

## КИМБЕРЛИТЫ – ПРИРОДНЫЕ СВЕРХГЛУБОКИЕ СКВАЖИНЫ

Т. В. ПОСУХОВА

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

### KIMBERLITES – NATURAL SUPERDEEP DRILL HOLES

T. V. POSSOUKHOVA

*Kimberlite is a specific type of diamondiferous rocks. Many fragments of different sedimentary and magmatic rocks (xenolithes) were discovered in kimberlites together with diamonds. Xenolithes contain diamonds as well as other minerals which were formed at high pressure and temperature in the depths of the Earth. The specific features of crystal structure and composition of the constituents of mantle xenolithes are described and hypotheses of their formation are discussed.*

*Кимберлиты – особый тип горных пород, содержащих алмазы. Вместе с алмазами в кимберлитах в большом количестве встречаются обломки разнообразных горных пород, минеральный состав которых показывает, что они образовались при высоких давлениях и температурах в глубинах Земли. Рассмотрены особенности минерального состава алмазоносных и неалмазоносных мантийных ксенолитов и существующие гипотезы их образования.*

[www.issep.rssi.ru](http://www.issep.rssi.ru)

### ВВЕДЕНИЕ

Кимберлиты – особый тип магматических горных пород. Впервые они привлекли внимание ученых в 1887 году, когда геолог К. Льюис, приехавший на недавно открытые алмазоносные прииски Южной Африки, назвал так породы, содержащие алмазы и выполняющие округлую депрессию, имеющую форму воронки. Последующие исследования показали, что эти породы интересны не только из-за промышленной ценности. Оказалось, что корни кимберлитовых тел уходят далеко в глубь Земли и благодаря особому геологическому положению кимберлиты выносятся на поверхность обломки глубинных пород, слагающих земные недра, недоступные для прямых наблюдений. Следует отметить, что, несмотря на все достижения научно-технического прогресса в XX веке, человек так и не смог создать приборы, позволяющие заглянуть в глубь нашей планеты. О том, чем сложена Земля на больших глубинах, мы можем судить только по косвенным геофизическим данным, так как даже самые глубокие шахты не опускаются ниже первых километров, а самая глубокая Кольская сверхглубокая скважина достигла отметки 12 262 м. В этих условиях все предположения о строении земных недр оставались бы на уровне гипотез, если бы природа не помогла геологам и не предоставила уникальной возможности изучать глубинные горные породы, обломки которых встречаются в кимберлитах и называются мантийными ксенолитами.

### СТРОЕНИЕ И СОСТАВ КИМБЕРЛИТОВ

Чтобы понять, почему именно кимберлиты имеют большое практическое и научное значение, нужно подробнее рассмотреть особенности строения кимберлитовых тел и закономерности их размещения на земном шаре. В настоящее время кимберлиты найдены на всех континентах (рис. 1). Наиболее известны алмазоносные кимберлиты Африки. На этом континенте разведано несколько крупных кимберлитовых провинций: Южно-Африканская, Западно-Африканская, Танзанийская,



**Рис. 1.** Схема размещения кимберлитов. Области, закрашенные коричневым, показывают границы кратонов с возрастом фундамента более 1,5 млрд лет. Красными ромбами отмечены области распространения алмазоносных кимберлитов

Намибийская, Ангольская. Три кимберлитовые провинции известны в Азии: Якутская, северо-восточная Китайская и Индийская. Кимберлиты установлены также в Северо-Западной Австралии, США (Сомерсет, Колорадо-Вайоминг), Канаде, Бразилии и Европе (Архангельская и Приазовская провинции). Кимберлиты имеют различный возраст (от 70 до 1200 млн лет), но большинство из них приурочено к особым геологическим структурам – древним платформам или кратонам. В строении всех древних кратонов геологи выделяют два этажа: нижний – складчатый фундамент, сложенный древними (архейскими) породами с возрастом более 1,5 млрд лет, и верхний – осадочный чехол, сложенный более молодыми пологозалегающими породами. Кимберлитовые тела прорывают оба типа пород и выносят их обломки на поверхность (рис. 2). Подобие, наблюдающееся в составе обломков, найденных в кимберлитах, и в составе пород, извлеченных при бурении скважин, позволяет с большой долей уверенности полагать, что и другие обломки пород, встреченные в кимберлитах, являются фрагментами еще более глубоких зон земной коры.

