

## ГИПОТЕЗА УДАРНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ АЛМАЗОВ И КИМБЕРЛИТОВ.

"Итак, поскольку все в мире – причина и следствие, движитель и движимое, непосредственное и опосредованное, поскольку все скреплено естественными и неосязаемыми узами, соединяющими самые далекие и друг с другом несхожие явления, мне представляется невозможным познание частей вне познания целого, равно как познание целого вне досконального познания частей."

Блез Паскаль

"Эта теория ~~не~~ достаточно безумна, чтобы быть верной."

Нильс Бор

### *Лирическое вступление*

*Обсуждая с геологами, непосредственно не связанными по производственной и научной деятельности с алмазной геологией, проблему кимберлитообразования, я столкнулся с удивительно упрощенным пониманием ими этой проблемы, по всей вероятности оставшейся еще со времени их учебы по геологической специальности. Это понимание сводится примерно к следующему. Кимберлиты и алмазы образуются глубоко в Земле, выносятся на поверхность порциями расплава и представлены на поверхности трубками взрыва. И отсюда понятен их закономерный вопрос: чего ты там копаешь и так ведь все ясно. Опровергнуть это заблуждение о казалось бы таком "очевидном" процессе я и ставлю главной своей задачей. В основном все это делается ради молодого поколения геологов, которые еще не отягощены "общепринятыми" догмами и способны смотреть на мир открытыми глазами.*

*Я долго не понимал, почему идет такое явное неприятие этой гипотезы, ведь это пока только гипотеза, для преобразования ее в теорию потребуются годы и труд многих научных коллективов (астрономов, геологов, физиков и др.). Но прочитав книгу С. Куна "Структура научных революций" все для меня встало на свои места. Так происходит во всех науках, а явное неприятие свидетельствует не о слабости гипотезы, а, как это ни парадоксально, о ее силе, потому что здесь затрагиваются интересы целых научных школ и они будут сопротивляться до последнего.*

*В этой работе я попытаюсь показать несостоятельность "общепринятой" модели образования кимберлитов, хотя, до настоящего времени, единой модели образования кимберлитов и алмазов не существует, есть ряд моделей по своему трактующие только отдельные составные части этого процесса.*

*Я никоим образом не хочу умалить заслуги всех без исключения геологов, занимавшихся ранее и занимающихся сейчас алмазами и кимберлитами. Из истории науки видно, что (приближение к правильному пониманию) развитие правильных представлений о причинах и эволюции всех без исключения процессов происходящих во Вселенной (и на Земле в частности) процесс долгий и далеко не прямолинейный.*

*Это вступление также адресовано молодому поколению избравшему целью своей жизни служение геологии, чтобы они знали, что на пути их будущих научных открытий может попасться много подводных камней и даже айсбергов. Но камни можно миновать, если быть внимательным, а айсберги растают со временем сами. Главное - любить свою работу.*

Несмотря на громадный объем накопленного фактического материала, ясность в проблеме происхождения кимберлитов и алмазов до сих пор отсутствует. Это отражается в существовании целого ряда гипотез, различно и нередко альтернативно трактующих принципиальные аспекты процессов природного кимберлитового и алмазообразования. Не лучшим образом обстоит дело и с решением вопроса о механизме формирования самих трубок. Ни одна предложенная к настоящему времени модель не объясняет адекватно все особенности их строения. Многочисленные противоречия между наблюдаемыми фактическими данными и теоретическими построениями позволяют усомниться в реальности образования алмазов в глубинах Земли и поискать другие источники вещества и РТ условий в пределах Солнечной системы. В представленной ниже статье приводится обоснование причинно-следственной связи образования алмазов и всех типов алмазоносных пород в рамках ударного процесса, одного из самых фундаментальных геологических процессов, протекающих в Солнечной системе.

### **КИМБЕРЛИТЫ, МЕТЕОРИТЫ, ИМПАКТИТЫ И АЛМАЗЫ.**

**Кимберлит** представляет собой гибридную ультраосновную горную породу. Для него характерна неравномерно-зернистая структура, обусловленная ксенолитами и мегакристаллами тугоплавких минералов (оливин, пироксен, флогопит, гранат, пикроильменит), включенными в тонкозернистую основную массу низкотемпературных минералов (серпентин, карбонат, хлорит). При этом минералы вкрапленников представлены не кристаллами, как в обычных магматических породах, а округлыми "порфировыми" зернами. А чтобы оплавить эти очень тугоплавкие минералы, да еще при давлениях мантии, требуются температуры более 2000°C. Изучение поверхности зерен этих минералов выявило удивительную особенность: их поверхность практически не отличается от поверхности речной гальки. Особенно интересна так называемая "шагреновая поверхность", характерная для зерен оливина, граната, ильменита, апатита, а также для ксенолитов "мантийных" пород и представляющая типичное коррозионное микропористое новообразование.

Подобные явления возникают при коррозии лопаток турбин, поверхности метеоритов и тектитов, то есть при обработке любого тела раскаленными газовыми струями [27]. Среди редких минералов в кимберлитах обнаружены самородные Ag, Cu, Si, Zn, Sn, Al, Au, Fe, Pb, стистаит, тенит, муассонит, когенит, армоколлит, рингвудит [9]. В кимберлитах не редкость повышенные содержания платины и иридия, достигающие порой промышленных значений для попутной добычи (0.4-0.5 г/т) [28].

Гибридная природа кимберлитов выражается также присутствием в них ксенолитов мантийных пород, представленных ультраосновной и эклогитовой группами. К ультраосновной группе включений относятся оливиниты, дуниты, гарцбургиты, лерцолиты, верлиты и различные моно- и полиминеральные породы, сложенные минералами, аналогичными по составу минералам вкрапленников. К эклогитовой группе подобных включений принадлежат пироксениты, разнообразные эклогиты всех стадий метаморфизма и эклогитоподобные породы, причем эти включения иногда присутствуют в трубках совместно на одних и тех же горизонтах. Содержание их в кимберлитах составляет в среднем около 0.5 об.% [24]. При этом, отмечается исключительное разнообразие пород, слагающих эти ксенолиты. В то же время установлено, что среди ксенолитов мантийных пород нет разновидностей, прямое плавление которых могло бы дать расплав, близкий к кимберлитовому [66]. Многие ксенолиты эклогитов и гранатовых перидотитов несут в себе следы значительных деформаций [63]. Высокобарические минералы находятся в перидотитах, дунитах и эклогитах или в форме фенокристаллов, погруженных в тонкозернистую основную массу или в виде зерен и агрегатов. Для включений этих пород характерно совмещение процессов минералообразования при высоком и низком давлениях, о чем свидетельствуют зональные кристаллы гранатов, биотита, оливина [17], причем в алмазоносных ультраосновных включениях описаны кристаллы оливина как с прямой, так и с обратной зональностью (по отношению Fe/Mg) [38]. Порфиновые структуры и зональность высокобарических минералов в кимберлитах и родственных включениях свидетельствуют о консолидации пород в условиях быстрого охлаждения [17]. В некоторых ксенолитах из кимберлитов трубки Ягерсфонтейн (ЮАР) зафиксированы крупные (1-2 см) гранаты с содержанием  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  1-2 мас.% и многочисленными ламелями клинопироксена (продуктами распада твердого раствора) [42]. Это свидетельствует о формировании граната при давлении 10-13 ГПа, что соответствует глубине около 400 км.

Особой широко распространенной разновидностью кимберлита является автолитовый кимберлит (в лампроитах аналогичные образования называются лапиллиевыми туфами [7]), в котором эллипсоидальные или округлые тела мелкозернистого кимберлита (автолиты) находятся в матрице обломочного кимберлита и который имеет вид псевдоконгломерата, где кимберлит цементируется кимберлитом. Многие автолиты имеют ядра, вокруг которых происходило нарастание мелкозернистого кимберлита. Ядра представляют собой единичные кристаллы или мелкие ксенолиты вмещающих пород диаметром до 10 см. Подобные образования могли сформироваться только в свободном пространстве. Изучение взаимоотношений автолитовых кимберлитовых брекчий и кимберлитовых брекчий с массивной текстурой цемента в трубках сложного строения свидетельствует об отсутствии четких интрузивных контактов. Переходы между разновидностями обычно постепенные [18].

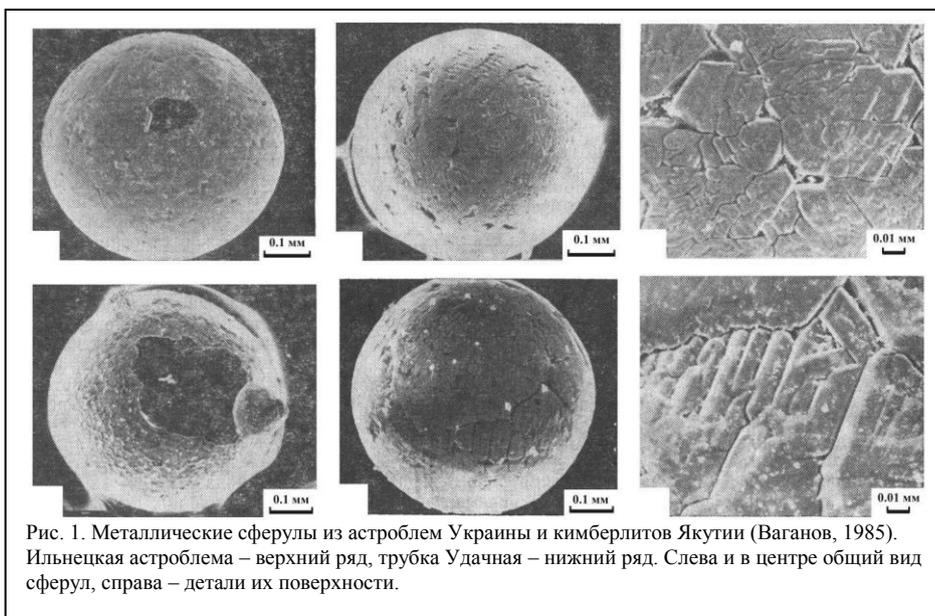


Рис. 1. Металлические сферулы из астроблем Украины и кимберлитов Якутии (Ваганов, 1985). Ильнецкая астроблема – верхний ряд, трубка Удачная – нижний ряд. Слева и в центре общий вид сферул, справа – детали их поверхности.

Очень интересным является наличие в кимберлите (как в древесине, так и на глубоких горизонтах трубок) силикатных и металлических шариков (сферул) капле- и гантелеобразной формы с идеально гладкой, блестящей поверхностью, указывающей на образование их в свободном пространстве (рис. 1, 2).

Размеры их колеблются от сотых долей до 2-3 мм. Окраска – бледно-зеленая, зеленая до черной. Шарики рентгеноаморфны. Их

химический состав характеризуется высоким содержанием  $\text{CaO}$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Состав газовых включений в шариках однообразен и достаточно экзотичен:  $\text{N}_2$  - 57,7-96,9 об.%; углеводороды - 20-25 об.%;  $\text{H}_2$  - 5 об.%;  $\text{CO}_2$  - 10 об.% [18]. В сферических расплавных выделениях из алмазоносных туфов Северного Урала обнаружены карбиды Si, Fe, ферсилит (FeSi), самородные Si, Fe, Al. Встречен также ванадийсодержащий шарик серебристо-белого цвета. Его ядро сложено интерметаллидом состава  $\text{V}_{63}\text{Cu}_{19}\text{Mn}_{16}\text{Fe}_2$ , а кайма - карбидом ванадия. Тугоплавкость ванадиевых соединений свидетельствует о необычайно высоких температурах (1900-2800°C), которые могли

достигаться лишь на фронте ударной волны [32]. Эти закаленные частицы из кимберлитовых трубок Якутии и туфов Урала по ряду общих особенностей, проявляющихся во внешнем облике, внутреннем строении и минеральном составе этих частиц, а также в морфологии и химизме слагающих их минералов, идентичны закаленным частицам пород ударно-взрывных структур. Каймы плавления кварца и рутила в стеклянных сферулах, восстановление магнетита до иоцита, ильменита до ульвошпинели, образование армоколита по рутилу — все это свидетельствует о **сверхперегреве расплава при низких давлениях** (до температур 1850°C и выше). Наличие самородного железа и иоцита в стеклянных сферулах из кимберлитов свидетельствует о формировании их в резко восстановительной обстановке. Такие шарики характерны также для импактитов (Рис. 1,2).

Кимберлитовые трубки на поверхности занимают небольшую площадь - от нескольких квадратных метров до 1,5 квадратных километров. В пределах трубок выделяют три разнородные части - кратерную, диатремовую и корневую. Кратерные части трубок представляют собой раструбы с относительно пологопадающими контактами, заполненные дезинтегрированным материалом вмещающих пород и в небольшом объеме — кимберлитов. Протяженность их на глубину

достигает нескольких сотен метров, форма - обычно округлая и овальная, с изрезанными очертаниями. Диатремовые части трубок имеют форму цилиндра, сужающегося с глубиной. Стенки трубок большей частью гладкие, с продольными бороздами скольжения, обычно без признаков контактовых изменений вмещающих трубку пород (Рис. 3).

