

ПРИРОДА

№ 10 - 1999 г.

В.Л. Масайтис

Сотворены силами небесными...

© Природа

*Использование или распространение этого материала
в коммерческих целях
возможно лишь с разрешения редакции*



Образовательный сетевой выпуск
VIVOS VOCO! - ЗОВУ ЖИВЫХ!
<http://www.accessnet.ru/vivovoco>



Сотворены СИЛАМИ НЕБЕСНЫМИ...

В. Л. Масайтис

Виктор Лудвигович Масайтис, доктор геолого-минералогических наук, заведующий отделом петрологии Всероссийского научно-исследовательского геологического института им. А.П. Карпинского, заслуженный деятель науки РФ. Область научных интересов — геология и петрология изверженных и ударных пород. Награжден медалью Баррингера.

К ИМБЕРЛИТЫ и лампроиты, застывшие из глубинной магмы и залегающие в форме вулканических жерловин, — пока единственные в мире коренные промышленные источники алмазов. Они представляют также большой научный интерес, поскольку несут информацию о процессах в недрах нашей планеты¹, где кристаллизовались алмазы в условиях высоких давлений (до 60–70 кбар) и температур (около 1800°C). Последние десятилетия ознаменовались не только выявлением таких пород во многих регионах мира, в том числе в Восточной Сибири и на севере Русской равнины, но и неожиданным обнаружением новых, ранее не известных генетических типов коренных алмазоносных пород. К их числу относятся и некоторые горные породы, встречающиеся в отдельных круговых и кольцевых геологических структурах, которые до недавнего времени считались загадочными. Лишь в течение последних трех-четырёх десятков лет природа их была выяснена — оказалось, что их образование связано с выпадением на Землю крупных метеоритов, астероидов и комет. Импактные структуры, первоначально представлявшие собой округлые впадины, окаймленные валами и похожие на кратеры, усеивающие поверхности твердых тел Солнечной системы, впоследствии были видоизменены эрозией или захоронены под толщами осадочных пород. Такие структуры, утратившие первичную форму кратеров, называют астроблемами — звездными ранами. Сейчас на земной поверхности уже найдено более 150 подобных объектов, и число их множит-

© В.Л.Масайтис

¹ Примечание редактора. См.: Богатиков О.А., Кононова В.А. Магматическое окно в глубины Земли // Природа. 1999. №5. С.12–17.



Импактные структуры (астроблемы) мира. Астроблемы с алмазосодержащими импактитами отмечены крестиком.

ся с каждым годом. Залегающие в них породы возникли при чудовищных по своей мощи космических взрывах (в частности, испытали импульсное сжатие до 500–600 кбар и более) и обладают четко выраженными признаками ударно-волновых преобразований порообразующих минералов, включая их аморфизацию, переход в фазы высокого давления или даже плавление. При этом из различных местных горных пород получают даже сплошные массы застывшего расплава.

В качестве фаз высокого давления природные импактные алмазы образуются наряду с такими минералами, как коэсит и стишовит, представляющими собой высокоплотные модификации кварца. Впервые на Земле подобные алмазы были найдены в метеоритах еще в конце про-

шлого века. Например, вблизи Аризонского кратера, возникшего при падении железного метеорита. Углеродистое вещество здесь первоначально было составной частью ударившего космического тела. Первые импактные алмазы непосредственно в земных породах, испытавших ударно-волновые превращения, были обнаружены в начале 70-х годов на севере Восточной Сибири в Попигайской астроблеме, принадлежащей к числу крупнейших на Земле. Они представляют собой продукт перехода графита местных пород в фазы высокого давления и наследуют многие его особенности: шестигульчатые пластинчатые формы, элементы двойникования на поверхности зерен, изотопный состав углерода и др. От сверкающих своими гранями прозрачных кимберлитовых алмазов отличаются желтой, бурой и черной окраской, поликристаллической внутренней структурой, составленной ориентированными микрокристаллами кубической и, возможно, гексагональной (лонсдейлит) фаз, в поперечнике около 10^{-5} см. Подобная структура обуславливает аномальные оп-

Аризонский метеоритный кратер.

