



БРАЗИЛЬСКИЕ КАРБОНАДО — САМЫЕ БАРОФИЛЬНЫЕ И ТУГОПЛАВКИЕ ГОРНЫЕ ПОРОДЫ НА ЗЕМЛЕ

Д. г.-м. н. Б. А. Мальков
elmal@online.ru

Карбонадо — скрытокристаллический мономинеральный породный агрегат алмазных кристаллитов, известный в россыпях Бразилии и Центрально-Африканской Республики (рис. 1). Он отличается рядом особенностей, не позволяющих отождествлять его с алмазами и агрегатами эндогенного происхождения. А некоторые свойства карбонадо, такие, как криптозернистость и парагенезис алмаза с карбидом кремния, присутствие

температуры и давления образования карбонадо до последнего времени оценивались по аналогии с мантийными алмазами либо путем сравнения с модельными системами. Особенности бразильских карбонадо, выявленные недавно [1, 2, 5], позволяют нам сегодня впервые определить РТ-область их кристаллизации на фазовой диаграмме углерода.

1) Так, в решетке его алмазных кристаллитов методом рентгеновской спек-

3) Более крупный размер кристаллитов, от 1 до 20 мкм, слагающих карбонадо, в сравнении с якутитом и тогоритом позволяет предполагать относительно длительный, порядка долей секунды, период его кристаллизации в импактном расплаве.

4) Отсутствие в карбонадо лонсдейлитовой фазы говорит о его (карбонадо) кристаллизации из углеродного расплава.

5) Своеобразие набора азотных дефектов, заключающееся в преобладании вакансионных одноатомных NV, двухатомных VN₂V, трехатомных N₃V ассоциатов при полном отсутствии азотных сегрегаций типа «плейтелитс», свидетельствуют о том, что алмазные кристаллиты совсем не подвергались мантийному отжигу и кристаллизовались вне мантии.

6) Присутствие платины, рутила, циркона и бадделита в межзерновых пространствах алмазного агрегата говорит об очень высоких температурах остаточных расплавов.

Изоморфизм углерода и кремния возможен только при очень высоких давлениях, достигавших, согласно расчетам [1], 62—75 ГПа, и соответствующих ему температурах от 5200 до 5250 К на линии плавления алмаза [3]. Пористость бразильских карбонадо отражает импактную специфику их образования, связанную с тем, что в породах при их ударно-волновом сжатии и нагреве возникает гетерогенный агрегат несмешивающихся мономинеральных расплавов, кристаллизующихся самостоятельно при быстром спаде высоких импульсных давлений и температур. Такая гетерогенная структура приводит к тому, что горячий углеродный расплав кристаллизуется первым, вовлекая в свою алмазную решетку атомарный азот и примесный Si[°]. Все другие порции расплавов оказываются в кавернах и порах закристаллизовавшейся алмазной матрицы. На стенках микрополостей из них сначала кристаллизуются самые тугоплавкие минералы: SiC, ZrO₂, TiO₂, Pt. Их температуры плавления при нормальных условиях соответственно: > 2973, 2953, 2128,

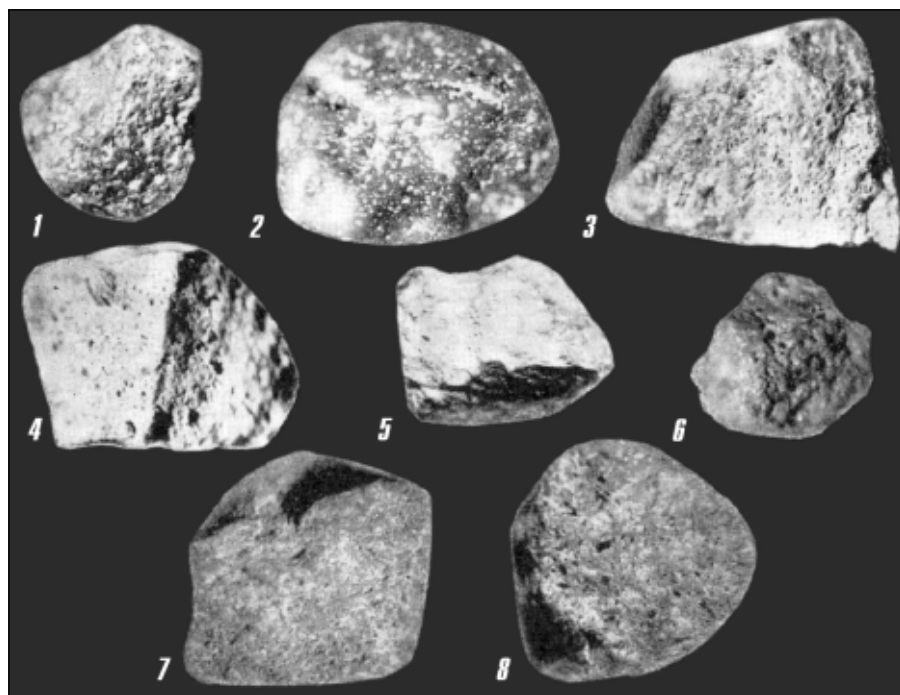


Рис. 1. Желвачки бразильских карбонадо по Ю. Л. Орлову [7]