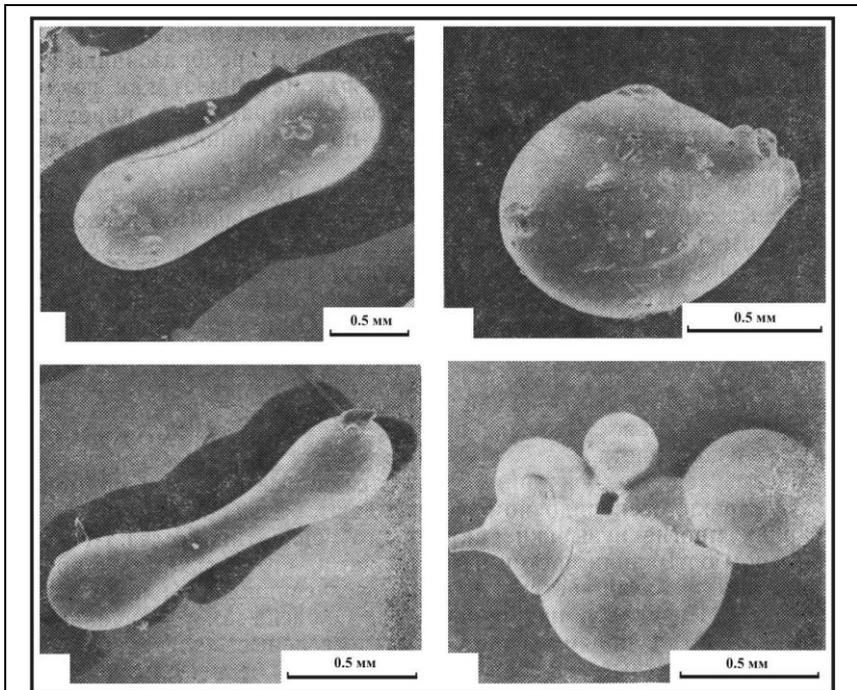


Рис. 2. Стеклянные сферулы из пород Ильнецкой астроблемы (верхний ряд) и кимберлитов трубки Удачная-Западная (нижний ряд) (Ваганов, 1985).

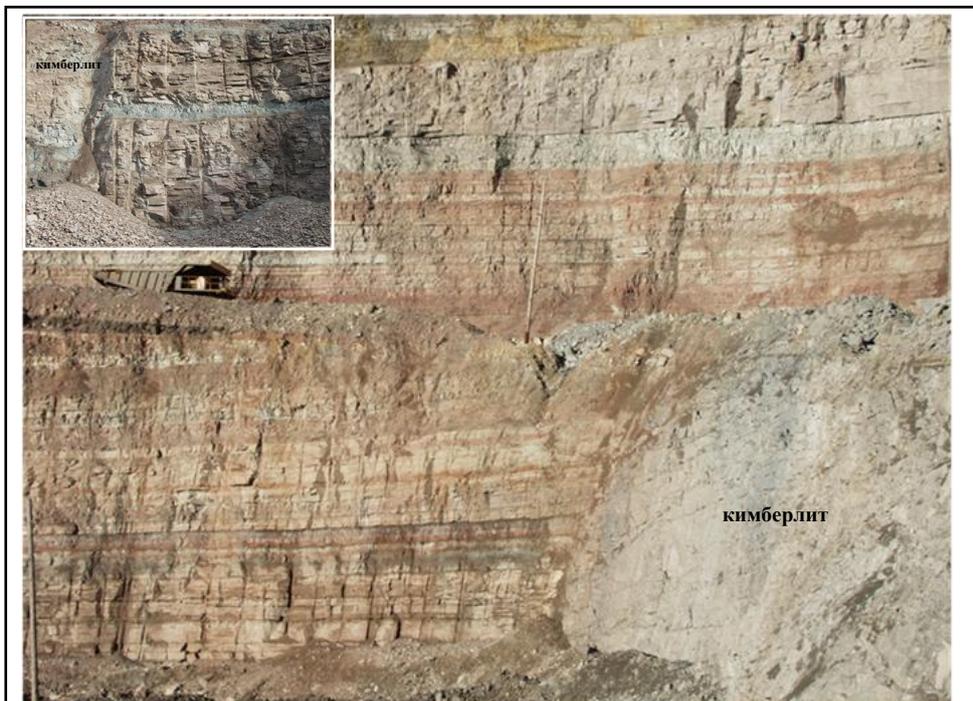


Рис. 3. Контакт кимберлитов с вмещающими породами. (тр. Юбилейная, Республика Саха-Якутия).

Диатремовые части трубок обычно выполнены несколькими разновидностями (“фазами внедрения”) кимберлитовых брекчий (так в трубке Дютойтспен (ЮАР) их выделяют 16). Контакты между разновидностями

иногда резкие, иногда постепенные. В штуфах кимберлитовых брекчий из многих трубок устанавливаются линейные и плоскопараллельные текстуры течения. Существенной составной частью кимберлитовых брекчий являются ксенолиты вмещающих пород (до 80 об.%, в среднем 20 об.%). Их характерными особенностями являются: отсутствие термальных контактовых изменений, иногда гигантские размеры (до 200 м и более – “плавающие рифы”) и нахождение существенно ниже уровня своего первоначального залегания. Так черные сланцы Двайка прорваны трубкой Кимберли на горизонте 15.5 м, а в составе кимберлитовой брекчий они прослежены до глубины 769 м от современной поверхности (трубка Кимберли переходит в дайку на глубине 1073 м). Следует особо отметить, что в лампроитовых трубках Австралии не обнаружено **ни одного** (!?) обломка подстилающих трубки пород [7]. При переходе от диатремовых частей трубок к корневым форма их резко изменяется. В одних случаях она сменяется весьма причудливыми формами, представляющими собой выполнение зон смятия и дробления, в других диатремовые части трубок переходят в дайкоподобные, выклинивающиеся с глубиной. “Подводящие” дайки представлены исключительно массивным кимберлитом, причем никаких “фаз внедрения” и каких либо признаков повторного прохождения вещества в них не фиксируется.

В монографии Дж. Доусона [9] отмечается, что  $\delta D$  для серпентина и флогопита кимберлитовой матрицы варьируют в пределах от  $-89$  до  $-102\%$ , а значения  $\delta^{18}O$  изменяются от  $-1.08$  до  $12.2\%$  по стандарту SMOW. Отсюда делается вывод, что в образование серпентина и флогопита основной массы кимберлитов принимала участие метеорная вода. Изотопный состав углерода  $\delta^{13}C$  карбонатной фазы кимберлитов по породе в целом колеблется в пределах от  $+1$  до  $+2\%$ , а в некоторых случаях и до  $-20$ — $25\%$  по стандарту PDB, тогда как вариации кислорода  $\delta^{18}O$  изменяются от  $+6$  до  $+24$ — $+25\%$  SMOW [9]. Приведенные данные по широким вариациям  $\delta^{13}C$  и  $\delta^{18}O$  в карбонатном веществе кимберлитов также свидетельствуют о гетерогенности источников вещества, вовлеченного в их формирование. В противоположность водороду (и углероду), для кислорода можно достаточно четко определить мантийные отношения его изотопов по анализу свежих базальтов срединно-океанских хребтов. Значение  $\delta^{18}O$  в таких базальтах приблизительно равно  $+5.5\%$  по шкале SMOW [68]. Следовательно, все кимберлиты, как и прочие метаморфические и осадочные породы, существенно обогащены тяжелым изотопом кислорода. Предположить столь значительное изотопное фракционирование вещества в мантии очень трудно (а если говорить реально, то просто невозможно). Об этом свидетельствует и очень узкий спектр изменений  $\delta^{18}O$  (от  $+5$  до  $+7\%$ ) у неконтаминированных мантийных (и лунных) пород и отсутствие в кимберлитах комплементарных минералов, столь же обедненных изотопом  $^{18}O$ .

Сближенные группы трубок и даек условно объединяют в кимберлитовые поля. Попытки привлечь для оконтуривания кимберлитовых полей разрывные нарушения в кристаллическом фундаменте не увенчались успехом. Более того, на многих примерах было показано отсутствие причинной и пространственной связи в размещении кимберлитовых тел и разрывных дислокаций, выделяемых по геофизическим данным в породах кристаллического фундамента платформ [22,23].

**Алмаз** - чрезвычайно рассеянный минерал, наблюдаемый в виде кристаллов и трещиноватых обломков в некоторых кимберлитах. Кристаллы алмаза содержат включения, которые могут пролить свет на его генезис. Существует группа “центральных” включений, которые ни по составу, ни по форме не имеют аналогии с сингенетическими включениями в алмазах. Обычно это микровключения без кристаллографической огранки. Часть из них относится к рудным минералам (тэнит, когенит, углеродистое железо, вюстит, монокристаллический графит и сульфиды), другие предположительно отнесены к классу карбонатов [2]. Особый интерес представляет широкая распространенность графита в качестве центральных включений. Установлены монокристаллическая и двумерно упорядоченная модификации этого минерала [2]. Двумерно упорядоченный графит встречен в центральной зоне алмаза из трубки им. XXIII съезда КПСС в ассоциации с когенитом и железом. Внешняя форма включений графита и разобщенность полей термодинамической устойчивости графита и алмаза свидетельствуют о том, что графит является протогенетическим включением в монокристаллах алмаза. В промежуточных и периферийных областях монокристаллов алмаза монокристаллический графит пока не установлен.

Некоторые сингенетические включения оливина обнаруживают признаки плавления, что указывает на образование алмаза в области высокого давления и температуры, превышающие значения, характерные для стабильного состояния существовавшего ранее оливина. В ряде случаев химизм минералов, включенных в алмаз, указывает на происхождение в условиях, отличных от обычных условий Земли. Содержание хрома в оливинах выше, чем в оливинах, встреченных в собственно кимберлите. Хромовые шпинели богаче хромом, чем обычный хромит, и напоминают в этом отношении хромит, присутствующий в метеоритах [48]. Очень часто в алмазах наблюдаются включения коэсита. Известны единичные находки магнезиовюститита и феррипериклаза из кимберлитовых трубок Слоан и Коффифонтейн, а также муассонита в алмазе из кимберлитов Монастери [50]. В алмазах трубки Монастери обнаружены также включения мейджоритового граната, который, согласно экспериментальным данным, может формироваться при давлении 13-16 ГПа (что соответствует интервалу глубин 480-650 км) [49]. Также представляет интерес присутствие среди включений в алмазах [11] и в межзерновом пространстве эклогитовых ксенолитов [41] кристаллических агрегатов моносulfидного твердого раствора и встречающиеся в природных алмазах включения самородного железа с примесью никеля [29]. В скрытокристаллической массе поликристаллического агрегата алмаза из кимберлитовой трубки “Удачная” массой 1.3 карата, состоящего из основной скрытокристаллической массы темно-серого цвета близкой по структуре к карбонадо и отдельных кристаллов алмаза размером до 1.5 мм,

имеющих октаэдрический габитус, методом аналитической просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии были выявлены включения самородных металлов - Fe, Cr, Ni, Cu, Ta и их сплавов Fe-Ni и Fe-Cr, пирита, вюрцита, хромшпинелида, магнетита и хлорида таллия. Особенный интерес представляют выявленные в этом образце включения лонсдейлита. Как свидетельствует анализ электронограмм, лонсдейлит образует тонкие прослойки в алмазной матрице [30]. Включения самородных металлов и сульфидов можно отнести к парагенезису метеоритов, который А. Шоджи [57] предложил выделять отдельно среди парагенезисов включений в монокристаллах алмаза. Интересно, что химический состав самородного железа из ксенолитов эклогитов и алмазов не отличается. Не фиксируется также никакого различия в составе самородного железа из алмазов эклогитового и ультраосновного парагенезиса, что, с позиций глубинных гипотез, оставляет неопределенность в его генезисе [2]. Мелтон и Джардини [45, 46] в составе газообразных включений в алмазах Африки, Арканзаса и Бразилии определили азот, воду, водород, двуокись углерода, аргон, этилен, этиловый спирт, бутан, кислород.

Обнаружение в одних и тех же алмазных эклогитах из кимберлитовых трубок крупных октаэдров, сростков и двойников октаэдров, с одной стороны, и мелких разноокрашенных кубов, с другой стороны, свидетельствует о том, что алмазы в эклогитах, также как и алмазы в кимберлитах, образуются в достаточно широком P-T диапазоне [67], что невозможно реализовать в мантии.

В последние годы внимание исследователей все больше привлекают вопросы, связанные с флюидным режимом среды кристаллизации алмаза. Но парадокс заключается в том, что до настоящего времени достоверные факты обнаружения флюидных включений в алмазах неизвестны.

Исследование включений в алмазе показывает их необычный состав, выражающийся в присутствии двух разных полиморфных модификаций  $\text{SiO}_2$  (коэсит + кварц) и  $\text{TiO}_2$  (рутил + анатаз) во включениях, а также микрослоя разупорядоченного графита на их границе с алмазом-хозяином. Для большинства включений характерны неоднородный состав и наличие необычных примесей. Так, в омфациите обнаружена устойчивая примесь фосфора, а в коэсите – окиси титана. Кроме того, обращает на себя внимание непостоянство состава, а также присутствие хлора, и, возможно, других летучих в K-Al-Si-фазах. Наиболее вероятным объяснением совместного нахождения разных полиморфных модификаций  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$  и углерода может быть достаточно резкая смена давления или температуры, которую претерпел алмаз в постростовый период [2].

