помимо алмаза, в карбонадо достоверно устанавливается присутствие следующих минералов: анальцим, гематит, гетит (гидрогетит), глауконит, графит, иллит (гидрослюда), плюмбогуммит³, псиломелан, чаоит. Эти минеральные примеси оказались в нашем случае характерны только для выборки карбонадо из штата Минас-Жерайс.

Графит и чаоит – структурные модификации углерода, связанные, очевидно, с процессом формирования карбонадо. Вполне определенно можно сказать, что состав ряда других минеральных примесей карбонадо, таких как анальцим, гематит, гетит, глауконит, иллит (гидрослюда), плюмбогуммит, псиломелан, обусловлен процессами выветривания, гидролиза, происшедшими вблизи и непосредственно на земной поверхности, на суше и на мелководье. Эти минералы могли также формироваться при диагенезе осадков и при гидротермальной деятельности. Характерной особенностью многих из перечисленных минералов является присутствие конституционной воды, что, разумеется, указывает на их «земнокоровое» происхождение. Установленный состав минералов карбонадо, по-видимому, отчасти отвечает особенностям субстратов, вмещающих карбонадо, которые находят как в метатерригенных породах, так и в рыхлых неоген-четвертичных аллювиальных осадках, нередко являющихся продуктами перемыва элювиальных отложений. Отметим, что обсуждаемая ассоциация, по сути, тот же ассоциативный минеральный ряд, что и у алмазоносных бразильских филлитов, отвечающий в целом минеральным особенностям формаций выветривания.

³ Название «плюмбогуммит», которое мы в первый раз употребили в работе [27], является достаточно условным и указывает лишь на присутствие в пробе карбонадо алюмофосфата с близкими плюмбогуммиту структурными характеристиками. Дальнейшее изучение карбонадо при помощи микронного анализа показало присутствие разнообразных составов алюмофосфатов (а не только свинецсодержащих), о чем мы также упоминаем в этой работе.

Между рентгеноструктурными характеристиками алмаза в карбонадо и минеральными примесями в нем, возможно, существует некая связь. Так, только в карбонадо с повышенными значениями параметра кристаллической решетки алмаза было достоверно установлено частое присутствие плумбогуммита и иллита. Однако вполне возможно, что это является геолого-геохимической региональной спецификой штата Минас-Жерайс, особенностью субстратов, некогда содержащих карбонадо, и не связано с причинами, повлиявшими на увеличение параметра решетки.

Заключение

В заключение можно отметить, что приведенные нами данные по примесной обогащенности и структурным характеристикам демонстрируют заметную неоднородность карбонадо. Причин, по которым карбонадо оказываются различными по физическим и химическим свойствам, может быть несколько, и они на сегодняшний день не известны. Однако ясно, что если карбонадо Бразилии (а также, по-видимому, центральной Африки) имели одинаковое происхождение, то их свойства не должны иметь наблюдаемых региональных отличий. Это наводит на мысль о множественности источников карбонадо. В этом случае карбонадо – никак не продукт одного уникального геологического события (акта вулканизма или падения метеорита и пр.), а результат реализации одного и того же специфичного механизма кристаллизации микрополикристаллических алмазов. В то же время специфика карбонадо из разных регионов Бразилии и их внутрирегиональная неоднородность может быть объяснена их различной посткристаллизационной биографией, обусловленной длительным нахождением в карбонадо различных коллекторах, где они по-разному насыщались минеральными примесями и подвергались физико-механическим воздействиям, повлиявшим на их структурные характеристики. Последнее объяснение природы неоднородности карбонадо представляется нам наиболее правдоподобным.

Список литературы

1. Шелков Д., Верховский А. Б., Милледж Х. Дж., Пиллинджер К.Т. Карбонадо Бразилии и Убанги: сравнение с другими формами микрокристаллических алмазов на основе изотопов углерода и азота // Геология и геофизика. 1997. Т. 38. № 2. С. 315–322.
2. Kurat G., Dobosi G. Garnet and diopside-bearing diamondites (framesites) // Mineral. Petrol., 2000. V. 69. Pp. 143–159.
3. Trueb L.F., Buttermann W.C., Wys E.C. Carbonado: natural polycrystalline diamond // Science. 1969, V. 165. № 3895. Pp. 799–802.
4. Wirth R., Rocholl A. Nano crystalline diamond from the Earth is mantle underneath Hawaii // Earth and Planet. Sci-Lett. 2003. V. 211. № 3–4. Pp. 357–369.
5. Маракушев А.А., Перцев Н.Н., Зотов И.А. и др. Некоторые петрологические аспекты генезиса алмаза // Геология рудных месторождений. 1995. Т. 37. № 2. С. 105–121.
6. Дубинчук В.Т., Коченов А.В., Пеньков В.Ф. и др. Новообразование в органическом веществе осадочных пород при радиоактивном облучении // ДАН. 1976. Т. 231. № 4. С. 973–976.
7. Каминский Ф.В. Генезис поликристаллических агрегатов алмаз-карбонадо // Доклады АН СССР. 1987. Т. 294. № 2. С. 439–440.
8. Ozima M., Zashu S., Tomura K., Matsuhisa Y. (1991) Constraints from noble-gas contents on the origin of carbonado diamonds. Nature, Vol. 351. Pp. 472–474.
9. Францессон Е.В., Каминский Ф.В. Карбонадо – разновидность алмаза некимберлитового генезиса // ДАН СССР, 1974. Т. 219. № 1. С. 187–189.
10. Smith V.J., Dawson J.B. Carbonado: Diamond aggregates from early impacts of crustal rocks? // Geology. 1985. Vol. 13. Pp. 342–343.
11. Езерский В.А. Гипербарические полиморфы, возникающие при ударном преобразовании углей // Записки ВМО. 1986. Ч. 115. Вып. 1. С. 26–33.

