

ГЕОЛОГО- МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 549.211

ИМПАКТНОЕ ПРОИСХОЖДЕНИЕ КАРБОНАДО

Б.А. МАЛЬКОВ¹, А.М. АСХАБОВ²

¹ Коми государственный пединститут, г.Сыктывкар

² Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, г.Сыктывкар
askhabov@geo.komisc.ru

Обсуждается генезис загадочных криптокристаллических алмазных агрегатов (карбонадо), распространенных исключительно в древних и современных россыпях Бразилии и Центральной Африки. Показано, что: 1. Источник углерода в карбонадо, судя по его изотопному составу, в равной мере мог быть земным или космическим. 2. Параметры кристаллизации карбонадо превосходят те, что существуют в литосферной мантии Земли и близки условиям углеродного ликвидуса на известных Р–Т диаграммах фазового состояния углерода. 3. Исключительно большой абсолютный возраст и отсутствие в алмазных кристаллитах азотных сегрегаций исключают сколь-нибудь продолжительную резиденцию карбонадо в земной мантии. 4. Карбонадо – это древнейшая криптокристаллическая порода «алмазит», возникшая из углеродного расплава импактного происхождения.

Ключевые слова: **карбонадо, алмазит, импактит**

B.A. MAL'KOV, A.M. ASKHABOV. THE IMPACT ORIGIN OF CARBONADO

Genesis the mysterious crypto-crystalline diamond aggregates (carbonado) spread exclusively in ancient and modern fields of Brazil and the Central Africa is discussed. It is shown that (1) source of carbon in carbonado, judging by its isotope structure, equally could be terrestrial or space. (2) parameters of carbonado crystallization surpass those that exist in lithosphere mantle of the Earth, and are close to conditions of carbon liquidus in known P-T diagrams of phase condition of carbon. (3) absolute age of diamondite matrix and "zero" degree of aggregation of nitrogen in diamond crystallites excludes any long residence of carbonado in terrestrial mantle. (4) Carbonado is the most ancient crypto-crystalline rock "diamondite", originating from carbon fusion of impact origin.

Key words: **carbonado, diamondite, impactite**

Бразильские и африканские карбонадо представляют уникальные по своим особенностям алмазные образования, коренные источники которых до сих пор неизвестны. В кимберлитах и лампроитах карбонадо не обнаружены. Они присутствуют только в древних метаконгломератах протерозоя (формации Сопы и Томбадор) и в современных алмазоносных россыпях Бразилии и Центральной Африки.

Генезис карбонадо во многом загадочен. Одна группа исследователей связывает их происхождение с древнейшими импактными процессами, действующими на компактные скопления изотопнолегкого органического вещества типа шунгита или графита, присутствующего в различных древних породах земной коры [1-3]. Часть исследователей предполагает существование астероидов-импакторов, изначально обогащенных «внеземным» углеродом [4, 5]. Действительно, общие содержа-

ния углерода в ахондритах–уреилитах и в углистых хондритах достаточно высоки, достигая 4.0 и 4.6 мас.%, соответственно. В железных метеоритах углерода обычно немного (~1.0 %). Но в некоторых из них, например, в железном метеорите Каньон Дьябло из Аризонского кратера присутствуют гнезда и крупные нодулы графита диаметром до 9 см. В ахондритах–уреилитах и железном метеорите Каньон Дьябло установлены мелкие апографитовые импактные алмазы с примесью лонсдейлита [6]. Такие же алмазы были найдены в антарктическом железном метеорите ALHA-77283 [7]. Самые примитивные метеориты – углистые хондриты – также содержат включения микроскопических алмазов, но они принципиально иного типа [6].

Некоторые исследователи считают карбонадо мантийными ксенолитами, вынесенными на поверхность магмой неизвестного состава [8]. При этом предполагается, что источником углерода с низким значением отношения $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ для образова-

ния карбонадо в верхней мантии могли служить углеводороды.

Весьма интересную гипотезу внеземного происхождения карбонадо обосновывают Дж. Гараи и С. Хагерти с коллегами [5], которые указывают на сходство ИК-спектров африканских и бразильских карбонадо и «досолнечных» метеоритных алмазов. Они предполагают существование гипотетических алмазных астероидов, фрагментами которых являются карбонадо.

