



ПРИРОДА УНИКАЛЬНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ СОСТАВА И РАСПРОСТРАНЕНИЯ КИМБЕРЛИТОВ

В.С.Шкодзинский (Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Якутск)

Показано, что все уникальные особенности кимберлитов обусловлены формированием их из последних остаточных расплавов магматического океана. С этим связаны их образование преимущественно в фанерозое на древних платформах, богатство расплавофильными компонентами и относительно небольшой размер тел. Невысокая первичная температура магм способствовала их декомпрессионному затвердеванию на малоглубинной стадии подъема, взрыву их под влиянием законсервированного высокого внутреннего давления газовой фазы и формированию трубок и различных брекчий.

Ключевые слова: происхождение кимберлитов, магматический океан, декомпрессионное затвердевание.

Шкодзинский Владимир Степанович, shkodzinskiy@diamond.ysn.ru

GENESIS OF KIMBERLITE COMPOSITION AND PLACING PECULIARITY

V.S. Shkodzinskiy

Shown that all peculiarity of kimberlite are result of their origin from last residual melt of magma ocean. That is cause of their origin during last 500 millions years on ancient platforms, of high contents H_2O , CO_2 and of small size of pipes. Small initial temperature is cause of magma decompression solidification during ascent, of their explosion under high inner gas pressure and of origin of pipes and breccias.

Key words: kimberlite genesis, magma ocean, decompression solidification.

Выяснение генезиса кимберлитов проводится в целях эффективного прогноза и поисков новых алмазных месторождений. Решение этой проблемы оказалось затруднительным, поскольку кимберлиты сильно отличаются от других магматических пород. Первые старатели, которые почти полтора века назад копали «желтую землю» в Южной Африке в окрестностях г. Кимберли в надежде найти крупный алмаз, сначала предполагали, что данная порода имеет осадочное происхождение. На это, казалось бы, указывает присутствие в ней округлых и угловатых обломков различных пород и минералов. Однако постепенно обнаружили, что рыхлая «желтая земля» с глубиной переходит в более плотную «синюю землю». Тела ее секут вмещающие породы и, следовательно, имеют магматическое происхождение. «Желтая земля» возникла в результате выветривания кимберлитов.

Если кимберлиты имеют магматическое происхождение, то наиболее часто они должны были бы встречаться в океанических областях, где в настоящее время находится огромное количество действующих вулканов. Здесь земная кора небольшой мощности, и кимберлитовым магмам легче достигать земной поверхности. Однако кимберлиты рас-

полагаются только на древних платформах с мощной (до 40–50 км) жесткой кристаллической корой, слабопроницаемой для магм. Кимберлиты чаще всего образуют небольшие трубки, выполненные различными брекчиями. Такая форма залегания не свойственна другим магматическим породам. Несмотря на явно вулканическое происхождение, в окрестностях трубок обычно отсутствуют излившиеся наземные лавы. Кимберлиты содержат большое количество химических компонентов, характерных как для наиболее высокотемпературных (MgO , Cr_2O_3), так и низкотемпературных (H_2O , CO_2) расплавов. В них отмечается самое высокое содержание мантийных ксенолитов. Эти и другие загадочные особенности кимберлитов привели некоторых исследователей к заключению о том, что проблема происхождения данных пород в настоящее время далека от решения.

Обычно предполагается, что кимберлитовая магма образовалась на глубине 150–200 км в результате отделения выплавов из расплавленных примерно на 0,1% мантийных перидотитов. Лишь при подобной небольшой степени плавления расплав частично приближается по составу к кимбер-

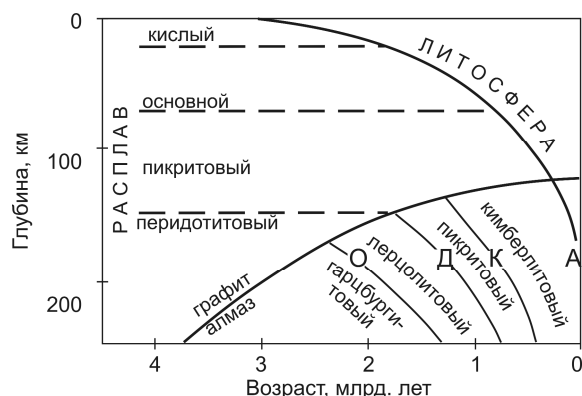


Рис. 1. Схема фракционирования постааккреционного магматического океана, формирования кимберлитового остаточного расплава и кристаллизации различных алмазов:

О — октаэдрических, Д — ромбодекаэдрических, К — кубических, А — агрегатов

литам. Однако такому генезису кимберлитовых магм противостоят экспериментальные данные [5], по которым отделение расплава из перидотитов начинается только при плавлении их более чем на 35–40%. При меньшей степени плавления отделению расплава препятствует прочный каркас сросшихся кристаллов минералов. Это подтверждается автохтонностью антектического жильного материала в мигматитах, даже при содержании его 40–45% [2]. Кроме того, для плавления необходимо повышение температуры. Но в многочисленных ксенолитах мантийных пород в кимберлитах массово наблюдается замещение высокотемпературных минералов низкотемпературными, что свидетельствует о значительном остывании мантии — на 400°C за последние 2 млрд. лет на глубине 150 км [3]. В них отсутствуют достоверные признаки разогрева и частичного плавления.