12. Мальков Б.А., Ракин В.И. Примесный кремний – индикатор гипербарических условий образования карбонадо // Материалы Международной конференции «Углерод: минералогия, геохимия и космохимия». Сыктывкар: Геопринт. 2003. С. 67–68.
13. Минеева Р.М., Сперанский А.В., Егоров Б.Л. и др. Дефекты в карбонадо: аналог радиационного центра R1 в алмазе // Доклады РАН. 1999. Т. 367. № 2. С. 238–240.
14. Горшков А.И., Винокуров С.Ф., Солодов Д.И., Бершов Л.В., Мохов А.В., Солодова Ю.П., Сивцов А.В. Поликристаллический алмаз из трубки «Удачная» (Якутия): минералого-геохимические и генетические особенности // Литология и полезные ископаемые. 1998. № 6. С. 588–603.
15. Kagi H., Sato S., Akagi T., Kanda H. Generation history of carbonado inferred from photoluminescence spectra, cathodoluminescence imaging, and carbon-isotopic composition // American Mineralogist. 2007. V. 92. № 1. Pp. 217–224.
16. Петровский В.А., Мартинс М., Лютоев В.П. и др. Минералогические и генетические особенности карбонадо из штата Минас Жерайс (Бразилия) // Сыктывкарский минералогический сборник № 33. (Тр. Ин-та геологии Коми науч. центра УрО РАН; Вып. 115). Сыктывкар. 2003. № 33. С. 41–69.
17. Nadoliny V.A., Shatsky V.S., Sobolev N.V., Twitchen D.J. Observation and Central African Carbonados // American Mineralogist. Vol. 88. № 1. 2003. Pp. 11–17.
18. Haggerty S.E. A Diamond Trilogy: Superplumes, Supercontinents, and Supernovae // Science. 1999. V. 285. Pp. 851–860.
19. De S., Heaney P.J., Hargraves R.B. et al. Microstrutural observations of polycrystalline diamond: a contribution to the carbonado conundrum // Earth and planetary letters. 1998. Vol. 164. Pp. 421–433.
20. Heaney P.J., Vicenzi E.P., De S. Strange diamonds: the mysterious origins of carbonado and framesite // Elements. 2005. Vol. 1. Pp. 85–89.
21. Kletetschka G., Taylor P.T., Wasilewski P.J., Hill H.G.M. Magnetic properties of aggregate polycrystalline diamond: implications for carbonado history // Earth and planetary science letters, 2000. Vol. 181. Pp. 279–290.
22. Boynton W.V. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies // Developments in geochemistry 2. Rare earth element geochemistry. Amsterdam: Elsevier. 1984. Pp. 63–114.
23. Петровский В.А., Глухов Ю.В., Сухарев А.Е. и др. Дивергентный характер россыпной ассоциации алмаз-карбонадо // Материалы XIV Геологического съезда Республики Коми «Геология и минеральные ресурсы европейского северо-востока России». Т. IV. Сыктывкар: Геопринт. 2004. С. 76–79.
24. Горшков А.И., Бершов Л.В., Винокуров С.Ф. и др. Карбонадо из округа Леншош, штат Бая (Бразилия): минеральные включения, физические свойства, геохимические особенности и условия образования // Геология рудных месторождений. 1997. Т. 39. № 3. С. 269–277.
25. Войткевич Г.В., Кокин А.В., Мирошников А.Е., Прохоров В.Г. Справочник по геохимии // М.: Недра. 1990. 480 с.
26. Силаев В.И., Петровский В.А., Сухарев А.Е., Мартинс М. Новый вклад в минералогию карбонадо: резюме итогов исследований // Материалы конференции «Геология алмаза – настоящее и будущее (геологи к 50-летию юбилею г. Мирный и алмазодобывающей промышленности России). Воронеж. 2005. С. 695–705.
27. Петровский В.А., Мартинс М., Каблис Г.Н. и др. Поликристаллические алмазные образования из россыпей реки Макаубас (Бразилия)//Вестник Института геологии Коми НЦУрО РАН. 2003. №9. С. 2–6.