Обосновываемая в данной работе точка зрения на генезис карбонадо сводится к тому, что в период гигантской метеоритной бомбардировки на Землю падали крупные астероиды, обогащенные графитом. В результате происходило ударное плавление графитовых нодулей и возникли желваки карбонадо. При этом большая часть метеоритного железа испарялась, как это произошло, к примеру, при падении в Аризоне сравнительно небольшого по космическим меркам метеорита Каньон Дьябло с его предполагаемой начальной массой от 50 тыс. до 3 млн. т [6]. Заметим, что температуры плавления и кипения чистого железа 1535 и 2735 °C легко достигаются при рядовых астероидных импактах. Иридиевые аномалии в тонких глобальных прослоях осадочных пород на рубежах крупных импактных событий ярко свидетельствуют об испарении и конденсации тугоплавкого метеоритного вещества. Температуры плавления и кипения (конденсации) иридия: 2454 и 4380°C, как и углерода: 3650 и 4350°C, вероятно, достигались только при особо мощных астероидных импактах. О кристаллизации карбонадо из высокотемпературного импактного углеродного расплава свидетельствует отсутствие в них лонсдейлита, образующегося только при твердофазном превращении графита в алмаз. Сама криптокристаллическая пористая структура карбонадо также указывает на быструю кристаллизацию горячего углеродного расплава.

Именно с таких позиций в свете новейших экспериментальных данных становится понятным их (карбонадо) шлаковидный облик, высокая (до 30%) пористость, криптокристалличность, присутствие в них самородных металлов, их сплавов, карбидов и нитридов, легкий изотопный состав углерода, стекловидная оплавленная поверхность, наличие деформационных ламелл при полном отсутствии мантийных минеральных включений. Источником углерода с легким изотопным составом могли быть и астероиды и породы земной коры типа шунгитов или графитовых гнейсов.

Таким образом, карбонадо – это пористая криптокристаллическая порода импактного происхождения (алмазит), для кристаллизации которой из углеродного расплава требуются не только высокие давления, превосходящие многократно возможные давления в мантии Земли, но и аномальные температуры, превышающие температуру углеродного ликвидуса: 3650 – 4000 °C [2, 9]. Такие температуры, недостижимые в земной мантии, могут реализовываться в крупных ударных бассейнах ранней Земли. Подтверждением этому служит древний изохронный возраст кристаллической матрицы карбонадо, около 3811 ± 1800 млн. лет, и включенных в нее кристаллов рутила, с возрастом

порядка 3916 ± 1300 млн. лет, установленным локальным Pb–Pb методом [10]. Астероиды около 4 млрд. лет назад создавали на поверхности Земли и Луны ударные кратеры и бассейны диаметром 300–1200 км и глубиной порядка 30–120 км, соизмеримой с величиной космических ударников. Углеродные расплавы, из которых кристаллизуются микрокристаллические алмазиты, называемые карбонадо, образуются за счет углеродистого вещества мишени и ударника.

Интересно, что карбонадо на Земле встречаются в одном ареале диаметром около 2 тыс. км в пределах когда-то единого катархейского Бразильско-Африканского кратона. Этот ареал очень напоминает обширные поля рассеяния тектитов. В протерозойских конгломератах Сопа в бразильском штате Минас-Жерайс, наряду с карбонадо, присутствует несколько разновозрастных популяций обломочных цирконов. Древнейшие из них имеют изохронный U–Pb изотопный возраст 3599 ± 12 млн. лет, рекордный для всей Южно-Американской платформы [10].