Анализ особенностей внешнего и внутреннего строения октаэдрических кристаллов природного алмаза, характера поверхностей соприкосновения с включениями и вмещающими минералами в свете современных представлений о механизме зарождения и роста кристаллов свидетельствует, что алмаз и сингенетические включения в нем относятся к самым первым кристаллизующимся фазам. Из этого следует единственно возможный вывод, что рост октаэдрических кристаллов алмаза происходит по механизму послыйного роста в свободном пространстве, в условиях равномерного всестороннего питания. Это осуществимо лишь в том случае, если алмаз и парагенетические минералы кристаллизовались во взвешенном состоянии в газовой или жидкой среде [2]. Однако, образование алмазов в жидкой среде плохо согласуется с результатами геохимического изучения минералов алмазного парагенезиса [39, 56]. Суть этого противоречия состоит в невозможности кристаллизации из силикатных расплавов минералов с таким высоким содержанием примесей (например K, Rb, Sr, Pb и U в омфациите из алмазов).

Не только включения, но морфология и внутренние дефекты кристаллов самого алмаза, свидетельствуют об их весьма сложной истории роста и, возможно, дают ключ к решению проблемы их происхождения. В результате детального рассмотрения этих особенностей Франк [37] вывел следующее: "1. Большинство алмазов, если они не содержат значительного количества азота, в некоторой степени претерпели пластические деформации, результатом которых являются серии дислокаций по плоскостям скольжения (111), выявляющиеся по наличию двупреломления, рентгенотопографическим способом или под электронным микроскопом. Это означает, что алмазы подвергались воздействию сильных сдвиговых напряжений при высокой температуре (вероятно, более 2000°K). Другие кристаллы с незначительным двупреломлением также насыщены дислокациями, но в этом случае последние полигонизированы, что указывает на постгенетические высокотемпературные деформации.

2. Большинство алмазов во время роста испытывало многочисленные, часто резкие изменения химического состава среды. Наиболее легко выявляемыми свидетельствами этого являются слои роста с широкими вариациями содержания азота.

3. В процессе роста алмаза выделяются две стадии роста и одна стадия растворения:

ранняя, в течение которой форма роста была округлой или бугристо-округлой, но присутствовали и плохо развитые плоские грани октаэдра. В некоторых алмазах эта стадия отсутствует;

стадия роста алмазов октаэдрического габитуса;

стадия растворения, варьирующего по интенсивности.

4. Азот обычно присутствует в пределах очень тонких плейтлетсов причем между обогащенными плейтлетсами и лишенными их участками наблюдаются резкие границы. Представляется, что азот должен был входить в алмаз во время роста в условиях температуры, при которой диффузия азота незначительна, и что впоследствии азот диффундировал с образованием плейтлетсов. Диффузия должна была проявляться в результате либо в изотермических условиях, либо в условиях значительного повышения температуры после роста; турбулентный рост алмазов свидетельствует в пользу второго объяснения."

Модельный возраст кристаллов алмаза из различных регионов мира полученный Sm-Nd методом по субкальциевым пиропам-уэникам примерно одинаков и оценивается в 3,1-3,4 млрд. лет (Табл. 1). Из этих данных следует, что процесс глобального алмазообразования был одноактным и никак не связанным с образованием самих кимберлитов.

Таблица 1

**Радиологический возраст алмазов из кимберлитов**

Местонахождение кристаллов алмаза.	Возраст алмазов (млрд лет)	Возраст кимберлитов (млн лет)	Литературный источник
Тр. Кимберли (ЮАР)	3,4	90	55
Тр. Финш (ЮАР)	3,2-3,3	90	55
Тр. Удачная (Якутия, Россия)	3,1-3,4	360	54
Арканзас (США)	3,1	100	47

Примечание. Эти данные, по-видимому, отражают возраст образования алмазов с изотопным составом  $\delta^{13}\text{C}$  от -1,9 до -9,7 ‰.

Изотопный состав углерода алмазов имеет широкий диапазон  $\delta^{13}\text{C}$  от +2.7 до -34‰, однако абсолютное большинство алмазов кимберлитовых трубок по вариациям  $\delta^{13}\text{C}$  попадает в интервал между -10 и -2‰ [69, 70]. В работе [72] отмечается, что в большинстве случаев такие вариации меняются от -5 до -9‰ с предельными значениями от -0.5 до -31.9‰. В некоторых кимберлитовых трубках встречаются алмазы с аномально высокой долей легких изотопов углерода, причем таких алмазов с  $-10\% > \delta^{13}\text{C} > -22\%$  около 37% [71]. Следует заметить, что узкий диапазон значений  $\delta^{13}\text{C}$  характерен не только для алмазов из кимберлитов, но также для алмазов из аллювиальных россыпей Заира, западной Африки, Венесуэлы, Бразилии, Индии, Калимантана и Урала, коренные источники которых пока не известны, а также для алмазов из метеоритов. Тем не менее, имеются некоторые исключения. Алмазы из Эбеляхской аллювиальной россыпи обладают значениями  $\delta^{13}\text{C}$  от -11,5 до -22,2 ‰. Такие же значения характерны для апографитовых импактных и "метаморфогенных" алмазов. Типичные карбонадо бразильского типа относятся к изотопически аномально легким алмазам ( $\delta^{13}\text{C}$  от -21 до -31‰). В этот же интервал попадают и апоугольные импактные алмазы. Помимо этого известны алмазы с резко аномально легкими значениями изотопного состава ( $\delta^{13}\text{C}$  менее -31‰), к которым сейчас относятся четыре алмаза из трубки Мир, три из них представлены серым бортом [73]. Изотопически тяжелые алмазы ( $\delta^{13}\text{C}$  более +1‰) представлены в настоящее время исключительно алмазами из россыпей юго-восточной Австралии, источники которых неизвестны.

Из имеющихся в литературе сведений по изотопной геохимии алмазов большой интерес представляют локальные исследования изотопного состава углерода отдельных зон роста монокристаллов. В индивидуальных монокристаллах алмаза происходит закономерное и постепенное увеличение (от центра к периферии) содержания  $\delta^{13}\text{C}$  [59]. Единственно возможный механизм направленной смены изотопного состава углерода – это образование монокристаллов алмаза в едином непрерывном процессе, подчиняющемся одинаковым закономерностям развития.

Исследование изотопного состава алмазов и сингенетических им сульфидов в целом показывает их полигенность, принадлежность к разным породам, имеющим свою собственную историю развития [2].

Особый интерес представляют данные об изотопном составе гелия в природных алмазах из кимберлитов Южной Африки, лампроитов Австралии, а также в аллювиальных алмазах России, Юго-Западной и Центральной Африки, Бразилии и Северной Америки, полученные М. Озимой с соавторами [51-53]. Величины измеренных отношений изотопов гелия в алмазах колеблются от типично радиогенных до величин, превышающих планетарное значение (характерное для первичного гелия Солнечной системы) и близких к составу солнечного ветра  $^3\text{He}/^4\text{He} \sim 4 \times 10^{-4}$  и даже выше [60], что свидетельствует о присутствии в них космогенной составляющей [43].

Среди падающего на Землю метеоритного вещества по количеству падений примерно 92% составляют каменные метеориты, 6% железные и 2% железо-каменные.

**Каменные метеориты** по составу близки к ультраосновным и основным земным горным породам. Углистые и обыкновенные хондриты состоят из высокотемпературных составляющих, представленных непереплавленными агрегатами, хондрами, ксенолитами, кристаллами и их обломками, заключенными в тонкозернистую матрицу. Ахондриты представляют собой полнокристаллические, часто брекчированные, породы (Рис. 4). Наиболее распространенным минералом метеоритов является оливин, причем часто для его кристаллов характерна зональность (как прямая, так и обратная) [8]. В качестве второстепенных и аксессуарных минералов наиболее часто встречаются хромит, шпинель, перовскит, диопсид, Ca-Al силикатные стекла, никелистое железо, троилит, тэнит, когенит, пентландит и др. В матрице в значительных количествах присутствуют монтмориллонит, септехлорит, кальцит, магнетит, гипс. Углерод в метеоритах представлен в виде: сложных органических соединений, углеводов, аморфного и тонкодисперсного углерода, графита и его разновидности - клифтонита. Характерное свойство этого графита – его химическая чистота.

Исследованиями электронным микронзондом в графите из энстатитового хондрита обнаружено 100% С [35]. Как спутник метеоритных алмазов он встречен в неогеновых алмазоносных титановых россыпях Русской платформы [15].

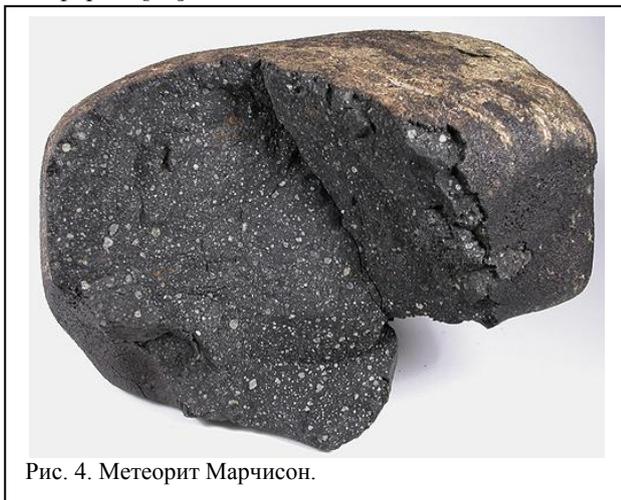


Рис. 4. Метеорит Марчисон.

В большинстве метеоритов проявлены ударные эффекты: от дробления и брекчирования до сильного потемнения, перекристаллизации и плавления [8]. К этому можно добавить находки в метеоритах высокобарических модификаций углерода – алмаза, лонсдейлита, чаюита и других минералов ударного происхождения, таких как муассанит, рингвудит, мейджорит. Данные Rb-Sr, Sm-Nd и Pb-Pb методов определения возраста дифференцированных метеоритов свидетельствуют, что они кристаллизовались 4.54 млрд. лет назад. Более низкие значения Rb-Sr (внутренняя изохрона) возрастов свидетельствуют об ударной переработке вещества этих метеоритов не позднее 1.5 млрд. лет после его образования [8].

**Алмазы** найдены в нескольких железных метеоритах и большинстве уреилитов. Уреилиты (около 40 находок весом от 25 г до 11 кг [4]) представляют собой интенсивно ударноизмененные ахондритовые брекчии, состоящие из оливин-клинопироксеновых агрегатов и углистой матрицы. Оливин, наиболее распространенный минерал уреилитов, необычен и содержит кальций (0.26-0.42% CaO) и хром (0.6-0.9% Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Высокое содержание кальция свидетельствует о быстром охлаждении от высоких температур. Высокое содержание хрома указывает на условия образования, при которых большая часть этого элемента была восстановлена до Cr<sup>2+</sup>, а особая Fe-Mg зональность свидетельствует о дальнейшем восстановлении, которым сопровождалось внедрение матричного материала и ударный метаморфизм. Матрица уреилитов необыкновенно сложна. Кроме преобладающих полиморфных модификаций углерода, самородного железа и троилита, она содержит хромит и много акцессорных минералов, причем рудные минералы представлены в виде сферул. Очевидно, что в истории уреилитов было несколько событий: 1) образование перидотитоподобной силикатной ассоциации в результате фракционной кристаллизации или как твердого остатка при частичном плавлении; 2) смешение с веществом, богатым углеродом; 3) одновременное со смешением или последующее ударное взаимодействие [8]. Алмазы в уреилитах представлены несколькими разновидностями (I, III, V?, VII?, IX, X?, XI [15]), однако наиболее распространены агрегаты с поликристаллическим строением. Преобладающий размер агрегатов не превышает 1 мм. Редко в виде примеси присутствует лонсдейлит. По рентгенометрической характеристике алмазы метеоритов сходны с земными природными и синтетическими алмазами [3]. Они также содержат примесный азот, входящий в состав тех или иных центров люминесценции [19]. В микроалмазах из уреилитов присутствуют включения никелистого железа, троилита и хромита [3]. Содержание углерода в уреилитах составляет от 0.22 до 6.4 % [4], а содержание алмазов достигает, а иногда и превосходит, 1% общей массы метеорита, что на несколько порядков выше, чем в самых богатых алмазами кимберлитах. Изотопный состав углерода алмазов уреилитов ( $\delta^{13}\text{C}$  -5.7 ‰) соответствует изотопному составу исходного углеродистого вещества ( $\delta^{13}\text{C}$  от -0.7 до -11.1 ‰) [4, 19] и аналогичен изотопному составу углерода алмазов из кимберлитов.