References

1. Shelkov D., Verhovskij A.B., Milledzh H. Dzh., Pillindzher K.T. (1997) *Karbonado Brazili i Ubangi: sravnenie s drugimi formami mikrokristallicheskihalmazov na osnove izotopov ugleroda i azota* [Carbonado Brazil and Ubangi: comparison with other forms of microcrystalline diamonds based on carbon and nitrogen isotopes] *Geologiya i geofizika* [Geology and Geofizik]. Vol. 38. No. 2. Pp. 315–322.
2. Kurat G., Dobosi G. (2000) *Garnet and diopside-bearing diamondites (framesites)* [Garnet and diopside-bearing diamondites (framesites)] *Mineral. Petrol* [Mineral. Petrol]. Vol. 69. Pp. 143–159.

3. Trueb L.F., Buttermann W.C., Wys E.C. (1969) *Carbonado: natural polycrystalline diamond* [Carbonado: natural polycrystalline diamond] *Science* [Science]. Vol. 165, No. 3895. Pp. 799–802.
4. Wirth R., Rocholl A. (2003) Nano crystalline diamond from the Earth mantle underneath Hawaii. *Earth and Planet. Sci–Lett.* Vol. 211. No. 3–4. Pp. 357–369.
5. Marakushev A.A., Percev N.N., Zotov I.A. et al. (1995) *Nekotorye petrologicheskie aspekty genezisa almaza* [Some petrological aspects of the genesis of diamond] *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy* [Geology of Ore Deposits]. Vol. 37. No. 2. Pp. 105–121.
6. Dubinchuk V.T., Kochenov A.V., Pen'kov V.F. et al. (1976) *Novoobrazovanie v organicheskom veshchestve osadochnykh porod pri radioaktivnom obluchenii* [New formation in the organic matter of sedimentary rocks under radioactive irradiation] *Doklady RAN SSSR* [Reports of Academy of Sciences of the USSR]. Vol. 231. No. 4. Pp. 973–976.
7. Kaminskij F.V. (1987) *Genezis polikristallicheskich agregatov almaz-karbonado* [Genesis of polycrystalline diamond-carbonado aggregates] *Doklady AN SSSR* [Reports of Academy of Sciences of the USSR]. Vol. 294. No. 2. Pp. 439–440.
8. Ozima M., Zashu S., Tomura K., Matsuhisa Y. (1991) Constraints from noble-gas contents on the origin of carbonado diamonds. *Nature*, Vol. 351. Pp. 472–474.
9. Francesson E.V., Kaminskij F.V. (1974) *Karbonado – raznovidnost' almaza nek Kimberlitovogo genezisa* [Karbonado – Carbonado – a kind of diamond of non-kimberlite genesis] *DAN SSSR* [Academy of Sciences of the USSR]. Vol. 219. No. 1. Pp. 187–189.
10. Smith V.J., Dawson J.B. (1985) Carbonado: Diamond aggregates from early impacts of crustal rocks? *Geology*. Vol. 13. Pp. 342–343.
11. Ezerskij V.A. (1986) *Giperbaricheskie polimorfy, voznikayushchie pri udarnom preobrazovanii ugley* [Hyperbaric polymorphs arising from impact transformation of coals] *Zapiski VMO* [VMO Papers]. CH. 115. Vol. 1. Pp. 26–33.
12. Mal'kov B.A., Rakin V.I. (2003) *Primesnyy kremniy – indikator giperbaricheskich usloviy obrazovaniya karbonado* [Impurity silicon is an indicator of the hyperbaric conditions of carbonado formation] *Materialy Mezhdunarodnoy konferentsii «Uglerod: mineralogiya, geokhimiya i kosmokhimiya»* [Materials of International Conference «Carbon: mineralogy, geochemistry and space chemistry»] *Geoprint* [Geoprint]. Syktyvkar. Pp. 67–68.
13. Mineeva R.M., Speranskij A.V., Egorov B.L., et al. (1999) *Defekty v karbonado: analog radiatsionnogo tsentra R1 v almaze* [Defects in carbonado: analogue of the radiation center R1 in diamond] *Doklady RAN* [Reports of Academy of Sciences of the USSR]. Vol. 367. No. 2. Pp. 238–240.
14. Gorshkov A.I., Vinokurov S.F., Solodov D.I., Bershov L.V., Mohov A.V., Solodova Yu.P., Sivcov A.V. (1998) *Polikristallicheskiy almaz iz trubki «Udachnaya» (Yakutiya): mineralogo-geokhicheskie i geneticheskie osobennosti* [Polycrystalline diamond from the «Udachnaya» tube (Yakutia): mineralogical-geochemical and genetic features] *Litologiya i poleznye iskopaemye* [Lithology and minerals]. No. 6. Pp. 588–603.
15. Kagi H., Sato S., Akagi T., Kanda H. (2007) Generation history of carbonado inferred from photoluminescence spectra, cathodoluminescence imaging, and carbon-isotopic composition. *American Mineralogist*. Vol. 92. No. 1. Pp. 217–224.
16. Petrovskij V.A., Martins M., Lyutoev V.P. et al. (2003) *Mineralogicheskie i geneticheskie osobennosti karbonado iz shtata Minas Zherays (Braziliya)* [Mineralogical and genetic characteristics of carbonado from the state of Minas Gerais (Brazil)] *Syktyvkarskiy mineralogicheskiy sbornik No. 33. Tr. In-ta geologii Komi nauch. tsentra UrO RAN* [Syktyvkar mineralogical papers collection No. 33. Papers of Komi geological institute centre UrO RAS]. Syktyvkar. Vol. 115. No. 33. Pp. 41–69.
17. Nadolniny V.A., Shatsky V.S., Sobolev N.V., Twitchen D.J. (2003) Observation and Central African Carbonados. *American Mineralogist*. Vol. 88. No. 1. 2003. Pp. 11–17.
18. Haggerty S.E. (1999) A Diamond Trilogy: Superplumes, Supercontinents, and Supernovae. *Science*. Vol. 285. Pp. 851–860.
19. De S., Heaney P.J., Hargraves R.B. et al. (1998) Microstrutural observations of polycrystalline diamond: a contribution to the carbonado conundrum. *Earth and planetary letters*. Vol. 164. Pp. 421–433.