Как установлено в результате разработки алмазных месторождений, большинство кимберлитовых тел имеет сложное строение (см. рис. 2). За свою форму они получили название трубок. Верхняя часть напоминает

бокал – это вулканический кратер, который заполнен мелкообломочными породами – кимберлитовыми туфами. Сужаясь кратер переходит в воронкообразную (диатремовую) часть, сложенную крупнообломочными породами – кимберлитовыми брекчиями. Самая нижняя корневая часть трубок (подводящий канал) сложена массивным кимберлитом. Подводящий канал часто разделяется на несколько частей, каждая из которых с глубиной переходит в дайку – вертикально стоящую плитообразную структуру.

Размеры кимберлитовых тел различны – от 146 га (трубка “Мвадуи”, Танзания) до 0,4 га (трубка “Робертс Виктор” в Южной Африке). Трубка “Зарница” – первая из кимберлитовых трубок, найденных на территории Сибири в Якутии геологом Ларисой Попугаевой, имела размер 32 га. Близкие размеры имеют и найденные позднее знаменитые месторождения алмазов Сибири – кимберлитовые трубки “Мир” и “Удачная”.

Кимберлит – сложная гибридная порода, в которой совмещены минералы, образовавшиеся в различных термодинамических условиях. Кимберлитовые брекчии содержат обломки осадочных пород чехла и кристаллических пород фундамента, а также ксенолиты глубинных пород мантии. Основная масса породы, цементирующая эти обломки, обладает неравномерной зернистой структурой. Такая структура называется



**Рис. 2.** Схематический разрез кимберлитовой трубки

порфировой. Она характеризуется присутствием крупных (от 0,5 до 5 см) округлых выделений индикаторных минералов кимберлитов – силикатов и оксидов Mg и Fe: оливина ( $Mg, Fe)_2[SiO_4]$ , пироксена (диопсида)  $CaMg[Si_2O_6]$ , граната (пирропа)  $Mg_3Al_2[SiO_4]_3$ , флогопита  $K(Mg, Fe)_2[AlSi_3O_{10}](OH)_2$ , хромита ( $FeCr_2O_4$ ), ильменита ( $FeTiO_3$ ). Эти мегакристаллы сцементированы мелкокристаллической массой, в которой присутствуют те же минералы, но другого размера (менее 0,1 мм), другой формы и другого состава, а также карбонаты, фосфаты и оксиды Ca: кальцит  $Ca[CO_3]$ , апатит  $Ca_5[PO_4]_3(F, OH)_2$ , перовскит ( $CaTiO_3$ ).

## КИМБЕРЛИТЫ И АЛМАЗЫ

Практическое значение кимберлитов определяется тем, что с этими породами связаны первичные (коренные) месторождения алмаза – алмазонасные кимберлитовые трубки. За счет их разрушения и размыва (выветривания) образуются вторичные (россыпные) месторождения. Алмазонасные россыпи – это песчаные речные или прибрежно-морские отложения, в которых алмазы сохраняются и накапливаются благодаря своей меха-

нической и химической стойкости, тогда как другие минералы, слагающие кимберлиты, разрушаются (дробятся и растворяются). До 1960 года основная добыча алмазов (80%) приходилась на россыпные месторождения. Их гораздо легче искать. Блестящие кристаллы в речной гальке привлекают внимание не только специалистов-геологов, многие россыпные месторождения были найдены детьми. Например, первый уральский алмаз нашел 4 июля 1829 года 14-летний крепостной Павел Попов, а дети фермеров-буров обнаружили первые камни на берегах рек Оранжевой и Вааль в Южной Африке. Россыпные месторождения мелкие и быстро вырабатываются. Поэтому главная задача геологов – найти коренной источник россыпей. Эта трудная задача успешно решена, и после 1990 года более 75% мировой добычи алмазов приходится на долю коренных месторождений. Разрабатываются трубки, в которых содержание алмазов составляет от 0,5 до 6 карат (0,2 г) на 1 т породы. В 1990 году из восьми коренных месторождений (Аргайл, Орапа, Летлхакане, Джваненг, Мир, Удачная, Финш, Премьер) было добыто 66 млн карат алмазов. Добыча ведется двумя способами: открытым (экскаваторы роют огромные карьеры, из которых руду вывозят на самосвалах) и закрытым (строят подземные шахты). Одна из самых глубоких шахт в мире построена для добычи алмазов на кимберлитовой трубке «Де-Бирс». Ее глубина больше 1 км, и до закрытия рудника здесь добывали около 380 тыс. карат алмазов в год.