тические свойства, в частности двулучепреломление. Размеры таких импактных поликристаллических агрегатов иногда достигают сантиметра. Они обладают значительной термостойкостью и высокой твердостью, иногда превосходящей твердость кимберлитовых алмазов. На сегодняшний день аналогичные алмазы обнаружены в породах десяти астроблем на территориях России, Украины, Германии, Канады, Финляндии.

Алмазосные импактиты в Попи-гайской астроблеме были открыты геологами ВСЕГЕИ — Всероссийского научно-исследовательского геологического института. Эти породы и содержащиеся в них алмазы детально изучались ими в течение многих лет, в том числе в рамках широкой программы поисково-разведоч-

Импактный алмаз наследует пластинчатую форму графитового кристалла-предшественника, однако несколько округлен за счет коррозии в расплаве. Длина зерна 1.6 мм.

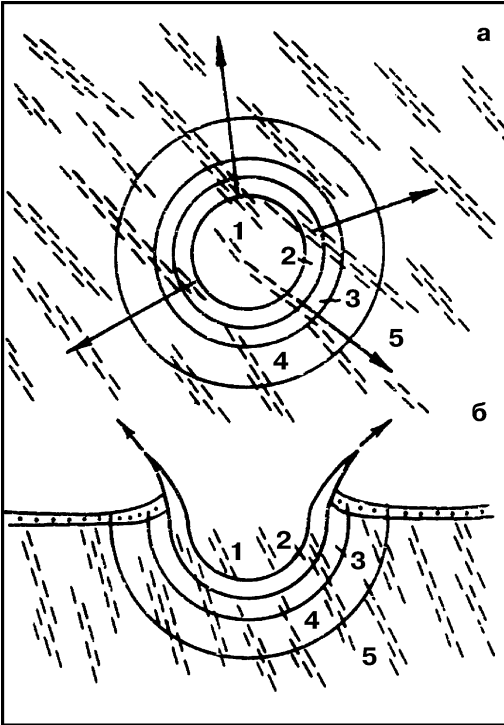


Схема концентрических зон импактного преобразования, наложенных на гнейсы с неравномерным распределением графита (показан штриховкой): а – план, б – разрез. Точками отмечены осадочные толщи. Цифрами обозначены зоны: 1 – испарения и полного плавления, 2 – частичного плавления и эффективного перехода графита в алмаз, 3 – пластических деформаций, 4 – дробления и трещинообразования, 5 – ненарушенных пород. Стрелки показывают положение радиальных струй выбросов, обогащенных алмазами.

ных и других работ, осуществлявшихся специализированной Полярной экспедицией. Геологические исследования импактной структуры проводились под моим научным руководством. Полученные при этом обширные материалы не были надлежащим образом обобщены и в основ-

ной своей части не опубликованы. Некоторые вопросы оставались недостаточно изученными. Целью работы, основные выводы которой освещены в статье, являлась систематизация различных, преимущественно генетических, аспектов импактной алмазоносности Попигайской астроблемы, дополнительный анализ состава и условий залегания развилки в ней импактитов, реконструкция процессов преобразования углеродсодержащих первичных пород и закономерностей распределения фаз углерода в конечных продуктах такого преобразования². Обобщить все эти данные было необходимо еще и потому, что вопросам алмазоносности кимберлитов и близких к ним пород посвящены без преувеличения десятки тысяч исследований и соответствующих публикаций на многих языках мира. Но впервые открытые на территории России алмазоносные импактиты и особенности их генезиса по существу не были описаны в научной литературе. Следует заметить, что отсутствие или недостаточное распространение современных знаний о заключающих импактные алмазы породах приводит в ряде случаев к появлению умозрительных и противоречивых гипотез об их образовании.