20. Heaney P.J., Vicenzi E.P., De S. Strange diamonds: the mysterious origins of carbonado and framesite. *Elements*. 2005. Vol. 1. Pp. 85–89.
21. Kletetschka G., Taylor P.T., Wasilewski P.J., Hill H.G.M. (2000) Magnetic properties of aggregate polycrystalline diamond: implications for carbonado history. *Earth and planetary science letters*. Vol. 181. Pp. 279–290.
22. Boynton W.V. (1984) Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. *Developments in geochemistry 2. Rare earth element geochemistry*. Amsterdam: Elsevier. Pp. 63–114.
23. Petrovskij V.A., Gluhov YU.V., Suharev A.E. et al. (2004) *Divergentnyy kharakter rossyponoy assotsiatsii almaz-karbonado* [The divergent character of the alluvial diamond-carbonado association] *Materialy XIV Geologicheskogo s'ezda Respubliki Komi «Geologiya i mineral'nye resursy evropeyskogo severo-vostoka Rossii». T. IV* [Materials of XIV Geological Congress of Komi Republic «Geology and mineral resources of European North East of Russia». T. IV] *Geoprint* [Geoprint]. Syktyvkar. Pp. 76–79.
24. Gorshkov A.I., Bershov L.V., Vinokurov S.F., et al. (1997) *Karbonado iz okruga Lenshoysk, shtat Bayya (Braziliya): mineral'nye vklucheniya, fizicheskie svoystva, geokhimicheskie osobennosti i usloviya obrazovaniya* [Carbonado from Lenshoysk district, Bahia (Brazil): mineral inclusions, physical properties, geochemical features and conditions of formation] *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy* [Geology of ore deposits]. Vol. 39. No. 3. Pp. 269–277.
25. Vojtkovich G.V., Kokin A.V., Miroshnikov A.E., Prohorov V.G. (1990) *Spravochnik po geokhimii* [Handbook of Geochemistry] *Nedra* [Nedra]. Moscow. 480 p.
26. Silaev V.I., Petrovskij V.A., Suharev A.E., Martins M. (2005) *Novyy vklad v mineralogiyu karbonado: rezyume itogov issledovaniy* [A new contribution to the mineralogy of carbonado: a summary of the results of the studies] *Materialy konferentsii «Geologiya almaza – nastoyashchee i budushchee (geologi k 50-letnemu yubileyu g. Mirnyy i almazodobyvayushchey promyshlennosti Rossii)* [Conference Papers «Diamond Geology – present and future» (Geologists – for the 50–th Anniversary of the City of Mirny and diamond mining industry of Russia)]. Voronezh. Pp. 695–705.
27. Petrovskij V.A., Martins M., Kablis G.N. et al. (2003) *Polikristallicheskie almaznye obrazovaniya iz rossypey reki Makaubas (Braziliya)* [Polycrystalline diamond formations from the placers of the Macaubas River (Brazil)] *Vestnik Instituta geologii Komi NTs UrO RAN* [Bulletin of the Komi Institute of Geology NC UrO RAS]. No. 9. Pp. 2–6.