Важнейшей физической характеристикой алмазов, проливающей свет на их происхождение, является степень агрегированности в них примесного азота. Длительное их (алмазов) пребывание при высоких температурах приводит к миграции и агрегированию одиночных атомов азота [11]. Напротив, пребывание алмазов при низких температурах сохраняет первоначальное одиночное состояние атомов N. Кинетика агрегирования атомов азота в обычных алмазах изучена экспериментально в широком диапазоне *PT*-параметров, что позволяет приближенно оценивать длительность отжига в природных условиях по модельным уравнениям реакций агрегирования и соответствующим им диаграммам. Высокий уровень агрегированности азота отвечает длительному пребыванию алмазов в мантии в условиях отжига. Низкий уровень, напротив, отвечает условиям их (алмазов) кратковременной резиденции в мантии или условиям «закалки». ИК-спектроскопия позволяет надежно определять тип азотных дефектов и оценивать уровень агрегирования азота в обычных алмазах по особенностям характерных спектральных полос поглощения. Но криптокристаллические карбонадо всегда содержат обильные микроскопические минеральные включения, индивидуальные интенсивные полосы поглощения которых перекрывают область проявления полос колебаний с участием примесного азота. Отсюда происходят разночтения у специалистов при расшифровке экспериментальных спектров. Одни из них «видят» азотные сегрегации и плейтлиты в карбонадо [12, 13], другие их «не различают» и отвергают, вскрывая методические просчеты предшественников, заключающиеся в недостаточной физической и химической очистке образцов карбонадо от минеральных, а иногда и посторонних примесей [5]. В результате подобных «разночтений» одни исследователи находят в карбонадо признаки их длительного, около 3 млрд. лет, «мантийного» пребывания [12]. Другие, напротив, в очищенных от минеральных включений препаратах бразильских и африканских карбонадо никаких азотных сегрегаций не обнаруживают [5]. По-

следнее хорошо согласуется с гипотезой быстротечного импактного происхождения бразильских и африканских карбонадо и противоречит гипотезе их мантийного генезиса.

Подтверждающий, казалось бы, мантийную гипотезу вывод Х. Каги с коллегами [13] о присутствии азотных сегрегаций типа 1аА в алмазных кристаллитах карбонадо, сделанный на основе установленного ими в ИК-спектрах острого абсорбционного пика при 1384 см^{-1} , как это было показано позднее Дж. Гараи с коллегами [5], является досадным «артефактом» и связан с контаминацией нитридом бора образцов карбонадо при их дроблении в стальных контейнерах.

Как известно, изменение агрегатного состояния азота в алмазе происходит только при высоких температурах (выше $800\text{ }^{\circ}\text{C}$) и за длительное время отжига [12, 13]. Что касается карбонадо, то время агрегирования азота из состояния 1b в 1аА при заданной температуре «мантийного» отжига $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ в карбонадо было оценено в 3 млрд. лет [12]. «Послеотжиговое» же пребывание карбонадо в метаконгломератах Сопы составляет 1700–1750 млн. лет [10]. Следовательно, возраст бразильских карбонадо, с учетом предполагаемого времени их «мантийного» отжига, должен достигать 4700–4750 млн. лет. А это превышает Pb–Pb изотопный возраст самих карбонадо и даже возраст Земли, что также противоречит гипотезе мантийного происхождения карбонадо.

Необычное происхождение карбонадо подтверждается не только облегченным (как у шунгита) изотопным составом углерода, но и их крипстокристалличностью, высокой пористостью, не свойственной для глубинных пород, полным отсутствием в них явных силикатных и рудных высокобарных «мантийных» включений и огромным количеством низкобарных минералов неясного происхождения. Часть этих минералов, например рутил и циркон, могла быть механически захвачена ударным углеродным расплавом из пород земной коры, а минералы позднейшего гидротермального и экзогенного происхождения – заполнить в карбонадо трещины и поровые пространства в «алмазитовой» матрице. Такое тесное совмещение в карбонадо минералов различной барофильности также легко объяснить быстротечностью импактных процессов. Нечто подобное наблюдается в тагамитах земных ударных кратеров, когда высокобарные импактные алмазы вместе с многочисленными низкобарными минералами земной коры находятся в цементирующей их стекловатой тагамитовой матрице, а желвачки импактных алмазов, например апоугольных тогоритов в Карской астроблеме, пересекаются жилками гидротермального кварца. Присутствие высокобарных фаз, типа коэсита, стишовита или силикатного перовскита, в карбонадо весьма вероятно, но пока, к сожалению, не установлено. Следы шоковой деформации минералов, захваченных углеродным расплавом, при его остывании быстро заживают и исчезают в результате перекристаллизации. Тем не менее, высокая концентрация планарных ламелл в алмазных кристаллитах, слагающих карбонадо, отмечается [5, 8].