Добываемые из кимберлитов алмазы имеют различную форму и размер. Наиболее высоко ценятся прозрачные ювелирные камни. Самый большой из них – знаменитый алмаз «Кулинан» был найден в трубке «Премьер» в ЮАР 28 января 1905 года. Он весил 3106 карат (чуть более 600 г), и его стоимость была равна стоимости 94 т золота. В России самый большой кристалл найден в трубке «Мир» 23 декабря 1980 года. Он весит 342,5 карат. Доля таких больших ювелирных камней мала (0,38%), несколько выше доля ювелирных камней крупнее 10 карат (11,6%). Основную массу добываемых алмазов составляют технические и полуювелирные сорта. Среди них особое место занимают мелкозернистые сростки, состоящие из темноокрашенных кристалликов размером менее 0,1 мм. Такие сростки (карбонадо и фразезиты) достигают больших размеров (более 1 кг) и обладают очень большой твердостью. Например, образцы фразезита не поддаются обработке даже алмазной пилой.

Алмазы присутствуют не во всех кимберлитах. В настоящее время уже найдено более 1000 кимберлитовых тел, но алмазы установлены только в 200 трубках, а эксплуатируемых месторождений среди них только 23. Чтобы понять, почему не все кимберлитовые трубки

алмазоносны, ученые изучают условия образования кимберлитов.

Наибольший практический и научный интерес вызывают находки в кимберлитах алмазоносных ксенолитов – обломков глубинных пород, в которых алмаз является породообразующим минералом (рис. 3). Эти породы можно назвать алмазитами. В настоящее время известно более 200 таких находок. Одна из них представляет собой сросток черного алмаза с гранатом (пиропом) и пироксеном (диопсидом), найденный в трубке “Удачная”, который весит 2,3 кг. Среди алмазоносных ксенолитов по минеральному составу выделены две группы. Первую более многочисленную группу составляют образцы эклогитов (130 находок). Это кристаллические биминеральные горные породы, обедненные кремнием и обогащенные алюминием, состоящие из силикатов кальция и магния – зеленого диопсида и красно-оранжевого граната (альмандина). В качестве второстепенных минералов в них присутствуют оксиды и силикаты алюминия – корунд  $Al_2O_3$  и кианит  $Al_2[SiO_4]O$ , оксиды титана – ильменит  $FeTiO_3$ , рутил  $TiO_2$ , а также графит. Вторую группу глубинных ксенолитов составляют гранатовые перидотиты – магматические породы ультраосновного состава, обедненные кремнием и алюминием и обогащенные магнием и железом. Здесь главными породообразующими минералами являются силикаты магния и железа: оливин  $Mg_2[SiO_4]$ , энстатит  $Mg_2[Si_2O_6]$ , диопсид  $CaMg[Si_2O_6]$  и гранат (пироп). Кроме того, в небольших количествах присутствуют оксиды и сульфиды железа: хромит  $FeCr_2O_4$ , ильменит  $FeTiO_3$ , пирротин  $Fe_{1-x}S$ , пентландит  $(Fe, Ni)_8S_9$ . Часть ксенолитов несет следы пластических деформаций.