ПОПИГАЙСКИЙ МЕТЕОРИТНЫЙ КРАТЕР

Кратко напомним об основных геологических особенностях Попигайской астроблемы, находящейся на северо-восточном склоне Анабарского кристаллического щита и возникшей 35.7 млн лет тому назад при ударе астероида, имевшего в поперечнике несколько километров. Докембрийские гнейсы и другие метаморфические породы перекрыты здесь километровой толщей песчаников, сланцев, известняков, доломитов и пр., преимущественно палеозойских осадочных пород, полого погружающихся к северо-востоку. Астроблема хорошо видна на космических снимках. Диаметр ее составляет 100 км, а в центральной части находится округлое понижение в рельефе, занятое болотистой тундрой с многочисленными озерами. На полукольцевых грядах в его

² Публикация результатов поддержана грантами РФФИ. Работа издана в форме монографии: Масайтис В.Л. (ред.), Машак М.С., Райхлин А.И., Селивановская Т.В., Шафрановский Г.И. Алмазоносные импактиты Попигайской астроблемы. Спб, 1998. Кроме того, часть полученных данных нашла отражение в статьях, подготовленных совместно с другими исследователями.

западной части, а также на берегах многочисленных рек и ручьев выступают заполняющие древний кратер импактные горные породы и брекчии. Первые образованы полностью или частично продуктами закалки или кристаллизации импактного расплава. Они подразделяются на массивные, напоминающие застывшую лаву тагамиты и сходные по облику с вулканическими туфами зювиты, которые насыщены стекловатыми бомбами и частицами стекла. Те и другие включают обломки разнообразных местных пород и их минералов, а по валовому химическому составу близко соответствуют гнейсам. Импактные же брекчии – это хаотические нагромождения крупных (до нескольких десятков и сотен метров) глыб, обломков различных осадочных и кристаллических (преимущественно гнейсов) пород. Они как бы сцементированы мелкими фрагментами того же материала. Обломки пород и минералов в брекчиях и импактитах обычно несут характерные признаки ударно-волновых преобразований и плавления при высоких температурах, легко выявляемые под микроскопом.

Геологическая съемка, бурение, геофизические исследования показали, что раздробленное гнейсовое дно астроблемы имеет сложный рельеф. Оно частично выступает на поверхность в виде кольцевого поднятия, которое окружает центральную впадину, а само как бы обрамлено кольцевым желобом. Впадина и желоб заполнены импактитами и брекчиями, залегающими в форме чередующихся линзообразных и пластообразных тел. Общая мощность их достигает 1,5–2 км. Во внешней кольцевой зоне вокруг желоба наблюдаются многочисленные разломы, надвиги, мелкие складки пород, постепенно затухающие при удалении от астроблемы. Выбросы из кратера – скопления огромных глыб различных пород и бомб импактного расплава – встречаются за его пределами на расстоянии до 70 км от центра. Концентрически-кольцевое расположение структурных элементов астроблемы сближает ее с многокольцевыми ударными бассейнами на поверхностях других планет.

Главная составная часть зювитов и тагамитов – застывший расплав – имеет общий объем около 1750 км³. Основные массы переплавленного материала находятся в юго-западной части астроблемы, причем распределение в нем импактных алмазов отличается рядом особенностей. Импактиты с повышенными их концентрациями располагаются как бы в виде отдельных лучей, расходящихся из центра астроблемы. Алмазами обогащены верхние и нижние краевые части пластовых тел тагамитов. Оказалось также, что состав импактитов связан с их алмазоносностью рядом закономерных соотношений.

Каким же образом возникло такое специфическое распределение импактитов и заключенных в них алмазов и чем обусловлена связь состава пород с содержанием в них этих минералов?

УДАРНОЕ КРАТЕРООБРАЗОВАНИЕ И ИМПАКТНЫЕ АЛМАЗЫ

Необходимо кратко напомнить о некоторых положениях теории импактного кратерообразования. Они, если опустить некоторые детали, включают следующие быстро сменяющие друг друга стадии:

- контакта и сжатия, в течение которой ударившее космическое тело тормозится в толще горных пород, охваченных, как и это тело, радиально распространяющейся и постепенно затухающей ударной волной. При этом вещество ударника и частично местные породы подвергаются испарению;

- экскавации и выброса преобразованного материала горных пород и возникновения транзитного (переходного) кратера;

- модификации, когда транзитный кратер меняет свои формы в результате восстановления равновесия при движениях дна и бортов и заполняется сдвинутыми и выброшенными массами раздробленного и переплавленного материала.