в нем инородных включений ряда тугоплавких минералов (ZrSiO₄, ZrO₂, TiO₂, SiO₂) и самородных элементов (Si, Fe, Cr, Ni, Pt), позволяют отдать предпочтение его импактному происхождению за счет высокоуглеродистых пород типа шунгитов или горючих сланцев [1], имеющих такой же «облегченный» изотопный состав углерода. И сейчас уже имеются все основания для выделения ряда «алмазиков», различающихся по унаследованному от пород мишени изотопному составу углерода: якутитов (апографитовых), тогоритов (апоугольных) и карбонадо (апошунгитовых) [1]. Темпера-

троскопии зафиксирован специфический дефект, обусловленный примесным Si[°] [2], который первоначально входил в кристаллическую решетку алмаза при максимальных импульсных давлениях, а при спаде последнего занял позицию в октаэдрических пустотах алмазной решетки [1].

2) Присутствие в алмазных кристаллитах, слагающих карбонадо, пластинчатых закономерных (эндотаксиальных) вростков SiC [1, 4] позволяет предполагать их (вростков) образование при T < 3100 К, так как выше этой температуры, при давлении 8—9 ГПа карбид кремния уже подвергается инконгруэнтному плавлению.

* Коми государственный пединститут, Сыктывкар

2042 К, а в диапазоне давления 20—75 ГПа они должны заметно повышаться, хотя точные справочные данные для высоких давлений отсутствуют. Представляют интерес относительно крупные (40—50 мкм) приповерхностные включения $ZrSiO_4$ и SiO_2 в желвачках бразильских карбонадо. Изредка округлые «оплавленные» зерна SiO_2 находятся внутри последних в «плотном» окружении алмазных кристаллитов. Первоначально это мог быть стишовит, коэсит или лешательерит, которые присутствуют в импактиках многих земных астроблем. Предполагаемая область давлений и температур кристаллизации карбонадо должна прилегать к линии плавления алмаза на фазовой диаграмме углерода [3], находясь выше линий плавления бадделейта и рутила. Высокобарному (62—75 ГПа) отрезку линии плавления алмаза соответствует интервал температур 5200—5250 К. Расчет указанного давления кристаллизации мы осуществили кристаллофизическим методом [1], используя присутствие в алмазных кристаллитах примесного Si° . Косвенными индикаторами температур и давлений служат бадделейт, циркон, рутил, платина, находящиеся в кавернах карбонадо, и особенности самих алмазных кристаллитов, слагающих карбонадо: присутствие в них примесного Si° и ориентированных пластинчатых вростков SiC. О кристаллизации бразильских карбонадо из расплава говорит их тектическая структура и отсутствие в них лонсдейлитовой фазы. Абсолютное преобладание структурных дефектов, отвечающих одиночным атомам примесного азота, исключает предположения об их мантийной кристаллизации и длительном мантийном отжиге.

Примесный Si° в решетке алмазных кристаллитов — индикатор гипербарических (> 62 ГПа) условий образования карбонадо [1]. В импактных алмазах ударно-метаморфического типа, якутите и тогорите, примесный кремний отсутствует, хотя порядок импульсных давлений был примерно таким же. В шунгитовой мишени, в отличие от графитовой и угольной, при шоковой диссоциации кремнезема высвобождался атомарный кремний, попадавший сразу в углеродный расплав, где при гипербарической кристаллизации карбонадо он сначала изоморфно входил в решетку алмазных кристаллитов, а при спаде импульсных давлений — из узлов алмазной решетки попадал в октаэдрические пустоты, объем которых совпадает с объемом

атомов кремния [1]. Вростки карбида кремния (SiC) в алмазных кристаллитах карбонадо, выявленные микросондом [1, 4], не имеют аналогов в других разновидностях импактных и мантийных алмазов. Расчеты показывают [1], что эн-

но (рис. 2), что ареал кристаллизации карбонадо прилегает к линии плавления алмаза при 60—80 ГПа, находясь в самой высокотемпературной части области полного плавления силикатных пород. Отсюда следует, что бразильские карбонадо —