Выход из тупика в проблеме генезиса кимберлитов и других магматических пород появился в последние десятилетия после получения доказательств горячего образования Земли и наличия на ней в прошлом глобального океана магмы [3, 4, 6]. Оказалось, что с учетом процессов фракционирования этого океана становится понятной природа всех уникальных особенностей кимберлитов.

По рассчитанной модели формирования Земли [3] после быстрой аккреции железного ядра под влиянием в основном магнитных сил выпадавший силикатный материал в результате импактного тепловыделения плавился и сформировал глобальный магматический океан. Его нижняя часть кристаллизовалась вследствие роста давления новообразо-

ванных верхних частей. Осаждавшиеся кристаллы формировали породы нижней мантии, а всплывавшие остаточные расплавы — расслоенный по составу магматический океан. После прекращения аккреции кристаллизация и дифференциация океана сверху вниз (рис. 1) привели к образованию большинства ортопород древней кристаллической коры платформ из кислого верхнего слоя и их верхней мантии — из нижних пикритового и перидотитового слоев.

По экспериментальным данным [7] дифференциация перидотитового слоя при молекулярном отношении $\text{CO}_2/(\text{CO}_2+\text{H}_2\text{O})$ в магме $>0,6$ в условиях высокого давления способствовала образованию кимберлитовых остаточных расплавов. Интенсивное накопление в остаточном расплаве расплавофильных компонентов определило большое содержание в кимберлитах углекислоты, воды, легких редких земель. Причина их высокого содержания до сих пор была загадочна, поскольку мантийные породы, судя по ксенолитам в кимберлитах, почти не содержат эти компоненты. В связи с этим в них не могли выплавляться очень богатые ими расплавы. Вследствие большого давления в таких породах нет открытых пор и трещин, по которым можно было бы предполагать метасоматический привнос расплавофильных компонентов гипотетическими глубинными жидкостями. Модель накопления в остаточном расплаве при длительном магматическом фракционировании полностью объясняет их высокое содержание в кимберлитах.

Алмаз кристаллизовался в процессе фракционирования в результате увеличения концентрации углерода в остаточном расплаве при уменьшении содержания последнего. Возрастание вязкости остаточного расплава привело к росту степени насыщения его углеродом и эволюции образующихся алмазов в последовательности октаэдры — ромбодекаэдры — кубы — агрегаты (см. рис. 1). Это является причиной многообразия морфологии кристаллов алмаза в кимберлитах.

Древняя кристаллическая кора платформ и кимберлитовые остаточные расплавы перидотитового слоя образовались при одном и том же процессе дифференциации различных частей магматического океана. С этих позиций становится понятным присутствие кимберлитов только на платформах в участках с древней корой (правило Клиффорда). При формировании океанических областей кристаллическая кора и древняя верхняя мантия, содержащая кимберлитовые остаточные расплавы, были раздвинуты всплывавшим и растекавшимся горячим веществом нижней мантии. Всплывание обусловлено его подогревом изначально более го-

рячим ядром. Поэтому, несмотря на массовое распространение в океанических областях других магматических пород, в них отсутствуют кимберлиты.

В расслоенном по составу постаккреционном магматическом океане плотность сильно возрастала с глубиной (от 2,3 до 2,8 г/см³) и при остывании в нем не возникала обширная, от поверхности до дна, конвекция. Он остывал и фракционировал сверху вниз очень медленно в течение всей истории Земли в результате главным образом кондуктивных теплопотерь. Его нижний перидотитовый слой, где зарождались кимберлиты, начал кристаллизоваться сравнительно поздно. Это объясняет образование кимберлитов преимущественно в последние 500 млн. лет (средний изотопный возраст 236 млн. лет) и увеличение их количества в это время примерно в геометрической прогрессии [2].

Как свидетельствуют расчеты, в основании древних платформ среди твердых пород верхней мантии находятся участки, в которых до сих пор присутствует до 5–10% близкого к кимберлитам остаточного расплава. Судя по составу, он захватывался в виде включений наиболее поздними кубическими алмазами кимберлитов. Такие участки мантии имеют пониженную прочность и повышенную пластичность. При тектонических деформациях платформ они выжимались в зоны растяжения подобно тому, как выжимается полужидкое содержимое из разламываемого пирога с начинкой.