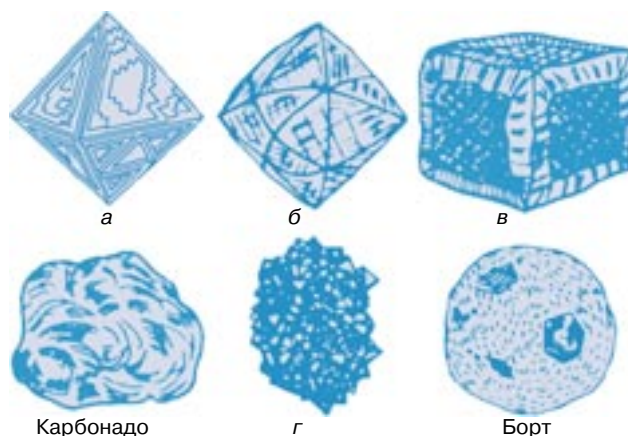


**Рис. 3.** Ксенолит алмазоносного эклогита из кимберлитовой трубки “Удачная” (Якутия): розовое – гранат, зеленое – диопсид, белое – алмаз. Фото М.А. Богомолова

Алмазы, найденные в ксенолитах перидотитов и эклогитов, различаются по форме, размеру и физическим свойствам. Алмазы из ультраосновных ксенолитов имеют форму правильных многогранников (октаэдров) и размеры 0,2–3,0 мм. Они характеризуются узким диапазоном вариаций изотопного состава углерода. Концентрация тяжелого изотопа углерода ( $\delta^{13}C$ ) колеблется от –9 до –2‰ (грамм на 1000 г вещества). Изучение их внутреннего строения показало, что это монокристаллы, первичной формой роста которых являлся октаэдр.

В ксенолитах эклогитов алмазы имеют разные размеры и форму. Это могут быть октаэдры, додекаэдры, сложно огранные многогранники, кубы (рис. 4). Наиболее крупный алмаз, найденный в ксенолите эклогита в трубке “Робертс Виктор” (ЮАР), имеет размер около 1 см и весит 5,75 карат, а в трубке “Удачная” обнаружены микрокристаллы размером 30–500 мкм. Эти алмазы характеризуются весьма широкими вариациями изотопного состава углерода ( $\delta^{13}C$  от –34 до +1‰). Изучение их внутреннего строения показало, что по классификации Ю.Л. Орлова (1984) они принадлежат к разным типам (см. рис. 4). Среди них преобладают однородные монокристаллы, первичной формой роста которых являлся октаэдр (тип I). Кроме того, встречены разноокрашенные (желтые и черные) монокристаллы, первичной формой роста которых был куб (типы II и III), а также неоднородные по внутреннему строению кристаллы в оболочке (тип IV), кристаллы с многочисленными включениями графита (тип V) и поликристаллические сростки (типы VII, VIII).

Очевидно, что алмазоносные ксенолиты должны кристаллизоваться при температурах и давлениях, при которых стабилен алмаз. Диаграмма плавкости углерода



**Рис. 4.** Разнообразие форм нахождения алмазов в кимберлитах: а–в – кристаллы (а – октаэдры, б – ромбододекаэдры, в – кубы), г – поликристаллические агрегаты

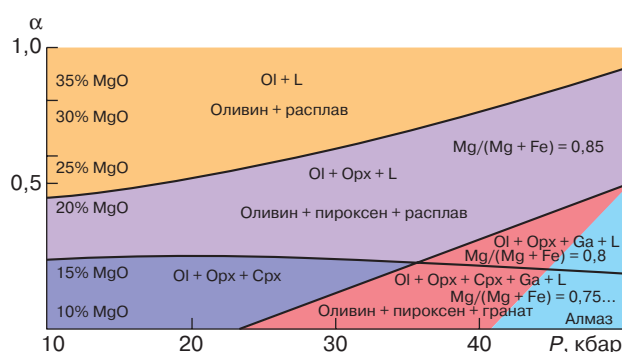


была изучена еще в 1963 году американским исследователем Банди. Он установил, что алмаз является высокобарной полиморфной модификацией углерода, устойчивой при давлениях выше 40 кбар и температурах около 1000°C. Это позволило предположить, что именно такими были условия кристаллизации глубинных пород, обломками которых являются алмазоносные ксенолиты. Ученые сделали вывод, что алмазы кристаллизуются на больших глубинах в мантии Земли, а кимберлиты являются своеобразными транспортерами, доставляющими их на поверхность Земли.