Возникновение импактитов начинается с плавления пород после прохождения ударной волны и завершается при

Алмазоносный тагамит с многочисленными обломками ударно-преобразованных гнейсов и их минералов. Попигайская астроблема, керн скважины.

охлаждении образованных расплавом (или с его участием) геологических тел. Физико-химические системы, в рамках которых реализуется широкий спектр частных процессов преобразования вещества исходных горных пород (в том числе углеродистого), а также его перемещения при выбросе, осаждения из взрывного облака и охлаждения, в целом являются открытыми. На первых двух стадиях эти процессы характеризуются крайней неравновесностью, резкими кинетическими изменениями, а в первой, кроме того, — быстрым нарастанием энтропии и энтальпии в результате полученного энергетического импульса. На заключительной стадии в связи с охлаждением и частичной кристаллизацией расплава возрастает структурная упорядоченность масс пород, падает их теплосодержание. В рамках такого подхода можно попытаться реконструировать и Попигайское импактное событие.

При прохождении ударной волны в породах возникают приблизительно полусферические концентрические, постепенно переходящие друг в друга зоны испа-

рения, плавления, дробления и трещинообразования. Нижний предел давления твердофазного перехода графита и соответственно положение внешней границы концентрической полусферической зоны частичного плавления, где возможен такой переход и существование алмазов, определяется их первым появлением в ударно-преобразованных графитсодержащих гнейсах. Внутренняя граница этой зоны как бы очерчивается кривой температуры, при которой импактный алмаз еще устойчив и не подвергается быстрой графитизации или окислению. Найденные в импактитах включения гнейсов, где одновременно присутствуют обе фазы углерода — исходные кристаллы графита и возникшие за их счет так называемые параморфозы алмаза (т.е. зерна, имеющие унаследованные от графита кристаллографические формы), — служат своеобразным геобарометром нижнего предела перехода, который осуществлялся в течение долей секунды. Внутренняя структура возникших при этом импактных алмазов отражает динамику твердофазного перехода и обнаруживает чрезвычайно высокую плотность линейно-плоскостных

Импактные брекчии, состоящие из глыб различных осадочных и кристаллических пород и перекрытые останцом пластового тела тагамитов. Попигайская астроблема.

дефектов (до 10^{27} в см^3). Нельзя исключить предположение, что гексагональная высокоплотная фаза (лонсдейлит) не существует в них в виде самостоятельных микрокристаллов, как считалось ранее, а соответствующие рентгенометрические характеристики, указывающие на ее присутствие, — следствие высокой плотности таких дефектов.

Кварц, полевые шпаты и другие минералы гнейсов, о которых идет речь, несут черты преобразований при давлениях не менее 350 кбар, в том числе признаки перекристаллизации. В таких включениях гнейсов алмазы находятся на месте своего возникновения, причем иногда содержание их доходит до тысячи каратов на тонну. Наиболее мелкие их зерна нередко сохраняются даже в шлифах (тонких пластинках породы) и видны под микроскопом. Поскольку алмазы сравнительно быстро выгорают при остающихся после прохождения

Микрофотография ударно-преобразованного гнейса с алмазом около 0.2 мм в поперечнике (в центре). Зерно окружено перекристаллизованным кварцем, полевыми шпатами и другими минералами. Поляризованный свет.