В результате ударов метеороидов на земной поверхности образуются кратеры (астроблемы), заполненные плохо сортированным и интенсивно перемешанным дробленным и плавленым веществом земных пород и, в меньшей степени, метеороида - **импактитами**. К настоящему времени на Земле обнаружено более 200 ударных структур диаметром до 335 км. Падение крупных метеороидов является единственно известным природным процессом, при котором может проявиться ударный метаморфизм, характеризующийся мгновенностью проявления, высоким пиковым давлением (от 10 до 1000 ГПа) и остаточной температурой (свыше 1500°C). При ударном метаморфизме возникают высокобарические фазы ряда соединений (коэсит, стишовит, алмаз, муассонит, мейджорит, рингвудит, чаюит и др.), происходит дробление минералов, разрушение их кристаллических решеток, перекристаллизация и плавление минералов и горных пород. Скорость роста кристаллов при взрыве может достигать 50 м/сек [6]. По условиям формирования импактиты делятся на пять фаций: цокольная, донных потоков, аэродинамическая возвращенная, аэродинамическая выброшенная и тектиты [31]. Фация донных потоков содержит аллогенные брекчии различной размерности, расплавные породы (тагамиты) и смешанные (зювиты) (Рис. 5). Они образуют сложную систему протяженных линзовидных тел, местами расщепляющихся и выклинивающихся. Зювиты представляют собой литифицированные брекчии, состоящие из различной величины обломков полиминерального импактного стекла и фрагментов пород, сцементированных тем же тонкораздробленным материалом. По ряду литологических и петрографических признаков: соотношению и составу витрокластов, литокластов, grano- и кристаллокластов, а также по их гранулометрии, агрегатному состоянию и характеру цементации и пр., в пределах астроблем выделяется более 10 их разновидностей. Пластовые тела тагамитов иногда переходят в субвертикальные тела. Контакты между тагамитами и зювитами могут быть как резкими (хотя и извилистыми,

неровными), так и с постепенными переходами, иногда отмечаются небольшие апофизы одних в другие. В отдельных телах наблюдаются своеобразные эвтакситы, где породы одной разновидности включены в другую. Часто наблюдаются крупные глыбы (плавающие рифы), достигающие в поперечнике десятков и даже первых сотен метров, которые как бы “плавают” в массе брекчий меньшей размерности. В некоторых зювитах и тагамитах разных астроблем часто наблюдается своеобразная автолитовая текстура. Автолиты (аккреционные лапилли) представляют собой округлые образования концентрически зонального строения диаметром от 1-2 до 10-15 см, составляющие до 20-30 % объема породы. Они состоят из обломков минералов кристаллических и осадочных пород и стекол алевритовой, пелитовой и псаммитовой размерности, сцементированных этим же материалом, причем в центре автолитов всегда обнаруживаются ксенообломки [20, 62]. В составе обломочного материала присутствуют породы, характеризующие все известные в окружении импактного кратера разновозрастные образования.



Рис. 5. Зювит из астроблемы Кара, Полярный Урал.  
(обр. № GGM-0736-32/GR-06265, Музей им. Вернадского, Москва)

Общей особенностью для всего разнообразия аллогенных пород являются сложность контактовых взаимоотношений, наличие взаимных включений и пересечений, “горячий” характер контактового взаимодействия, свидетельствующий о консолидации этих пород в высокотемпературных условиях. Напротив, породы аэродинамических фаций и тектиты отличаются отложением уже после остеклования и существенного охлаждения расплава, которые происходят в процессе транспортировки фрагментов пород мишени и расплава по баллистическим траекториям. На это указывают “холодные” контакты расплавных и обломочных образований, аэродинамическая скульптура на поверхности сложенных стеклом бомб и лапилли. Помимо покровов, тагамиты образуют различные инъекционные (интрузивные) субвертикальные и крутопадающие тела (жилы, дайки, силлы), прорывающие породы основания астроблем и зювитовую толщу. Мощность даек и жил колеблется от 30-40 см до 30-50 м, длина по простиранию – от первых сотен метров до 3-5 км [20, 62]. Трубки, состоящие из брекчий (диатремы), именуются в сильно эродированной астроблеме Уэллс-Крик (США) диаметром 14 км [61]. В зювитах Ильинецкой астроблемы (Украина) обнаружены зерна пироба и обломки эклогитоподобных пород, источники которых неизвестны в этом районе [62].

Одним из характерных минералогических признаков пород ударно-взрывных структур является ассоциация минералов, образующих своеобразные закаленные металлические, полиминеральные и стеклянные частицы (Рис. 2а-е, 3а,б). Они встречаются в основном в зювитах и, реже, в тагамитах, а также образуют обширные ореолы рассеяния в осадочных породах вблизи ударных кратеров [62, 75]. Аналогичные частицы обнаружены в составе лунного реголита [74], в кимберлитовых трубках Якутии [18] (Рис. 2ж-и, 3в,г), алмазоносных туффизитах Урала [32] и алмазоносных метаморфических породах Казахстана [12]. Среди ассоциации разнообразных закаленных частиц выделяются следующие типы [62]: магнитные сферулы и пластинки, сложенные самородным железом ( $\alpha$ -Fe), иоцитом, магнетитом и гематитом; слабомагнитные черные непрозрачные шлаковидные частицы, размером от 0,5 до 3 мм, представленные стеклом, содержащим скелетные кристаллы и дендриты армоколита, ильменита, иоцита, шпинелидов и шаровидные выделения самородного железа; немагнитные прозрачные сферулы, представленные правильными шариками и частицами каплеобразной, гроздевидной и более сложной формы размером до 1 мм и состоящие из рентгеноаморфного гомогенного стекла различной окраски, изредка с включениями рудных минералов. Кроме того, встречаются все переходные разновидности, как по морфологии, так и по минеральному составу.

Стекла представляют собой рентгеноаморфный затвердевший расплав, из которого кристаллизовались рудные минералы. Кристаллизации силикатов препятствовала, очевидно, закалка. Она же обусловила скелетный и дендритный рост кристаллов рудных минералов и способствовала сохранности метастабильных фаз. Стекла не соответствуют по составу какой-либо породе и не рассчитываются на нормативные компоненты. Многие стекла содержат округлые пузырьки, свидетельствующие о присутствии летучих фаз во время образования и остывания частиц и о низких давлениях. Газы, выполняющие пузырьки, характеризуются экстремальной сухостью. Никаких следов девитрификации или вторичных химических изменений стекол, а также включений самородного железа в стеклах не обнаружено. Минералы, содержащие  $H_2O$  или  $OH$  - отсутствуют.

Совместное присутствие в одной и той же закаленной частице самородного железа и магнетита, иоцита и гематита и т. д., неоднородность состава минералов и одновременное наличие частиц с разной степенью окисленности свидетельствуют о кристаллизации минералов в неравновесных условиях. При этом параметры

среды минералообразования изменялись быстрее, чем шла кристаллизация. Армоколлит кристаллизовался совместно с самородным железом. В нем практически отсутствует  $\text{Fe}^{3+}$ . Межплоскостные расстояния армоколлита близки к таковым его синтетических и лунных аналогов. Самородное железо, очевидно, выделялось из расплава при высокотемпературном восстановлении  $\text{FeO}$ . Этим объясняется довольно высокая степень чистоты самородного железа. Ильмениты по составу не имеют полных аналогов среди ильменитов земных пород. Повышенная магнизиальность сближает их с пикроильменитами, а высокая титанистость — с пикроильменитами-сростками с алмазами из кимберлитов и с лунными ильменитами.

Наличие признаков плавления ксеногенных зерен рутила и других минералов в шлаковидных частицах позволяет предполагать существование температур во время формирования частиц, превышающих  $1850\text{ }^\circ\text{C}$ . Скелетный и дендритный рост кристаллов рудных минералов в этих частицах, аномальные оптические свойства магнетита и иоцита, отсутствие силикатов в стеклах и другие особенности указывают на высокую скорость остывания (закалывания) частиц — капле расплава, составляющую по предварительным оценкам от нескольких десятков до нескольких сотен градусов в час. Благоприятные для этого условия создаются в природе только при падении метеоритов [74, 75].

Содержание Ni, Co, Cr в импактитах в 1,5-3 раза а Ir на порядок выше, чем фоновые содержания вмещающих кратер пород.

Тектиты - стеклянные тела зеленой, редко черной окраски, разнообразной формы и размеров, образующие поля рассеяния. Они рентгеноаморфны, имеют нулевую интенсивность намагничивания и характеризуются высоким содержанием  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$  и  $\text{CaO}$ . В Южной Африке и Западной Австралии обнаружены залежи силикатных сферул песчаной размерности мощностью от 30 см до 2 м в архейских зеленокаменных поясах, возраст которых от 3,2 до 3,5 млрд. лет [44]. С этими залежами, простирающимися почти на 100 км, связано повышенное содержание иридия, и, кроме того, в них видны следы действия ударных волн. Эта находка является первым прямым доказательством усиленной метеоритной бомбардировки Земли в этот период ее истории.

**Алмазы в импактитах** из ряда астроблем возникли либо за счет графита [20], либо за счет угольного вещества высокой степени углеродизации [10]. Изотопный состав углерода апографитовых ( $\delta^{13}\text{C}$  от  $-9.9$  до  $-17.5$  ‰) и апоугольных ( $\delta^{13}\text{C}$  от  $-22.8$  до  $-24.9$  ‰) алмазов идентичен изотопному составу исходного графита ( $\delta^{13}\text{C}$  от  $-12.0$  до  $-17.3$  ‰) и угольного вещества ( $\delta^{13}\text{C}$  от  $-22.3$  до  $-24.6$  ‰) [19]. Параморфозы алмаза по графиту сложены в основном микрокристаллитами кубической фазы алмаза размером 0.01-1 мкм (до 10), присутствует также гексагональная фаза — лонсдейлит, графит. Однако, в породах Попигайского кратера широко представлены и чисто кубические алмазы [36]. Им присущи четыре особенности: 1. Отсутствие гнездообразных включений лонсдейлита в агрегатах; 2. Внешние признаки роста (октаэдры, кубооктаэдры) со строго параллельной ориентацией; 3. Упорядоченные положения атомов азота в структуре; 4. В отличие от других разновидностей ударно-генерированных алмазов, кубические имеют регулярные кристаллографические фигуры естественного травления. Алмазы, возникшие за счет угольного вещества, также состоят из кубической и гексагональной фаз, однако последняя встречается в них значительно реже. Унаследованность проявляется и в химическом составе апоугольных агрегатов, о чем свидетельствует обнаружение таких элементов исходного углеродистого вещества, как H, N, S, P. В этой связи намечается определенная аналогия с поведением редких газов в углеродистом веществе уреилитов, преобразованном в алмаз. Существует два природных механизма перехода углеродистого вещества в гипербарические фазы: диффузионным путем и путем твердофазного превращения. Возникающие при твердофазном превращении за счет первичных кристаллов графита параморфозы алмаза и лонсдейлита не являются кристаллами. Однако, в особых условиях (при увеличении продолжительности процесса) осуществляется и диффузионный рост кристаллов алмаза (октаэдров, кубов, кубооктаэдров), эпитаксиально нарастающих на алмаз-лонсдейлитовую матрицу [14]. Широко распространенные в россыпях, не имеющих коренных источников алмаза, карбонадо, которые встречаются и в кимберлитах [1, 30, 40], в последнее время также связывают с импактным метаморфизмом [58]. В пользу этого свидетельствует условность разделения алмазов X (карбонадо) и XI (якутит) разновидностей, между которыми существуют непрерывные переходы [25], а также сходство поверхности карбонадо с поверхностью метеоритов [33]. Импактные алмазы возникают в кратерах разного возраста, разного диаметра и в различных геологических обстановках, в удаленных друг от друга регионах. Все это свидетельствует о принципиальном геологическом значении процессов трансформации углеродистого вещества горных пород в алмаз при импактном кратерообразовании [20].

### ***ПРОЦЕСС ОБРАЗОВАНИЯ АЛМАЗОВ И КИМБЕРЛИТОВ.***

Анализ вышеперечисленной информации позволяет предположить, что около 3,1-3,4 млрд. лет назад в пределах Солнечной системы произошла грандиозная космическая катастрофа - десятая планета системы - Фазтон столкнулся с гигантской галактической кометой. Это могло произойти в один из коротких ( $\sim 3 \pm 1$  млн. лет) периодов попадания Солнца в струйные потоки Галактики, которые повторяются каждые 20-37 млн. лет. По-видимому, во время этого столкновения и последовавшего за ним взрыва и произошло **образование основной массы алмазов**, которые в настоящее время находят в метеоритах и кимберлитах (Рис. 6).