## МАНТИЙНЫЕ КСЕНОЛИТЫ И МОДЕЛИ ОБРАЗОВАНИЯ КИМБЕРЛИТОВ

Помимо алмазоносных ксенолитов глубинные включения в кимберлитах могут быть представлены обломками пород без алмаза или мономинеральными желваками (мегакристами) различных минералов, также являющихся продуктами разрушения глубинных горных пород. Условия образования таких ксенолитов можно реконструировать с использованием минеральных геобарометров и геотермометров. Использование химического состава минералов для оценки температуры и давления при кристаллизации горных пород основано на результатах многочисленных экспериментов и термодинамических расчетов. Установлено, что когда два минерала одновременно кристаллизуются из расплава, то химические элементы, составляющие расплав, закономерно перераспределяются между ними в зависимости от температуры и давления, при которых проходит процесс кристаллизации. Таким образом, условия кристаллизации глубинных пород могут быть рассчитаны на основании коэффициентов распределения и растворимости некоторых элементов в сосуществующих минералах. Например, данные о температуре кристаллизации можно получить зная отношение  $Ca/(Ca + Mg)$  в диопсидах, так как более низким отношениям  $Ca/(Ca + Mg)$  соответствуют более высокие температуры.

Вычисленные по минеральному составу ксенолитов глубины были сопоставлены с результатами экспериментальных исследований по плавлению искусственных силикатных смесей, отвечающих по составу ксенолитам из кимберлитов. Результаты экспериментов представлены на рис. 5. Они показали, что с изменением давления и температуры наблюдаются последовательные изменения в минеральном составе кристаллизующихся из расплава твердых фаз. Используя проведенные оценки и учитывая присутствие в ксенолитах минералов, устойчивых при высоких давлениях (гранат, шпинель), было проведено разделение мантийных ксенолитов по глубине образования. Установлено, что наибольшим глубинам и давлениям отвечают ксенолиты высокомагнезиальных гранатосодержащих перидо-



**Рис. 5.** RT-диаграмма плавления гранатового перидотита. Показаны поля устойчивости различных минеральных фаз в зависимости от степени плавления  $\alpha$  и давления  $P$ . Голубым цветом выделено поле расплава с весовым отношением  $CaO/Al_2O_3 > 1$

титов (>40 кбар, 200–250 км) и коэситовые эклогиты (34–40 кбар, 150–120 км).

Коэсит – полиморфная разновидность  $SiO_2$ , устойчивая при высоких давлениях, которая, как показали эксперименты, является весьма неустойчивой и при температуре ниже 700°C в присутствии воды менее чем за 10 ч превращается в кварц. Присутствие коэсита в ксенолитах означает, что их подъем на поверхность произошел так быстро, что часть коэсита не успела преобразоваться в кварц. По степени трансформации коэсита в кварц была оценена скорость подъема кимберлитовой магмы с глубины 200 км, составившая более 10 км/ч. Такие большие скорости позволили предположить, что в образовании кимберлитов большую роль играли флюиды – особые смеси перегретой воды и газов ( $CO_2$ , метана).

Роль флюидов в процессе образования кимберлитовых магм подтверждена экспериментально. Эксперименты показали, что добавление к расплаву воды приводит к заметному снижению температур кристаллизации твердых фаз и в условиях, соответствующих глубинам порядка 100 км, тугоплавкие алюмосиликаты, слагающие мантийные ксенолиты, начинают вести себя как легкорастворимые соли. Результаты экспериментов позволили предположить, что в мантии возможны и эффективны процессы флюидного массопереноса, хотя раньше считалось, что на таких глубинах породы должны быть “сухими”.