ударной волны высоких температурах 1700–1800°C (подобный расплав возникает при импульсном сжатии свыше 600 кбар), очевидно, что концентрическая зона эффективного перехода и последующего сохранения импактных алмазов заключена между изобарами 600 и 350 кбар, что соответствует ее толщине всего в 2 км. Эта зона как бы наложена на гнейсовый субстрат с неравномерным распределением в нем исходного графита (что характерно для пород Анабарского щита), и повышенные концентрации алмазов возникают как раз там, где первоначально имелись более обильные скопления графитовых чешуек и кристаллов. При полном плавлении гнейсов происходит высвобождение из них алмазов. Последние попадают в расплав, который интенсивно перемешивается во время движения. При экскавации радиальный выброс расплава и обломков из рассматриваемой зоны приводит к появлению «лучей» импактитов, обогащенных алмазами, причем как зювитов, так и тагамитов. Во время выброса расплав и обломки различных пород, в том числе слабо преобразованных ударным сжатием, перемешиваются. Часть расплава разбрызгивается в виде бомб и капель. При этом чем больше фрагментов пород присутствует в зювитах (как говорилось выше, они состоят помимо таких фрагментов из бомб и частиц закаленного расплава), тем меньше в них алмазов. Казалось бы, такая же картина должна наблюдаться и в тагамитах, стекловатая или слабо раскристаллизованная матрица которых обычно насыщена обломками пород и минералов. Однако здесь существенное влияние на концентрацию алмазов опять оказывает их неустойчивость при высоких температурах. Поглощение небольших количеств сравнительно холодного обломочного материала вызывает быстрое уменьшение температур расплава — ниже выгорания или графитизации (при недостатке кислорода), что способствует сохранению в нем алмазов. При этом концентрация их в тагамитах остается такой же, как и в исходном расплаве. Но если расплавом захвачено более

20–25% неалмазоносных обломков, явления разубоживания начинают преобладать и содержание алмазов в образующейся породе в целом падает. Неустойчивостью алмазов при длительно сохраняющихся высоких температурах объясняются и некоторые другие черты их распределения в тагамитах. Так, например, тагамиты, застывшие из относительно более высокотемпературных фракций расплава, беднее алмазами, чем те, которые образовались из более холодных. Центральные части крупных пластовых тел, где наблюдаются петрографические признаки их более длительного охлаждения и более полной раскристаллизации, всегда беднее алмазами, чем верхние и нижние быстро застывающие краевые части. Характерно, что алмазы, которые дольше подвергались воздействию высоких температур в расплаве, несут более ярко выраженные черты интенсивной коррозии и графитизации.

Весьма интересной оказалась выявленная специальным анализом четкая положительная корреляция содержания алмазов в импактитах (в целом отражающая содержание в них углерода) и концентраций фосфора. Учитывая облегченный изотопный состав углерода графита и импактных алмазов, что, как известно, характерно для углерода биогенного происхождения, можно допустить первоначальную связь фосфора и углерода в живом веществе (например, примитивных водорослях), при отмирании вошедшем затем в фоссилизованном виде в состав древнейших осадков. Их последующий региональный метаморфизм в глубинах земной коры около 2.5 млрд лет тому назад и превращение в гнейсы привели к тому, что фосфор и углерод образовали самостоятельные минералы — соответственно апатит и графит. Таким образом, возникновение импактных алмазов было как бы предопределено развитием древнейшей биоты...

А что же произошло с веществом астероида — главного виновника катастрофического события? Уже говорилось о том, что оно подверглось полному

испарению при тепловом взрыве, причем пар и некоторые пылевые частицы в дальнейшем рассеялись в атмосфере и за ее пределами. Вместе с тем, незначительная часть испаренного вещества конденсировалась во взрывном облаке на каплях расплава и холодных частицах, которые затем вошли в состав импактитов. Геохимические исследования показали, что последние захватили до 0.5–4.5% метеоритного вещества, отвечающего по составу обычным хондритам. Неравномерное распределение характерных «метеоритных» элементов — никеля, кобальта, хрома, иридия — в крупных телах тагамитов при их однородном, близком к исходным гнейсам составу указывает на то, что захват этого вещества произошел уже после перемешивания расплава в момент выброса.