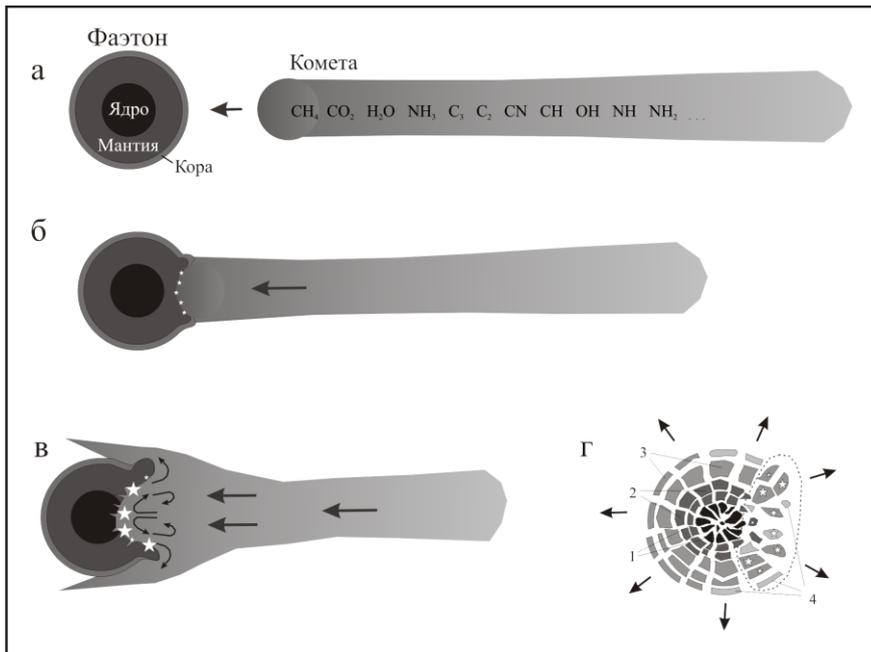


Рис. 6. Схематическая иллюстрация столкновения Фэтона с кометой.

а - сближение кометы и Фэтона; б - столкновение космических тел, зарождение и начало роста кристаллов алмаза (1-я стадия роста кристаллов алмаза по Франку); в - турбулентный рост кристаллов алмаза за счет движущегося с прежней скоростью вещества хвоста кометы (2-я стадия роста кристаллов алмаза по Франку); г - взрыв Фэтона и образование железных (1), железо-каменных (2), каменных (3) и углистых (4) метеороидов (пунктиром показана область распространения метеороидов с алмазами).

источник углерода для образования углистых хондритов, уреилитов и алмазов, а также источник азота в их кристаллической решетке и состав газовых включений. Длительность процесса ударного столкновения даже крупных метеороидов с Землей составляет от долей секунд до нескольких секунд. За это время могут образоваться только мелкие кристаллы размером до 1 мм. Другое дело если с планетой сталкивается комета. Масса и плотность ядра комет незначительна, а длина хвоста комет достигает многих сотен миллионов километров. И при столкновении планеты с кометой, даже учитывая их огромные скорости (от 21 до 78 км/сек), процесс ударного столкновения, взрыва и распада планеты может длиться в течение нескольких суток, а за это время, принимая во внимание его масштабы, могли вырасти кристаллы значительно больше Куллинана (3106 карат).

При таком сложном, многостадийном процессе образования вполне объяснимы зональность и сложное внутреннее строение, большое разнообразие морфологических и кристаллографических форм, размеров, цвета кристаллов алмаза, а также состав и морфология твердых включений, изотопный состав гелия и многое другое. Состав газовых включений в алмазах не характерен для мантии Земли, что признают сами авторы мантийной гипотезы образования кимберлитов. Дж. Доусон в своей работе [9] пишет: "Азот концентрируется в виде тончайших пластин и в одиночных центрах внутри алмаза, причем это единственно известное в настоящее время местонахождение азота в верхней мантии. Если в отношении источников углерода и фосфора все же существуют некоторые, хотя и скудные, данные, то первичный источник азота и остальных редких газов (напр. этилен, бутан) в алмазе остается загадкой". Вероятно, в этом процессе произошел также синтез сложных органических соединений, которые находят в метеоритах, и, которые, возможно, послужили источником образования органической жизни на Земле.

В результате столкновения Фэтон взорвался и распался на каменные (вещество мантии ультраосновного состава) и железные (вещество ядра) обломки, отдельные из которых (подобно уреилитам) несут в себе алмазы. Эти обломки и являются для алмазов "консервирующей" и транспортирующей средой.

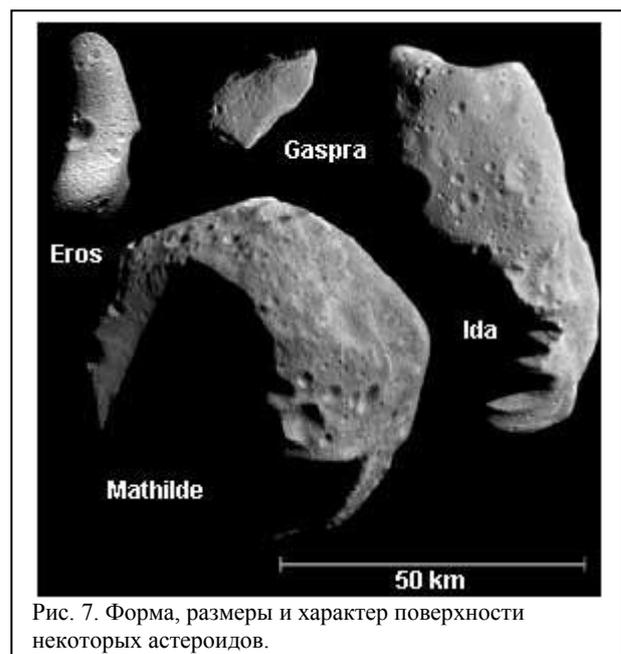


Рис. 7. Форма, размеры и характер поверхности некоторых астероидов.

Основными ключевыми моментами генезиса алмазов являются: источник углерода, импульсные Р-Т условия для образования алмазных затравок, постоянная подпитка углеродистым веществом при высокой температуре и давлении для обеспечения роста в течение определенного времени и наличие по завершении роста определенных условий для сохранности образовавшихся кристаллов. За исключением высоких температуры и давления, мантийная гипотеза не в состоянии однозначно ответить на эти вопросы. С позиций же представленной гипотезы, как видно на Рис. 1, все необходимые условия соблюдаются. Учитывая состав комет - H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>, C<sub>3</sub>, C<sub>2</sub>, CN, CH, OH, NH, NH<sub>2</sub>, находит логическое обоснование

Как было сказано выше, абсолютный возраст основной массы алмазов более 3-х млрд лет и это признано большинством ученых во всем мире. В мантии трудно представить условия сохранности кристаллов алмаза в течение миллиардов лет, а в космическом пространстве они могли сохраниться в первоначальном виде сколь угодно долго. Одна часть обломков - образовала пояс астероидов на месте орбиты Фазтона между Марсом и Юпитером. Другая часть попала в поле притяжения других планет (Марса, Юпитера и Сатурна) и стала их спутниками. Третья часть - подвергла крупные космические тела Солнечной системы интенсивной метеоритной бомбардировке в ближайшее за катастрофой время. И, наконец, четвертая часть обломков до настоящего времени продолжает движение в Солнечной системе по своим орбитам, периодически сталкиваясь с Землей и другими планетами Солнечной системы. К настоящему времени известно около 1700 таких астероидов диаметром более 1 км (Рис. 7).

**Процесс образования кимберлитов** происходит в результате ударного взаимодействия каменных метеороидов с атмосферой и горными породами верхней части земной коры. При прохождении атмосферы Земли большинство метеороидов разрушается. Разрушение метеороидов фактически не зависит от их размеров: аэродинамические силы одинаковы как для больших, так и для малых их представителей (Рис. 5). При разрушении основного тела метеороида происходит его расширение в боковом направлении, в связи с чем увеличивается общая площадь поперечного сечения и, следовательно, сопротивление, что вызывает дальнейший рост напряжений [21]. После того как метеороид прошел через атмосферу, самым важным и необходимым условием для образования кимберлитовых тел является форма его фронтальной части в момент соприкосновения с поверхностью Земли. Во время аэродинамического разрушения метеороида, его расширение в боковом направлении происходит за счет раскрытия трещин во фронтальной части и выноса отслоившегося материала в стороны. При этом напряжения максимальны именно в местах пересечения трещин, что приводит к образованию конусообразных полостей (кумулятивных выемок), которые вызываются в момент столкновения **кумулятивный эффект**, приводящий к образованию сверхскоростных струй сильно сжатого вещества метеороида. Явление высокоскоростных струйных выбросов хорошо изучено в рамках создания бронебойных кумулятивных снарядов, но, к сожалению, при изучении ударного кратерообразования оно не привлекло большого внимания и о процессах образования высокоскоростных струй в таких условиях практически нет данных. Поэтому ниже мы приводим краткое описание этого явления применительно к кумулятивным зарядам

Кумулятивный эффект - усиленное в определенном направлении действие взрыва (Рис. 8). Кумулятивный эффект создается зарядом взрывчатого вещества, имеющим углубление - кумулятивную выемку, обращенную к мишени. Кумулятивный заряд с конической выемкой пробивает стальную броню толщиной, примерно в 4 раза

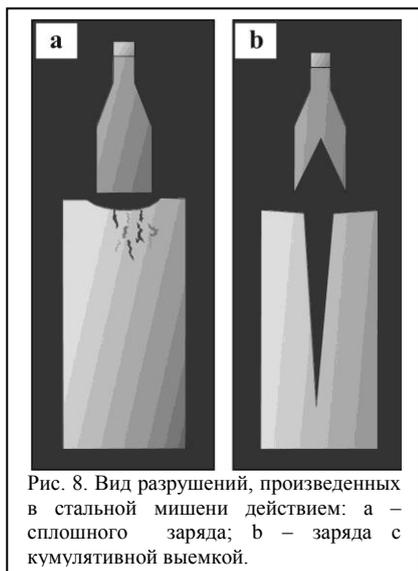


Рис. 8. Вид разрушений, произведенных в стальной мишени действием: а – сплошного заряда; б – заряда с кумулятивной выемкой.

превосходящей диаметр отверстия выемки. (Точно такая же пропорция (диаметр-глубина) наблюдается и в кимберлитовых трубках. Так, трубки диаметром на поверхности около 500 м на глубине около 2 км вклиниваются или переходят в дайку.) Механизм действия кумулятивного заряда состоит в следующем. После взрыва капсуля-детонатора, находящегося на противоположной по отношению к выемке стороне заряда, возникает детонационная волна, которая перемещается вдоль оси заряда. Волна разрушает коническую оболочку, начиная от ее вершины, и сообщает материалу оболочки большую скорость. Давление продуктов взрыва, достигающее  $\approx 10^5$  кгс/см<sup>2</sup>, значительно превосходит предел прочности металла. Поэтому движение металлической оболочки под действием продуктов взрыва подобно течению жидкой пленки (подчеркнем, что течение металла не связано с его плавлением, а вызвано чрезвычайно высокой механической нагрузкой). Движущийся металл образует сходящийся под определенным углом к оси конуса поток, который переходит в тонкую (порядка толщины оболочки) металлическую струю, перемещающуюся вдоль оси с очень большой скоростью ( $\approx 10$  км/сек). Действие этой струи и обуславливает высокую пробивную способность взрыва кумулятивного заряда.

Высокоскоростная струя пробивает стальную броню подобно тому, как мощная струя воды поникает в мягкую глину. Давление, возникающее при столкновении струи с бронебойной плитой, настолько превышает напряжение разрушения стали, что прочность мишени не играет существенной роли.

Кумулятивный эффект - пока единственный в природе физический процесс способный создать в твердой среде полости трубчатого типа. Изометричные выемки, в виде конуса или пирамиды, создают изометричные в плане трубки, конусообразные выемки неправильной формы создают такие же причудливые в плане формы трубок, сближенные выемки образуют спаренные трубки, раскрытые под острым углом линейные и дуговые трещины – создают линейные и кольцевые дайки и т.д. Образно говоря, каждая трубка имеет свое индивидуальное “лицо”. На Рис. 9 показана модель образования трубок взрыва с позиций ударной гипотезы. В отличие от кумулятивного заряда, в качестве детонатора (и источника детонационной волны) здесь выступает тыловая часть метеороида, которая после соприкосновения продолжает двигаться с начальной скоростью, так как на нее еще не действуют процессы происходящие во фронтальной части, а в качестве оболочки - каменный