Очень симптоматично присутствие в алмазных кристаллитах, слагающих карбонадо, атомов примесного Si⁰ и эксклюзионных ламелл SiC [14]. Они также свидетельствуют о высочайших «ударных» РТ-параметрах образования алмаза и эксклюзии кремния из твердого раствора при их снижении. В карбонадо присутствуют ряд самородных элементов и их сплавов, а также тугоплавкие карбиды железа, кремния и вольфрама и тугоплавкий нитрид титана – осборнит. Образование карбидов и части самородных металлов лучше всего объяснимо их кристаллизацией из импактного углеродного расплава в бескислородной среде. Температура этого расплава, судя по признакам явного плавления/разложения в нем включений рутила и циркона, превосходила известную по справочникам температуру плавления этих минералов, равную $1825\text{--}2550\text{ }^{\circ}\text{C}$, и достигала температур углеродного ликвидуса $3650\text{--}4000\text{ }^{\circ}\text{C}$ на диаграммах фазового состояния углерода [9]. Температура плавления нитрида титана (осборнита) – $2947\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ранее его присутствие отмечалось только в составе метеоритов [5].

Практически мгновенное и хаотическое смешение высокобарных и низкобарных минералов происходит в ударных бассейнах и кратерах на поверхности Земли. И, главное, что высокобарные минералы – якутит, тогорит, стишовит, коэсит, рингвудит – имеют здесь совсем не глубинно-мантийное, а импактно-коровое происхождение. Карбонадо – это не минерал, как иногда ошибочно полагают, а мономинеральная горная порода «алмазит» с миаролитовой текстурой, возникающая в результате быстрой кристаллизации горячих углеродных расплавов в ударных бассейнах Земли. Понятно, что такой расплав захватывает огромное количество низкобарных минералов из разнообразных поверхностных пород мишени и, быстро застывая и кристаллизуясь, метаморфизует, расплавляет и цементирует их. Карбонадо предвставляют тугоплавкие пористые гипербарические фрагменты ранних алмазоносных импактитов с рекордным возрастом 3.8–3.9 млрд. лет, образующих широкие поля рассеяния вокруг материнских астроблем.

Образование «кимберлитовых» алмазов перидотитового и эклогитового парагенезисов происходит в породах субконтинентальной литосферной мантии значительно позднее, чем формирование желваков карбонадо в земной коре, и, главное, принципиально иным способом. Длительный и многостадийный метасоматический рост алмазов в мантийных породах подтверждают многие морфологические, кристаллофизические и геохимические признаки кристаллических индивидов [15]. Общее время образования и нахождения (резиденции) кристаллов алмаза в мантии до их извержения кимберлитовой магмой, по радиометрическим изотопным данным и степени агрегирования азота, варьирует от 40 млн. до 3 млрд. лет даже в пределах одного (!) мантийного ксенолита [16]. Максимальное время отжига «кимберлитовых» алмазов (~3 млрд. лет). Абсолютный возраст «кимберлитовых» алмазов всегда значительно (на 300–500 млн. лет) меньше аналогичного возраста карбонадо.

Таким образом, карбонадо принадлежат к древнейшим алмазоносным породам Земли с воз-

растом 3.8–3.9 млрд. лет. Их всестороннее исследование приоткрывает нам самые таинственные моменты образования алмазов в природе из углеродных расплавов ударного происхождения и проясняет самые темные страницы ранней истории Земли в промежутке между Великим столкновением 4.515 млрд. лет назад и завершающим этапом гигантской метеоритной бомбардировки 3.87 млрд. лет назад, когда ударные бассейны типа лунного Моря Дождей (диаметр 1200 км) формировались и на поверхности Земли. Вероятно, не случайным является совпадение абсолютного возраста земных карбонадо с возрастом Моря Дождей.