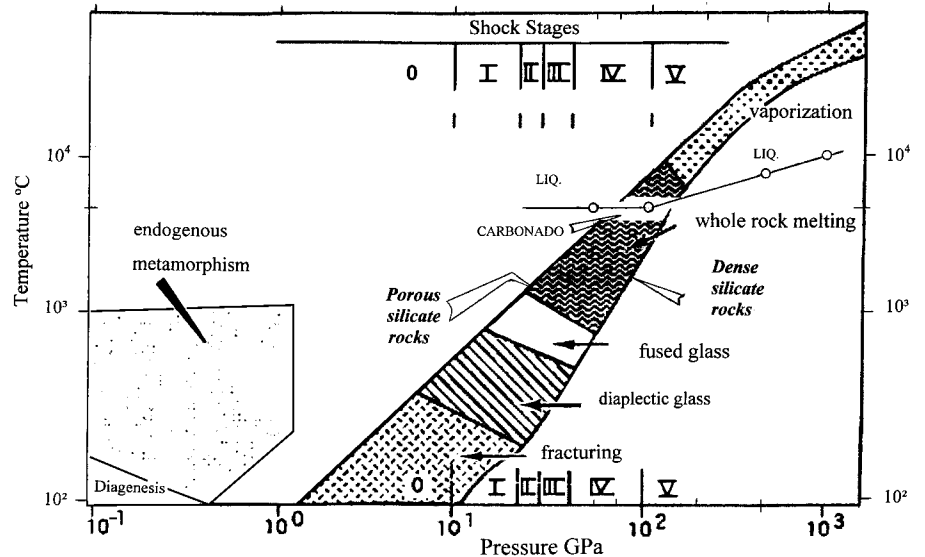


Рис. 2. Область кристаллизации бразильских карбонадо из расплава на P-T-диаграмме, определяющей фазии ударно-волнового метаморфизма и плавления силикатных пород [5]. LIQ — высокотемпературный углеродный ликвидус в диапазоне 60—80 ГПа, адекватный условиям кристаллизации «бразильских карбонадо»

дотаксиальные вростки SiC в алмазных кристаллитах, слагающих карбонадо, появлялись только при давлениях 22—24 ГПа. Гексагональная барофильная модификация углерода, лонсдейлит, рассматривается как индикатор импактного происхождения алмазов. Но парадоксальность бразильских и африканских карбонадо как раз и заключается в отсутствии в их кристаллитах лонсдейлитовой фазы. И причина этого кроется в том, что «шунгитовый» субстрат испытал не только колоссальные шоковые нагрузки в 62—75 ГПа, но и сильнейший, выше углеродного ликвидуса 5200—5250 К, мгновенный адиабатический разогрев и полное расплавление с последующей очень быстрой раскристаллизацией в алмазный породный агрегат, называемый «карбонадо». Импактный способ образования роднит карбонадо с якутитами. Но принципиальная разница заключается в кристаллизации первых из горячего (> 5250 К) ударного расплава, а вторых — в образовании при твердофазном превращении кристаллов графита в алмаз-лонсдейлитовые парамофозы при «умеренных» температурах (1500—1700 К). На диаграмме давлений и температур, определяющей области существования углеродного расплава, полей ударно-волнового метаморфизма и плавления силикатных пород [5], вид-

это самые барофильные (62—75 ГПа) и тугоплавкие (5200—5250 К) импактные горные породы, которые когда-либо существовали на Земле.

Автор признателен А. М. Асхабову, В. П. Лютюеву, В. И. Ракину за продуктивное обсуждение затронутой проблемы.

Литература

1. Мальков Б. А., Ракин В. И. Примесный кремний — индикатор гипербарических условий образования карбонадо // Углерод: минералогия, геохимия и космохимия: Материалы Междунар. конф. Сыктывкар: Геопринт, 2003. С. 67—68.
2. Минеева П. М., Сперанский А. В., Егоров Б. Л. и др. Дефекты в карбонадо: аналог радиационного центра R1 в алмазе // ДАН. 1999. Т. 367, № 2. С. 238—240.
3. Bundy F. P., Bassett W. A., Weathers M. S., et al. The pressure-temperature phase and transformation diagram for carbon; updated through 1994 // Carbon. 1996. V. 34, № 2, P. 141—153.
4. De S. et al. Microstructural observations of polycrystalline diamond: a contribution to the carbonado conundrum // Earth and Planet. Sci. Letters. 1998. V. 164. P. 421—433.
5. Martinez I., Schörrer U., Guyot F. Impact-induced phase transformation at 50—60 GPa in continental crust: an EPMA and ATEM study // Earth and Planet. Sci. Letters. 1993. V. 119. P. 207—223.
6. Smith V. J., Dawson J. B. Carbonado: Diamond aggregates from early impact of crustal rocks? // Geology. 1985. V. 13. P. 342—343.
7. Орлов Ю. Л. Минералогия алмаза. М.: Наука, 1973. 224 с.