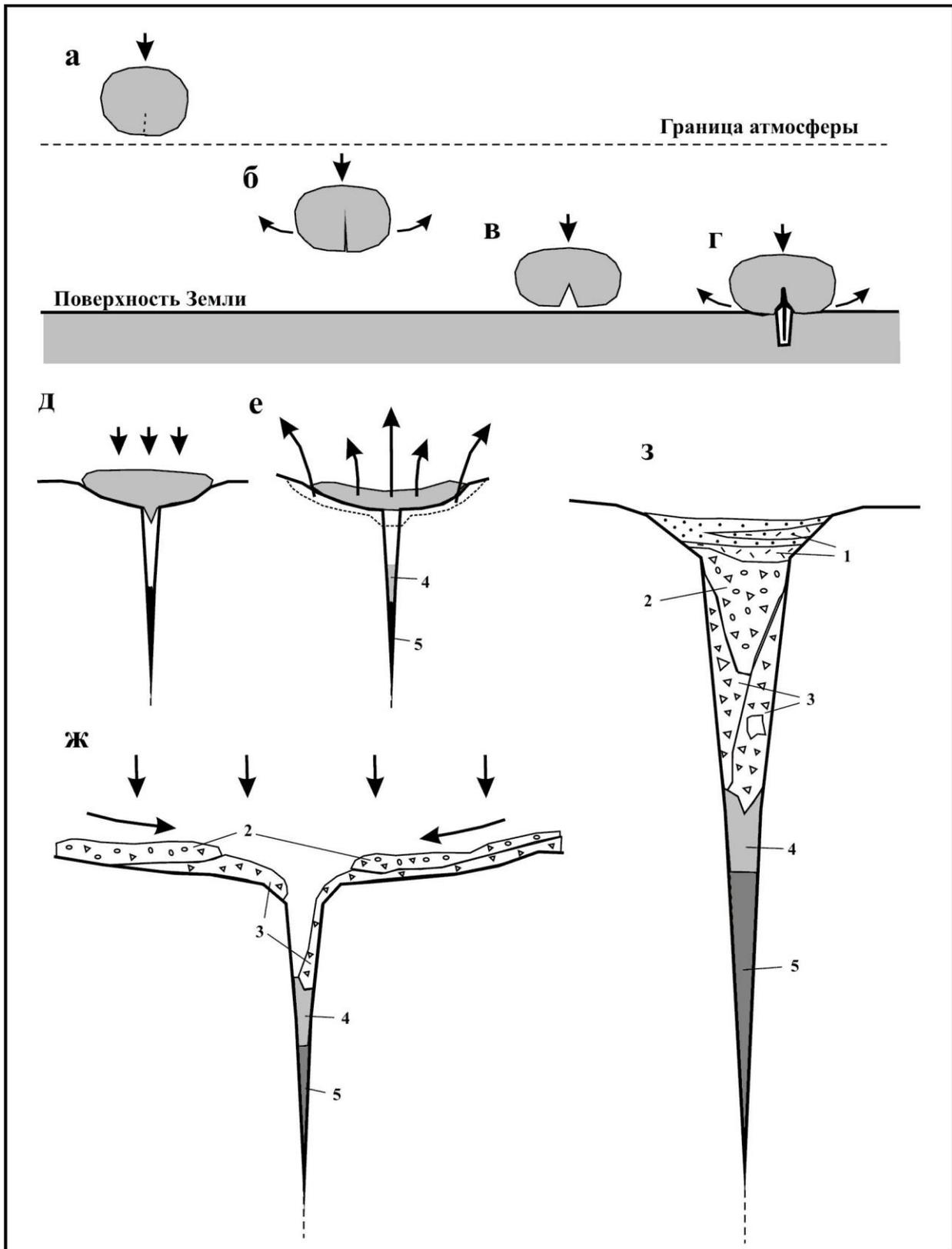


Рис. 9. Схематическая модель ударного образования кимберлитовых трубок.

а - форма метеороида до входа в атмосферу; б - аэродинамическое расширение метеороида, раскрытие трещины в его фронтальной части; в - форма метеороида перед ударом, трещина во фронтальной части раскрылась и приобрела форму кумулятивной выемки; г - первый момент столкновения, начало формирования кумулятивной струи; д - струя пробилла верхнюю часть поверхности Земли, материал струи заполнил нижнюю часть образованной полости; е - взрыв и начало стадии экскавации, образование раструба трубки (часть вещества метеороида до взрыва может успеть попасть в образованную полость); ж - начало стадии модификации ударной кратера, потоки смеси брекчий и расплава заполняют трубку, сверху падает материал поднятый султаном выбросов, последними фациями заполняющими трубку будут лапшиевые (или автолитовые) брекчий; з - окончательный вид трубки взрыва  
 Породы трубки: 1 - туфогенно-осадочные образования кратерного озера; 2 - автолитовые кимберлитовые брекчий; 3 - брекчий и туфобрекчий нескольких разновидностей кимберлитов; 4 - "интрузивные" кимберлитовые брекчий; 5 - "интрузивные" массивные кимберлиты

материал стенок выемки. Образовавшаяся высокоскоростная струя (струи) пробивает земные горные породы, образуя трубообразную полость. В зависимости от формы и размеров выемки, глубина полости могла составлять от десятков метров до первых километров. При достижении определенной глубины, с падением энергии, вещество струи либо заполняет трещину во вмещающих породах, либо выклинивается. Застывший материал струи, заполнивший нижние части трубок и дайки, представляет собой **"интрузивный" кимберлит гипабиссальной фации** часто с идиоморфными кристаллами оливина II-й генерации. Это объясняет интенсивный термический контакт корневых частей трубок с вмещающими породами. Вслед за материалом струи в образовавшуюся полость, до момента взрыва, успевают попасть часть вещества метеороида с примесью вмещающих пород, представляющая собой **массивный кимберлит** с оплавленными монокристаллами тугоплавких минералов.

Далее на поверхности происходит обычный процесс ударного кратерообразования. На стадии контакта и сжатия, в результате преобразования кинетической энергии метеороида во внутреннюю, вещество метеороида и земных горных пород подвергается значительной сдвиговой деформации, частичному или полному плавлению. В зависимости от размеров, минерального состава, структуры и трещиноватости различных частей метеороида частичное плавление происходит неравномерно (из внутренних нерасплавленных фрагментов в дальнейшем образуются ксенолиты "родственных" включений). Возможно, на этой стадии, за счет углеродистого вещества основной массы метеороида происходит частичное растворение, рост и изменение внешних зон зональных кристаллов алмаза (IV-VIII-я разновидности по Ю.Л. Орлову), а также, пластические деформации кристаллов. А за счет углеродного вещества (графит, уголь, битум) земных пород в месте удара происходит образование кристаллов алмазов IX-XI разновидности, изотопный состав которых отличается от основной массы алмазов и соответствует рассеянному углероду Земной коры. По эффекту удар высокоскоростного метеороида напоминает ядерный взрыв и именно в этот момент происходит расширение верхней части трубообразной полости с образованием раструба. На стадии экскавации, горячее облако, состоящее из султана пара, мелких частиц, оплавленных тугоплавких кристаллов и обломков пород (ксенолитов), постепенно поднимается, приобретая классическую грибообразную форму. В этом облаке и происходит формирование таких специфических образований кимберлитов, как силикатные шарики и автолиты. На стадии модификации начинается заполнение полости, образованной высокоскоростной струей. Со дна кратера в нее стекает смесь образовавшегося при ударе расплава с обломками вмещающих пород и родственных включений, иногда с крупными глыбами ("плавающие рифы"), сверху падают поднятые султаном пара мелкие частицы, обломки и автолиты - образуется **кимберлитовая брекчия**. Отдельные потоки такого расплава и образуют так называемые кимберлитовые "столбы" или "фазы внедрения", наблюдаемые во многих трубках. Также легко объясняется гибридный состав кимберлитов, отсутствие явных контактовых изменений вмещающих пород и ксенолитов в диатремовых частях трубок, зеркала скольжения на контакте с вмещающими породами, разнообразие форм трубок в плане, наличие и состав кратерных фаций в верхних частях трубок и многое другое. Широкие вариации химического состава кимберлитовых тел объясняются разнообразием составов метеороидов и земных горных пород. Распределение алмазов в обломках космического тела было крайне неравномерным, из чего вытекает простое объяснение наличия алмазоносных и неалмазоносных кимберлитовых тел. А эпохи кимберлитобразования связаны с прохождением Земли в определенные периоды космического времени через рои и потоки астероидов.

Наличие плотной атмосферы существенно изменяет процесс ударного кратерообразования. Кратеры, созданные разрушенным ударником аномально мелки по сравнению с созданными единым ударником и характеризуются почти плоским дном. По-видимому, при ударном взаимодействии таких подвергшихся

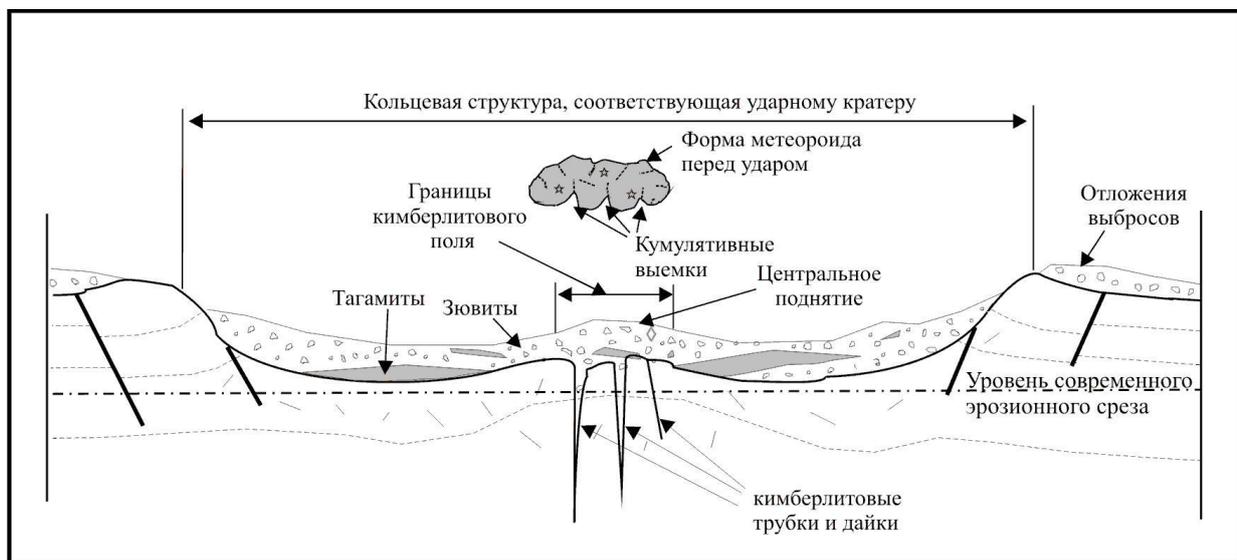


Рис. 10. Схематическая модель образования кимберлитового поля

аэродинамическому разрушению крупных (более 1 км) каменных метеороидов с поверхностью Земли и образуются “кусты” кимберлитовых тел и кимберлитовые поля (Рис. 10). Образно говоря, кимберлитовое поле - это сохранившийся негатив отпечатка поверхности столкнувшегося с Землей метеороида. Одним из доказательств этого процесса является поле трубок взрыва в сильно эродированной астроблеме Уэлс Крик (США) [61]. В пользу этого также свидетельствует отсутствие какого-либо структурного контроля в их размещении, а также изометричная и эллипсовидная в плане форма контуров кимберлитовых полей. Тот факт, что за более чем столетнюю историю интенсивного изучения кимберлитов, не было выявлено ни одной структурно-пространственной закономерности в их размещении, достаточно ясно свидетельствует о случайности процесса кимберлитобразования. Единственное пока, что можно предположить, это связь протяженных на сотни километров линейных зон расположения кимберлитовых полей (Южная Африка и Якутия) с вращением Земли и неодновременным падением на нее сближенных групп метеороидов. За десятки и сотни миллионов лет кратеры были уничтожены эрозией, об их существовании свидетельствуют лишь кольцевые структуры, сопоставимые с размерами кратеров (Рис. 11). Оценки скорости образования кратеров на Земле свидетельствуют, что объекты диаметром 10 км и более сталкивались с Землей с частотой примерно один раз в 100 млн. лет [21]. Такие объекты могли образовать кимберлитовые поля диаметром около 50 км, а полей такого размера на Земле обнаружены единицы. Основная же масса кимберлитовых полей имеет размеры в пределах 10-20 км и для их образования достаточно метеороида диаметром около 5 км, а такие метеороиды сталкивались с Землей значительно чаще.

Образование трубок взрыва напрямую связано со скоростью, углом падения и составом метеороида и они могут присутствовать не во всех астроблемах.

Во-первых, по-видимому, трубки взрыва отсутствуют в астроблемах образованных железными метеороидами.

Во-вторых, трубки не образуются при косых ударах (кумулятивный эффект при косых ударах проявляется в виде образования высокоскоростных струйных выбросов направленных по ходу полета метеороида). За счет размыва отложений выбросов в дальнейшем формируются богатые алмазонасные россыпи различных типов, такие как россыпи Юго-Западной Африки, Эбелях в Якутии и Вишерские россыпи на Урале, алмазонасные филлиты Бразилии, а также титанциркониевые россыпи с алмазами в Северном Казахстане и на Украине. Во время движения отложений ударных выбросов происходит частичное растворение кристаллов алмаза приводящее к образованию округлых алмазов “уральского” типа.

В-третьих, при высокой скорости удара (>15 км/с) и угле падения близким к вертикальному происходит практически полное плавление и испарение вещества метеороида, а образовавшиеся во время столкновения за счет кумулятивного эффекта полости (дайки, трубки) во вмещающих породах будут заполнены расплавленным и брекчированным веществом только вмещающих пород или останутся на долгое время пустотелыми, а в дальнейшем постепенно заполнятся отложениями озерных осадков (Бушмеленд, ЮАР; Кердах, Сирия; Уэлс Крик, США).

Из вышесказанного следует, что трубки образуются при близких к вертикальному ударах со скоростью до 10 км/сек каменных метеороидов, подвергшихся значительному аэродинамическому разрушению. При таких ударах происходит лишь частичное плавление вещества метеороида, и значительная часть его вещества сохраняется на стадии экскавации.