ПОДВОДЯ ИТОГИ

Неравномерное распределение алмазоносных импактитов в Попигайской астроблеме, также как и распределение в них импактных алмазов, может рассматриваться как результат влияния ряда первичных и вторичных факторов. К первичным относятся, с одной стороны, непосредственное воздействие космического тела, вызвавшее образование концентрических зон ударных преобразований в массиве кристаллических пород, с другой стороны — наложение таких преобразований на участки пород с неравномерным распределением графита. Косой удар тела (предполагается, что он был направлен с северо-востока на юго-запад) привел к наблюдаемому асимметричному распределению продуктов плавления. Сочетание этих факторов наряду с радиальным выбросом продуктов преобразования углеродсодержащих пород привело к наблюдаемому лучевым неоднородностям в распределении алмазов в импактитах. Вторичные факторы неравномерного охлаждения обусловили различия в содержании алмазов в импактитах с разной термальной историей.

Не следует забывать при этом, что значительное количество преобразованного материала, в том числе алмазосодержащего, при взрыве было вынесено за пределы возникшего гигантского кратера. Часть продуктов дальнего выброса осела на расстоянии двух-трех его радиусов и в дальнейшем, подвергаясь размыву и переотложению, послужила источником образования россыпей импактных алмазов, находимых сейчас в руслах рек прилегающих районов на расстоянии до 100–150 км. Такому же разрушению подвергались и импактиты, залегавшие внутри кратера, что вело к высвобождению импактных алмазов из заключающих их пород и переносу речными водами. При этом алмазы частично окатывались, наиболее хрупкие зерна разрушались. Такие россыпные импактные алмазы иногда ошибочно принимали за поликристаллические типа карбонадо, встречающиеся в россыпях в Центральной Африке и Южной Америке и происхождение которых пока не установлено.

Материал, вынесенный взрывным облаком далеко за пределы возникшего кратера и представленный частицами пыли, был затем рассеян на значительной площади земной поверхности. Интересны находки мелкого ударно-метаморфизованного кварца в тонком прослое глины среди морских осадков эоцена в районе Массиньяно (Италия). Ученые из Германии и США показали, что время образования этого прослоя в точности соответствует времени попигайского события — 35.7 млн лет назад. Не исключено, что в аналогичных прослоях, заключенных в толщах пород соответствующего возраста и отстоящих на многие тысячи километров от кратера, могут быть найдены мельчайшие частицы импактных алмазов. Их легко идентифицировать с попигайскими по характерной, установленной для последних геохимической метке — положительной европиевой аномалии.

Для возникновения импактных алмазов необходимо наличие в месте удара космического тела каких-либо графитсодержащих или углесодержащих пород, а такие породы развиты на

*Интенсивно корродированный
импактный алмаз из зювитов
астроблемы Садбери. Попе-
речник зерна — 0.2 мм.*

земной суше сравнительно широко. Следовательно, вероятность обнаружения этого минерала во многих импактных структурах в разных регионах мира достаточно велика. Наиболее интересна сделанная нами совместно с канадскими исследователями находка подобных импактных алмазов в зювитах одной из древнейших (1850 млн лет) и крупнейших на земной суше (200 км) астроблемы Садбери на Канадском щите. Все это показывает, что алмазоносные импактиты возникали уже на ранних этапах развития земной коры и что их образование повторялось впоследствии в подходящих обстановках неоднократно. Очевидны принципиальные отличия условий образования импактных алмазов от условий образования алмазов, рожденных в мантии Земли и вынесенных кимберлитами к ее поверхности.

* * *

Импактное взаимодействие — один из фундаментальных геологических процессов на твердых планетных телах Солнечной системы. Понимание его роли в породо- и структурообразовании в земной коре, а также его воздействие на глобальные биотические и другие явления пришло в геологию лишь в последней трети XX в. В настоящее время результаты разносторонних исследований импактных структур на Земле и условий их образования интегрированы в общемировую систему естественнонаучных знаний. Важный элемент этих исследований — выяснение условий возникновения алмазоносных импактитов, которые значительно расширяют спектр представлений о минерагенической роли ударных процессов как на Земле, так и на других космических телах.