Выводы

1. Источник изотопно легкого углерода в карбонадо, в равной мере, мог быть земным или космическим.
2. Параметры кристаллизации карбонадо превосходят те, что существуют в литосферной мантии Земли, и близки условиям углеродного ликвидуса на известных Р–Т диаграммах фазового состояния углерода.
3. Древний абсолютный возраст и «нулевая» степень агрегирования азота в алмазных кристаллитах исключают продолжительную резиденцию карбонадо в земной мантии.
4. Карбонадо – это древнейшая криптокристаллическая порода «алмазит», возникшая из углеродного расплава импактного происхождения.

Литература

1. Мальков Б.А. Карбонадо – продукт гипербарической кристаллизации импактного апошунгитового расплава // Органическая минералогия: Материалы II Российского совещания по органической минералогии. Петрозаводск: ИГ Карельского НЦ РАН, 2005. С. 170-172.
2. Мальков Б.А., Асхабов А.М. Карбонадо – древнейшие импактные «алмазиты» Земли // Минералогическая интервенция в микро- и наномир: Материалы Международного минералогического семинара. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2009. С. 222-227.
3. Smith V.J., Dawson J.B. Carbonado: Diamond aggregates from early impact of crustal rocks // *Geology*, 1985. Vol. 13. P. 342-343.
4. Haggerty S.E. A diamond trilogy: superplumes, supercontinents, and Supernovae // *Science*, 1999. Vol.285. P. 851-860.
5. *Infrared absorption investigations confirm the extraterrestrial origin of carbonado diamonds/* J.Garai, S.E.Haggerty, S.Rekhi, M.Chance // *The Astrophysical Journal*, 2006. 653: No 2. P. 153–156.
6. Вдовыкин Г.П. Алмазы в метеоритах. М.: Наука, 1970. 127 с.
7. Вишневецкий С.А. Астроблемы. Новосибирск: ООО «Нонпарель», 2007. 288 с.
8. Сухарев А.Е., Петровский В.А. Минералогия карбонадо и экспериментальные модели их образования. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 195 с.
9. *The pressure-temperature phase and transformation diagram for carbon; updated through 1994 /* F.R.Bundy, W.A.Basset, M.S.Weathers, R.J.Hemley, H.K.Mao, A.F.Goncharov // *Carbon*, 1996. Vol.34. No. 2. P. 141-153.
10. *Ion microprobe Pb–Pb dating of carbonado, polycrystalline diamond /* Y.Sano, R.Yokochi, K.Terada, M.L.Chaves, M.Ozima // *Precambrian research*, 2002. Vol.113. P. 155-168.
11. Мальков Б.А., Асхабов А.М. Азотные сегрегации (плейтелиты) в кристаллах алмаза – продукт мантийного отжига // *ДАН СССР*, 1979. Т. 248. № 6. С. 142-1423.
12. *Карбонадо Бразилии и Убанги: сравнение с другими формами микрокристаллических алмазов на основе изотопов углерода и азота/* Д.Шелков, А.Б.Верховский, Х.Дж.Милледж, К.Т.Пиллинджер // *Геология и геофизика*, 1997. Т.38. № 2. С. 315-322.
13. *Chemical properties of Central African carbonado and its genetic implications /* H.Kagi, K.Takahashi, H.Hidaka, A.Masuda // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1994. Vol. 58. P. 2629-2638.
14. Мальков Б.А., Ракин В.И. Примесный кремний – индикатор гипербарических условий образования карбонадо // *Углерод: минералогия, геохимия и космохимия: Материалы Международной конференции. Сыктывкар: Геопринт, 2003. С. 67-68.*
15. *Причины разнообразия морфологии и примесного состава алмазов из эклогита трубки Удачная /* А.С.Степанов, В.С.Шацкий, Д.А.Зед-генизов, Н.В.Соболев // *Геология и геофизика*, 2007. Т. 48. № 9. С. 974-988.
16. Зайцев А.И. О возрасте алмазов Якутской алмазоносной провинции // *Отечественная геология*, 2008. № 5. С. 79-85.