Согласно предлагаемой гипотезы, разнообразие существующих в природе алмазов обусловлено не полигенезом (как считают до настоящего времени сторонники глубинных гипотез – это магматический, метаморфогенный, ударный и другие еще не известные процессы), а различными физическими и химическими условиями ударного процесса и широким кругом углеродсодержащих соединений, вовлеченных в этот процесс. И здесь необходимо развеять некоторое предубеждение. Само выражение - «импактные алмазы», у

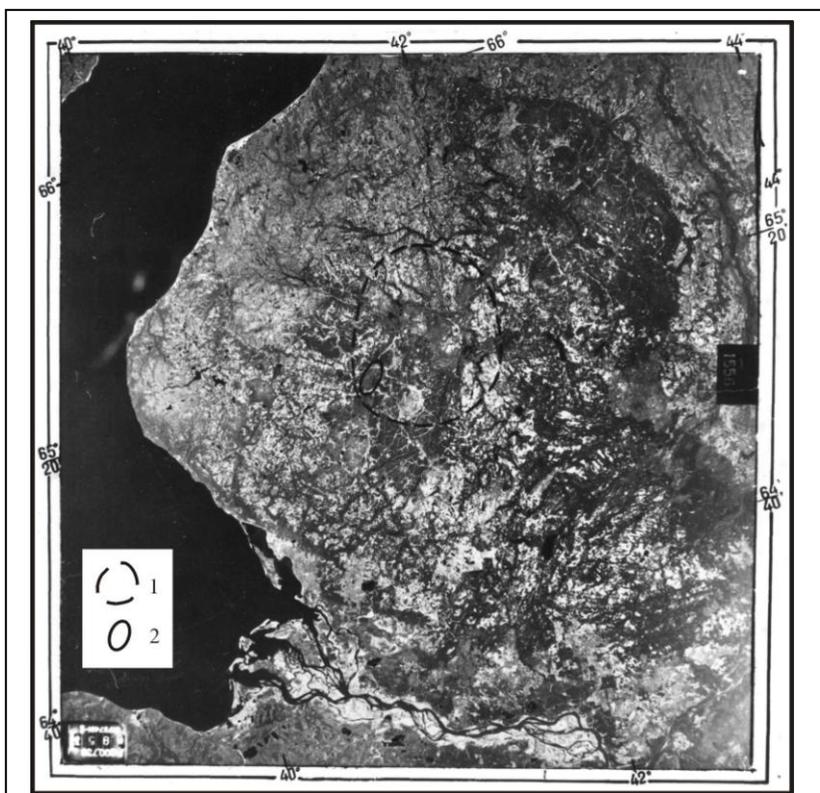


Рис. 11. Кольцевые структуры вокруг кимберлитовых полей (Зимний берег, Архангельская обл., Россия).

1 – Зимнебережная кимберлитовая провинция; 2 – Золотицкое кимберлитовое поле

большинства геологов сразу ассоциируется с апографитовыми алмазами Попигайской астроблемы, которые принимаются за эталон всех ударно-генерированных алмазов и считается, что они могут быть только такими и никакими другими. На самом же деле Попигайские алмазы являются примером **одного из многих частных случаев** образования **конкретных алмазов** в результате столкновения с Землей с **конкретной скоростью** под **определенным углом** в **конкретном месте** метеорита **определенного состава** (предположительно обыкновенного хондрита) и **размера** за счет **конкретного источника углерода**. Вариаций условий реализации ударного процесса может быть множество. Они зависят от размеров, скорости, угла падения, фазового состояния и состава (железный, каменный, углистый, ледяной астероид, газовая комета и др.) ударника; строения и состава мишени (кристаллические или осадочные породы, океан, горный массив или равнина и т.д.). Эти факторы обуславливают температуру, давление, время и химическую среду алмазообразования. Кроме этого, в ударном процессе алмазы могут расти как на стадии контакта и сжатия, так и во время взрыва в начале стадии экскавации. При этом, как и при аналогичных способах синтеза, могут образовываться алмазы разных морфологических типов. И, несомненно, главную роль в процессе алмазообразования играет источник углерода. Здесь также возможно большое количество вариантов. Источник углерода для образования алмазов может присутствовать как в ударнике (в виде минеральных фаз – сам алмаз (как источник для образования округлых алмазов и алмазов с оболочкой), графит, клифтонит, различные карбиды; в виде сложных органических соединений, углеводов, аморфного и тонкодисперсного углерода матрицы; в виде углеводородных и других углеродсодержащих газов, в случае если ударником является комета), так и в мишени (в виде минеральных фаз – графит и др.); в виде твердых, жидких и газообразных углеводородов (уголь, битум, нефть, газ) и т.д. При этом, различия изотопного состава углерода в алмазах очень просто объясняются различными источниками углерода для их образования, тем более, что изотопное фракционирование углерода при ударном процессе незначительное [ ] и всегда можно определить первоисточник. Например, для алмаза из трубки Мир, представленного серым бортом с аномально легкими значениями изотопного состава (-32,3 ‰) источником послужил углерод битумов, содержащихся в трубке - 31,4‰ [5]. А комбинации этих источников могут привести к образованию различных видов алмазов в одном ударном процессе (россыпи севера Сибирской платформы, Казахстана и Украины).

Итак, согласно приведенной гипотезе, подавляющее большинство алмазов, находящихся в кимберлитовых, лампроитовых трубках и в большей части россыпей и имеющие изотопный состав углерода от -1 до -10‰ (сюда входят все ювелирные алмазы), образовались вне пределов Земли во время столкновения Фазтона с галактической кометой 3.2 –3.4 млрд лет назад и в последующие геологические эпохи эпизодически приносились на Землю в составе метеороидов, являющихся фрагментами пород разрушенного Фазтона. Другая часть алмазов, присутствующая в различных отложениях верхней части земной коры образовалась во время ударных процессов непосредственно на Земле за счет различных источников углерода мишени и (или) ударника.

Одним из главных показателей правильности гипотезы, является ее универсальность – возможность интерпретировать происхождение различных месторождений со своих позиций. Глубинным гипотезам в каждом конкретном случае приходится давать индивидуальное объяснение, т.к. сильно варьируют различные показатели (структурная позиция, химический и минеральный составы и т.д.). Ударная гипотеза – универсальна. В качестве примера ниже приводится простое объяснение образования «нового метаморфогенного источника» алмазов – месторождения Кумдыколь на севере Республики Казахстан.

В разнообразных метаморфических породах алмазного месторождения Кумдыколь обнаружены

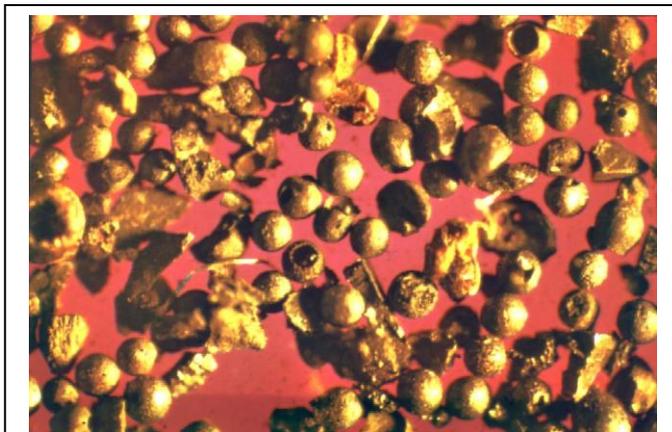


Рис. 12. Металлические сферулы из алмазного месторождения Кумдыколь (Республика Казахстан).

планарные структуры в кварце, что неопровержимо указывает на прохождение через эти породы ударных волн с пиковыми давлениями 50 кбар и выше, а также многочисленные закаленные металлические частицы, представленные шариками, гантельками, каплевидными обособлениями, плоскими слепками, змейками, проволоками и другими причудливыми формами (Рис. 12), возникающими при впрыскивании расплавленного вещества ударника в трещины пород мишени. Состав этих обособлений - магнетит, гематит, иоцит, троилит,  $\alpha$ -железо, никелистое железо [12]. На этом месторождении, кроме кубической алмазной и гексагональной графитовой модификаций углерода, обнаружены переходные образования со структурными элементами алмаза, чаонита,  $\alpha$ - и  $\beta$ -карбина, гексагонального, ромбоэдрического и

кубического графита, лонсдейлита, а также рентгеноаморфные разности скелетных алмазов [34]. Кроме того, возраст образования эклогит-гнейсово-сланцевого комплекса вмещающих пород – ранний протерозой, а возраст алмазов, определенный по включенным в них цирконам-узникам – кембрийский [16]. Эти данные, а также: мелкие размеры кристаллов алмаза (в среднем 20-40 мкм); приуроченность значительной части алмазов

к трещинам в породообразующих минералах, особенно в гранатах; преобладание несовершенных кристаллов со своеобразной скелетной и кривогранной сфероидальной формой; сингенетичность образования алмаза и графита; беспрецедентно высокое отношение изотопов гелия ( $^3\text{He}/^4\text{He}$ ) в алмазах [16]; включения коэсита в цирконах; выклинивание продуктивных тел с глубиной; позволяют предположить, что данное месторождение возникло в результате удара небольшого по размерам и богатого углеродистым веществом метеороида (возможно углистого хондрита или даже кометы). На стадии контакта и сжатия произошло “впрыскивание” испарившегося вещества метеороида в разнообразные метаморфические породы и трещины отдельных минералов с дальнейшей одновременной кристаллизацией алмаза и графита. Процесс был кратковременным, вероятно первые секунды, поэтому смогли образоваться только очень мелкие кристаллы. Об ударном происхождении свидетельствует и расположение месторождения – в пределах кольцевой структуры, очень похожей на ударный кратер (Рис. 13). Более того, по данным [16], содержание алмазов на месторождении возрастает по направлению на северо-восток к центру кольцевой структуры.



Детальные исследования сотрудников ЦНИГРИ позволили им “...сделать вывод о едином источнике углерода для алмаза и графита на месторождении. При этом возможны два варианта кристаллизации алмаза и графита. 1. Алмаз образовался из графита в условиях сверхвысоких температур и давлений (скорее всего, кратковременных, имея в виду мелкие размеры и несовершенные формы кристаллов). 2. Алмаз и графит образовались почти одновременно из углеродсодержащего флюида по двум конкурирующим процессам (физико-химическим реакциям).” При совершенно правильной постановке вопроса об условиях образования алмазов в первом варианте, авторы ошиблись в источнике углерода для образования алмаза и ушли в сторону сравнения алмазов этого месторождения с Попигайскими алмазами, которые действительно образовались за счет графита, но этот графит существовал во вмещающих породах до удара

метеорита. Здесь же, в отличие от мартенситного преобразования кристаллического углерода в алмаз, происходил диффузионный рост кристаллов алмаза и графита, либо за счет полиморфного углеродистого вещества матрицы углистого хондрита, либо за счет разнообразных углеводородов кометы. (Беспрецедентно высокое отношение изотопов гелия ( $^3\text{He}/^4\text{He}$ ) в кумдыкольских алмазах свидетельствует в пользу галактической кометы).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании вышеизложенного, можно сделать некоторые теоретические и практические выводы:

Конусообразные воронки на поверхности Земли (трубки взрыва), заполненные раздробленным материалом, в основном вмещающих пород (называемые кимберлитами, лампроитами, пикритами, альнеитами и т.д.), наблюдаемые в разных типах пород и в самых разных геологических обстановках – **не имеют ни малейшего отношения ни к вулканической, ни к магматической деятельности, ни, тем более, к тектонике плит.**

Рассмотренный механизм образования кимберлитов, несомненно, применим и к другим многочисленным разновидностям пород, локализованным в телах подобной морфологии - трубках взрыва. Исходя из него - каждое кимберлитовое тело (трубка, дайка, пласт) строго индивидуально по морфологии и составу (даже расположенные по соседству или сдвоенные). Деление пород заполняющих трубки на кимберлиты, оранжситы, мельноиты, лампроиты и т.д. имеет смысл только в академическом плане, а в прикладном плане не имеет особого значения – их состав в каждом конкретном случае разный и зависит от пропорций состава метеороида и вмещающих трубку пород, а также скорости метеороида и других показателей (см. выше). Так же не имеют особого смысла попытки увязать химический и минеральный состав пород с алмазностью. Алмазы (в том числе и в промышленных концентрациях) могут присутствовать во всех телах трубчатой формы независимо от состава пород.

Кимберлитообразование в физическом смысле случайный наложенный процесс и не коррелирует с существующей региональной и локальной трещиноватостью.

Значительно расширяется зона потенциально алмазносных территорий. Нет никаких территориальных, структурно-тектонических, геодинамических и др. ограничений на возможное наличие кимберлитов и (или)

других типов потенциально алмазоносных пород (ПАП). Они могли быть образованы на любом участке суши Земли, включая шельф.

Вероятность нахождения потенциально алмазоносных пород на определенной территории прямо пропорциональна возрасту вмещающих их пород и времени экспонирования (экспозиции) их на поверхности Земли и обратно пропорциональна уровню эрозионного среза.

Невозможно эффективно искать месторождения алмазов, не зная их генезис. Представленная гипотеза дает возможность разработать эффективную комплексную прогнозно-поисковую концепцию работ на все виды потенциально алмазоносных пород. Это должно привести к открытию новых крупных месторождений алмазов, особенно в тех регионах, где их открытие и не предполагалось, в силу сложившихся представлений об их происхождении.