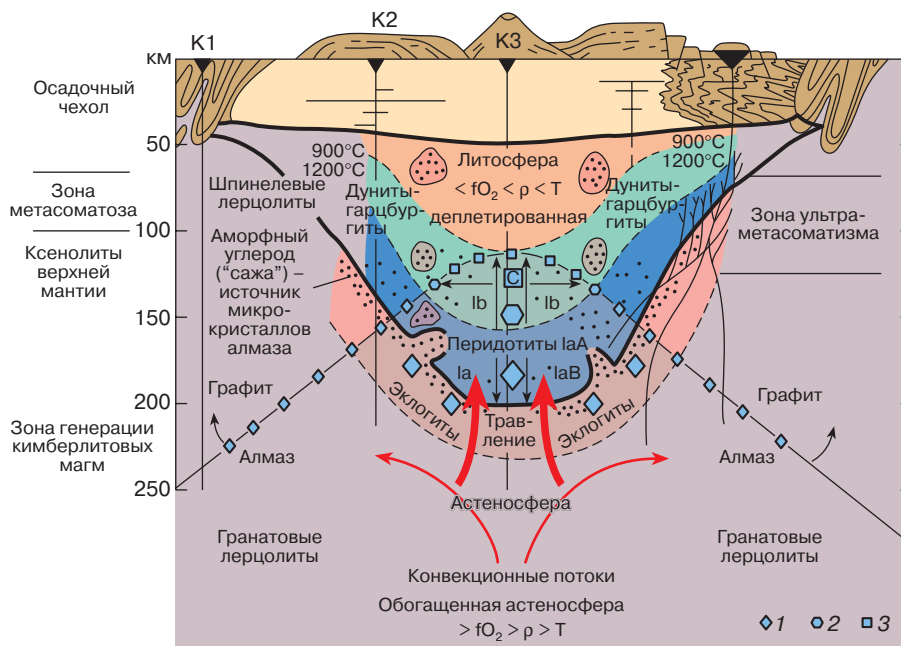
Данные о значительной роли флюидов в образовании кимберлитов были подтверждены при детальном изучении природных образцов. Наблюдаемые в ксенолитах из кимберлитов преобразования первичных минералов под воздействием мантийных флюидов, объединенные названием “мантийный метасоматоз”, весьма разнообразны. Чаще всего наблюдается замещение

граната гидроксилсодержащими силикатами с образованием келифитовых кайм – радиально-лучистых, концентрически-зональных микрокристаллических полиминеральных агрегатов, состоящих из амфиболов, слюды (флогопита), пироксенов и шпинели. Такие каймы образуются при давлении около 1–3 ГПа и температуре 1100–1350°C. Метасоматическими процессами объясняют широкие вариации температур (от 700 до 1200°C), получаемые при оценках  $P$ – $T$ -параметров кристаллизации ксенолитов, а также частичное плавление кристаллов граната. Предполагается, что плавление происходило до захвата ксенолитов кимберлитом и обусловлено резким падением давления и воздействием высокотемпературных мантийных флюидов.

На основании полученных экспериментальных данных и проведенных исследований глубинных ксенолитов были предложены различные модели формирования алмазоносных кимберлитов. Все они основаны на допущении существования глубинного мантийного магматического очага, из которого вещество доставляется к поверхности с участием смеси газов и жидкости

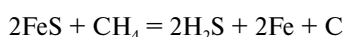
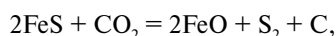
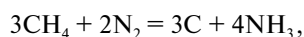
(флюидов). Современные модели учитывают не только температуру и давление, но и такие важные факторы, как присутствие в системе воды, углекислоты, а также изменение летучести (фугитивности) кислорода, то есть окислительно-восстановительный потенциал системы. Это важно для установления поля стабильности алмаза, который может кристаллизоваться лишь в восстановительных условиях, а в окислительных условиях “сгорает”, переходя в графит.