Возрастет ценность и коммерческий интерес к самим природным кристаллам алмаза ввиду их романтического происхождения, как космических пришельцев, рожденных из вещества струйного потока галактики в момент космической катастрофы, изменившей историю и облик Солнечной Системы.

В заключение хочется сказать о самом термине, объединяющем тела подобной морфологии - “трубки взрыва”. С позиций образования из глубин Земли он не совсем соответствовал действительности и часто подвергался критике. С позиции ударного происхождения остается только удивляться насколько пророческим было это название, ведь удары метеороидов подобны взрыву.

Контакт: Люхин Алексей Михайлович; тел. 8-910-440-03-30; Email: [lyuhin@yandex.ru](mailto:lyuhin@yandex.ru)

## ЛИТЕРАТУРА

1. Аргунов К.П. и др. Карбонадо и дефектные кристаллы среди мелких алмазов из кимберлитов // Минер. журн., 1985, Т.7, № 2.
2. Буланова Г.П. и др. Природный алмаз – генетические аспекты. Новосибирск, 1993, 167 с.
3. Вдовыкин Г.П. Алмазы в метеоритах. М.: Наука, 1970.
4. Вдовыкин Г.П. Алмазы в каменных метеоритах-уреилитах и их происхождение // Бюл. МОИП, 1991, Т. 66, вып.2.
5. Виноградов А. П., Кропотова О. И., Устинов В. И. Возможные источники углерода природных алмазов по изотопным данным  $C^{12}/C^{13}$  // Геохимия, 1965, № 6.
6. Гейман Л.М. Взрыв. М.: Недра, 1978.
7. Джейкс А., Луис Дж., Смит К. Кимберлиты и лампроиты Западной Австралии. М.: Мир, 1989.
8. Додд Р.Т. Метеориты: петрология и геохимия. М.: Мир, 1986.
9. Доусон Дж. Кимберлиты и ксенолиты в них. М.: Мир, 1983.
10. Езерский В.А. Гипербарические полиформы, возникающие при ударном преобразовании углей // Зап. ВМО, 1986, Ч.115, №1.
11. Ефимова Э. С., Соболев Н. В., Пospelова Л. Н. Включения сульфидов в алмазах и особенности их парагенезиса // Зап. ВМО, 1983, Ч. 112, вып. 3.
12. Зейлик Б.С. Существуют ли аномально богатые месторождения ювелирных алмазов // Геология и разведка недр Казахстана, 1997, № 3.
13. Илупин И.П., Каминский Ф.В., Францесон Е.В. Геохимия кимберлитов. М.: Недра, 1978.
14. Квасница В.Н., Зинчук Н.Н., Коптиль В.И. Типоморфизм микрокристаллов алмаза. М.: Недра, 1999.
15. Кирикилици С.И., Кашкаров И.Ф., Полканов Ю.А. Комплексная характеристика мелких алмазов титановых россыпей Русской платформы, Казахстана и Западной Сибири и проблема их генезиса // Тр. ЦНИГРИ. В.175. 1983.
16. Лаврова Л.Д. и др. Новый генетический тип алмазных месторождений. М.: Научный мир, 1999.
17. Маракушев А.А., Безмен Н.И. Зональность кристаллов в алмазоносных горных породах // Минер. журн., 1981, Т.3, № 3.
18. Маршинцев В. К. Вертикальная неоднородность кимберлитовых тел Якутии. Новосибирск: Наука, 1986.
19. Масайтис В.Л. и др. Импактные алмазы в уреилитах и импактитах // Метеоритика, 1990, Вып. 49.
20. Масайтис В.Л. и др. Алмазоносные импактиты Попигаийской астроблемы. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 1998.
21. Мелош Г. Образование ударных кратеров: геологический процесс. М.: Мир, 1994.
22. Милашев В. А. Факторы локализации кимберлитов // Кимберлитовый вулканизм и перспективы коренной алмазоносности северо-востока Сибирской платформы. Л.: НИИГА, 1971.
23. Милашев В. А. Кимберлитовые провинции. Л.: Недра, 1974.
24. Милашев В.А. Трубки взрыва. Л.: Недра, 1984.
25. Миронов В.П., Аргунов К.П., Захарова В.Р. О связи облика и внутреннего строения алмазов X и XI разновидностей // Минералогические аспекты металлогении Якутии. Якутск: ЯФ АН СССР, 1990.
26. Множественные метеоритные взрывы как геологический фактор. М.: Недра, 1982.
27. Портнов А. М. Алмазы - "след" протопланетного облака // Земля и Вселенная, 1993, № 2.
28. Ротман А.Я. Особенности распределения элементов группы платины в кимберлитах Якутии // Геология, закономерности размещения, методы прогнозирования и поисков месторождений алмазов. Материалы научно-практической конференции, Мирный, 1998.
29. Соболев Н. В., Ефимова Э. С., Пospelова Л. Н. Самородное железо в алмазах Якутии и его парагенезис // Геология и геофизика, 1981, № 12.
30. Титков С.В. и др. Геохимия и генезис карбонадо из Якутских алмазных месторождений // Геохимия, 2001, № 3.
31. Фельдман В.И. и др. Импактиты. М.: МГУ, 1981.
32. Чайковский И. И. Самородные минералы алмазоносных туфов Полюдовско-Колчимского поднятия и их генетическое значение // Геология и минеральные ресурсы европейского северо-востока России: новые результаты и новые перспективы. Материалы XIII Геологического съезда Республики Коми. т.IV, Сыктывкар, 1999.
33. Шелков Д. и др. Карбонадо Бразилии и Убанги: сравнение с другими формами микрокристаллических алмазов на основе изотопов азота // Геология и геофизика. Т. 38. № 2.
34. Шумилова Т.Г. Минералогия скелетных алмазов из метаморфических пород. Сыктывкар: Геопринт, 1996.
35. Юдин И.А., Коломенский В.Д. Минералогия метеоритов. Свердловск: 1987.
36. Erjomenko G.K., Valter A.A., Kvasnitsa V.N. Cubic impact diamond: structure, natural etching, origin // Vernadsky-Brown Microsymp. 26: Abstr.pap. submit. 26<sup>th</sup> Int. Microsymp. Comp. Planetol., Moscow, 1997.
37. Frank F.C. Diamonds and deep fluids in the mantle // The application of modern physics to earth planetary interiors. – Wiley, N.Y., 1969.
38. Garrison J.R.Jr., Taylor L.A. Megacrysts and xenoliths in kimberlite, Elliott County, Kentucky: A mantle sample from Beneath the Permian Appalachian Plateau // Contrib.- Mineral. And petrol., 1980, 75.
39. Griffin W.L. et al. Conditions of diamond growth: a proton microprobe study of inclusions in West Australian diamonds // Contribs. Mineral. And Petrol. 1988.
40. Jaynes C. Natural Polycrystalline Diamond // Industrial Diamond Review. 1978. № 1.
41. Haggerty S. E. The chemistry and genesis of opaque minerals in Kimberlites // Phys. Chem. Earth, 1975, V.9.
42. Haggerty S.E., Sautter V. Ultradeep (greater than 300 kilometers) ultramafic upper mantle xenoliths // Science 248, 1990.
43. Lal D. et al.  $^3\text{He}$  in diamonds: The cosmogenic component // Geochim. et Cosmochim. Acta. 1989, V.53.
44. Lowe D. R., Byerly G. R. Early Archean silicate spherules of probable impact origin // Geology 14, 1986.
45. Melton C. E., Giardini A. A. The composition and significance of gas released from natural diamonds from Africa and Brazil // Am. Mineral. 59, 1974.
46. Melton C. E., Giardini A. A. Experimental results and a theoretical interpretation of gaseous inclusions found in Arkansas natural diamonds // Am. Mineral. 60, 1975.
47. Melton C. E., Giardini A. A. The isotopic composition of argon included in an Arkansas diamond and its significance // Geophys. Res. lett., 1980, v. 7, N 6.
48. Meyer H. O. A. Geochemie des inclusions minerales dans les diamants naturels // Bulletin de l'association Francais.

49. Moore R.O., Gurney J.J. Mineral inclusions in diamond from the Monastery kimberlite, South Afrika // Kimberlites and Related Rocks 2, J. Ross et. al., eds. – Blackwell, Melbourne, 1989.
50. Moore R.O., Otter M.L., Rickard R.S. et al. The occurrence of moissanite and ferropericlae as inclusions in diamond // 4<sup>th</sup> Intern. Kimberlite Conf.: Extended Abstr. – Perth, 1986.
51. Ozima M., Zashu S. Primitive helium in diamonds // Science. 1983. V.219.
52. Ozima M., Zashu S., Nito O. <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He ratio, noble gas abundance and K-Ar dating of diamonds – An attempt to search for the records of early terrestrial history // Geochim. et Cosmochim. Acta. 1983. V.47.
53. Ozima M. Comment on “An important source of <sup>4</sup>He (and <sup>3</sup>He) in diamonds” by D.Lal // Earth Planet. Sci. Lett. 1990. V.101.
54. Richardson S. H. Latter-day origin of diamonds of eclogitic paragenesis // Nature, 1986, v. 322, N 6080.
55. Richardson S. H. et al. Origin of diamonds in old enriched mantle // Nature, 1984, v. 310, N 5974.
56. Shimizu N., Richardson S. H. Trace element abundance patterns of garnet inclusions in peridotite-suite diamonds // Geochim et Cosmochim. Acta. 1987. V.51.
57. Shoji A. Iron Meteorite Paragenesis a New Group of Mineral Inclusions in Diamond // News Jahrb. Miner. Monatsh. 1986. H. 10.
58. Smith J. V., Dawson J.B. Carbonado: Diamond Aggregates From Early Impacts of Crustal Rocks? // Geology. 1985. V. 13.
59. Swart P.K. et al. Carbon isotopic variation within individual diamonds // Nature. 1983. V.303.
60. Zadnic M.G. et al. Crushing of terrestrial diamonds: <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He higher than solar // Meteoritics. 1987. V.22
61. Bucher W. H. Cryptoexplosion structures caused from without or from within the Earth? (“Astroblemes” or “Geoblems”?). – Amer. J. Sci., 1963, vol. 261, N 7, p. 597-649.
62. Ваганов В.И., Иванкин П.Ф., Кропоткин П.Н. и др. Взрывные кольцевые структуры щитов и платформ. – М.: Недра, 1985.-200 с.
63. Harte B. Rock nomenclature with particular relation to deformation and recrystallisation textures in olivine-bearing xenoliths. — J. Geol., 1977, v. 85, p. 279-288.
64. Сорохтин О.Г., Митрофанов Ф.П., Сорохтин Н.О. Происхождение алмазов и перспективы алмазоносности восточной части Балтийского щита. Апатиты, КНЦ РАН, 1995, 144 с.
65. Харьков А. Д., Зинчук Н. Н., Крючков А. И. Геолого-генетические основы шлихо-минералогического метода поисков алмазных месторождений. Москва: Недра, 1995, 350 с.
66. Харьков А. Д., Зуенко В.В., Зинчук Н. Н. и др. Петрохимия кимберлитов. – М.: Недра, 1991.
67. Аргунов К.П., Ваганов В.И., Зинчук Н.Н. Мелкие алмазы из кимберлитов и эклогитов.// Труды ЦНИГРИ Выпуск 188 1984
68. Хефе Й. Геохимия стабильных изотопов. М., Мир, 1983. 200с.
69. Галимов Э.М. 13C/12C алмазов. Вертикальная зональность алмазообразования в литосфере. —“27-й Международный геологический конгресс, Москва, 4—14 авг., 1984. Докл. т.11. Секц. С.11. Геохимия и космохимия”. М., Наука, 1984, с. 110—123.
70. Соболев Н.В., Галимов Э.М., Ивановская И.М., Ефимова Э.С. Изотопный состав углерода алмазов, содержащих кристаллические включения. Докл. АН СССР, 1979, т. 249, с. 1217-1220.
71. Захарченко О.Д., Галимов Э.М. Изотопная характеристика углерода алмазов из кимберлитовой трубки одного из районов СССР. —2-е Всесоюз. совещ. по геохимии углерода, 29 сент.—1 окт., 1986г. — М., Наука, 1986, с. 115-116.
72. Milledge H.J., Mendelsohn M.J., Seal M., Rouse J.E., Swart P.K., Pillinger C.T. Carbon isotopic variation in spectral type II diamonds. — Nature, 1983, v. 303, p. 791-792.
73. Каминский Ф.В., Блинова Г.К., Красников В.И., Лапушков В.М. Возможности прогнозирования и поисков коренных месторождений алмазов по комплексу типоморфных признаков алмазов в россыпях.// Труды ЦНИГРИ Выпуск 218 1987
74. Dence M. R., Douglas J. A. V., Plant A. G., Traill R. J. Petrology, mineralogy and deformation of Apollo II samples. — Proc. Apollo 11 Sci. Conf., 1970f vol. 1, p. 315—340.
75. El Goresy A. The opaque minerals in impactite glass. Shock metamorphism of natural materials. Baltimore, Mono Press., 1968, p. 531—554.