Одной из наиболее хорошо разработанных моделей является модель частичного плавления мантийных пород – гранатовых перидотитов и эклогитов. Согласно этой модели, кимберлитовые магмы образуются в областях под платформами на различных глубинах (от 200 до 100 км) вследствие плавления пород мантии и земной коры. Остатки родительских пород кимберлиты выносят в верхние части земной коры в виде ксенолитов. Наибольшее признание получила модель, предложенная американским исследователем С. Хаггерти, который предположил, что источником углерода для кристаллизации алмазов могут быть мантийные флюиды, из ко-



**Рис. 6.** Схема, иллюстрирующая модель образования алмазоносных кимберлитов (по С. Хаггерти). Использован типичный разрез земной коры (литосферы) с мощностью под кратонами более 40 км. Слева дана шкала глубин, с которых выносятся ксенолиты. Штриховыми линиями показаны предполагаемое положение изотерм 900 и 1200°C и граница перехода графита в алмаз. Геометрическими символами по кривой графит–алмаз и на разрезе обозначены формы кристаллов алмаза: 1 – высокотемпературные октаэдры, 2 – промежуточные кубооктаэдры, 3 – низкотемпературные кубы. Большими красными стрелками показаны ослабленные зоны, по которым в литосферу проникают окисленные расплавы, что приводит к травлению (или даже полному растворению) кристаллов алмаза. К1, К2, К3 – выходы кимберлитовых трубок, расположенных в различных частях кратона

торых углерод выделяется за счет окисления  $\text{CH}_4$  или восстановления  $\text{CO}_2$ . Большую роль при этом играют сульфиды железа ( $\text{FeS}$ ), которые постоянно встречаются как включения в алмазах и алмазоносных ксенолитах. Возможные реакции, приводящие к появлению свободного углерода, выглядят следующим образом:



Согласно предложенной модели, кимберлитовые трубки — это особый тип вулканов, корни которых уходят в глубь Земли, достигая границы земной коры и мантии (рис. 6). Кимберлиты состоят в основном из силикатов железа (оливина и флогопита), а алмазы в них являются чужими (ксеногенными) минералами. Кристаллы алмазов растут в мантии, в среде, насыщенной летучими компонентами, в течение нескольких миллионов лет, а потом выносятся на поверхность кимберлитами. Алмазы — древние минералы, они существенно старше вмещающих их кимберлитов. Их возраст (более 3 млрд лет) соответствует возрасту пород, слагающих фундамент континентальных кратонов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мантийные алмазы, кристаллизуясь в области их термодинамической стабильности при  $P = 40$  кбар и  $T = 1000^\circ\text{C}$ , выносятся на поверхность магматическими породами щелочно-ультраосновного состава — кимберлитами. Наибольшее число разрабатываемых в настоящее время месторождений алмаза относится к кимберлитам, поэтому эти породы являются объектом пристального внимания геологов, петрологов и минералогов. Геологи различного профиля изучают геологическую позицию кимберлитовых тел и тектонический режим, контролирующий их размещение, механизм формирования и заполнения диатрем, зональность ким-

берлитовых трубок и провинций, их петрохимию и связь с другими магматическими породами глубинного заложения, стадийность минералообразования в кимберлитах, генезис алмаза и сопутствующих ему минералов.

Помимо рассмотренных в статье существует много различных моделей формирования кимберлитов. Предлагается также несколько моделей кристаллизации алмаза как в условиях мантии, так и вне ее. Несомненно, что результаты будущих исследований в различных областях естествознания (геологии, физики, химии) с участием специалистов будут способствовать решению этой исключительно важной проблемы современной геологии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лоусон Дж. Кимберлиты и ксенолиты в них. М.: Мир, 1983. 300 с.
2. Соболев Н.В. Глубинные включения в кимберлитах и проблема состава верхней мантии. Новосибирск: Наука, 1974. 264 с.
3. Харьков А.Д., Зинчук Н.Н., Крючков А.И. Коренные месторождения алмазов мира. М.: Недра, 1998. 554 с.

Рецензент статьи Д.Ю. Пушаровский

\* \* \*

Татьяна Владимировна Посухова, кандидат геолого-минералогических наук, доцент геологического факультета МГУ. Член комиссии по драгоценным камням Международной минералогической ассоциации и Международного общества по прикладной геологии. Область научных интересов — генетическая минералогия, минералогическое материаловедение, минералогия месторождений алмаза и золота. Автор и соавтор более 70 статей и двух пособий.