На рис. 2 приведена рассчитанная по экспериментальным и термодинамическим данным *PT*-диаграмма фазового состава и эволюции кимберлитовых магм с 10% H₂O и 10% CO₂:

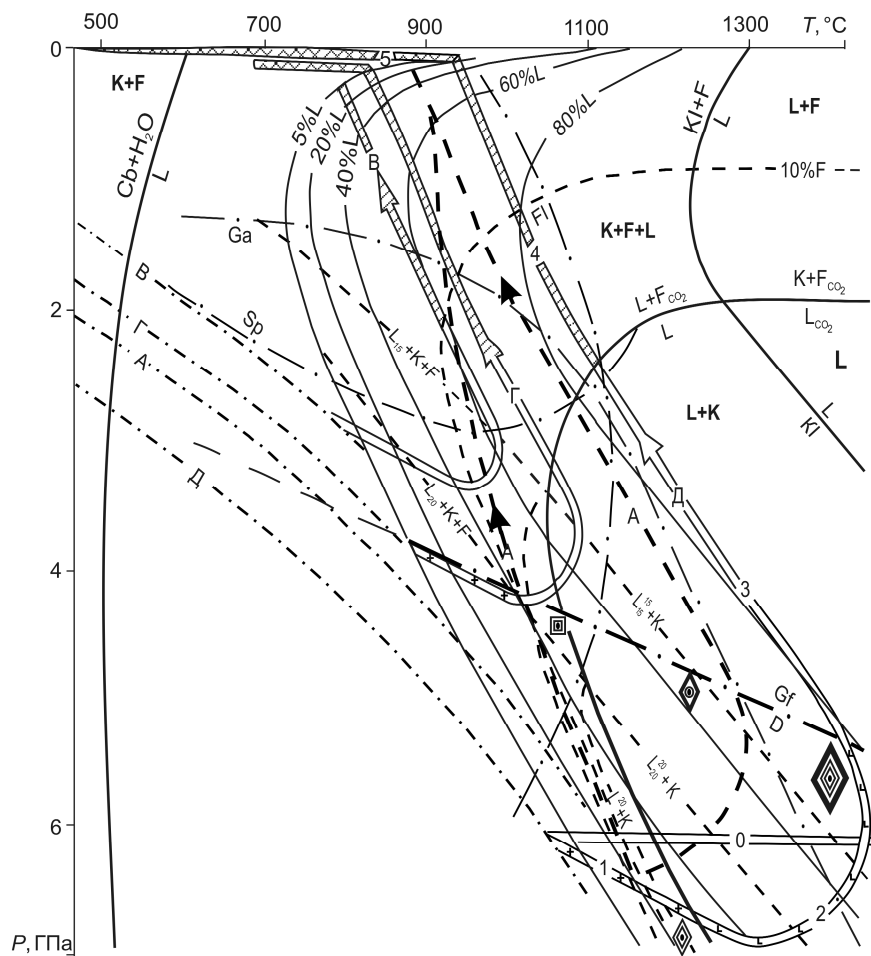


Рис. 2. *PT*-диаграмма фазового состава и эволюции кимберлитовых магм с 10% H₂O и 10% CO₂:

Sb — карбонаты; D — алмаз; Ga — гранат; Gf — графит; F — флюид; Fl — флогопит; L — расплав; K1 и K — твердые фазы кимберлита в ликвидусных и более низкотемпературных условиях; Sp — шпинель; L, L+F, L+K, L+K+F, K+F — поля разного фазового состава; 10%F, 20%L и др. — содержания флюида и расплава; содержания в расплаве: CO₂ — верхний индекс, H₂O — нижний; линии со стрелками: A, B, G, D — различные варианты выжимания и всплывания кимберлитовых магм, участок 0 — эволюция мантии при остывании океана магмы; 1–3 различные варианты изменения *P* и *T* в магмах на глубинных стадиях подъема; 4 — условия декомпрессионного затвердевания и 5 — эксплозивной дезинтеграции магм; штрих-пунктирные линии A, B, G, D — различные геотермические градиенты; рисунки кристаллов — условия образования алмазов различной морфологии [2]

вых магм [2]. Она представляет количественную модель этих магм и необходимую основу для решения вопросов генезиса кимберлитов. Возрастание значений изоконцентрат расплава (от 5% P_c до 84% P_c на линии эволюции магм D) иллюстрирует интенсивное плавление твердых фаз под влиянием декомпрессии и фракционного тепловыделения на глубинных стадиях выжимания смеси этих фаз с остаточным расплавом. Содержание расплава при подъеме могло увеличиваться в них в 10–17 раз. Это подтверждается примерно такими же величинами сни-

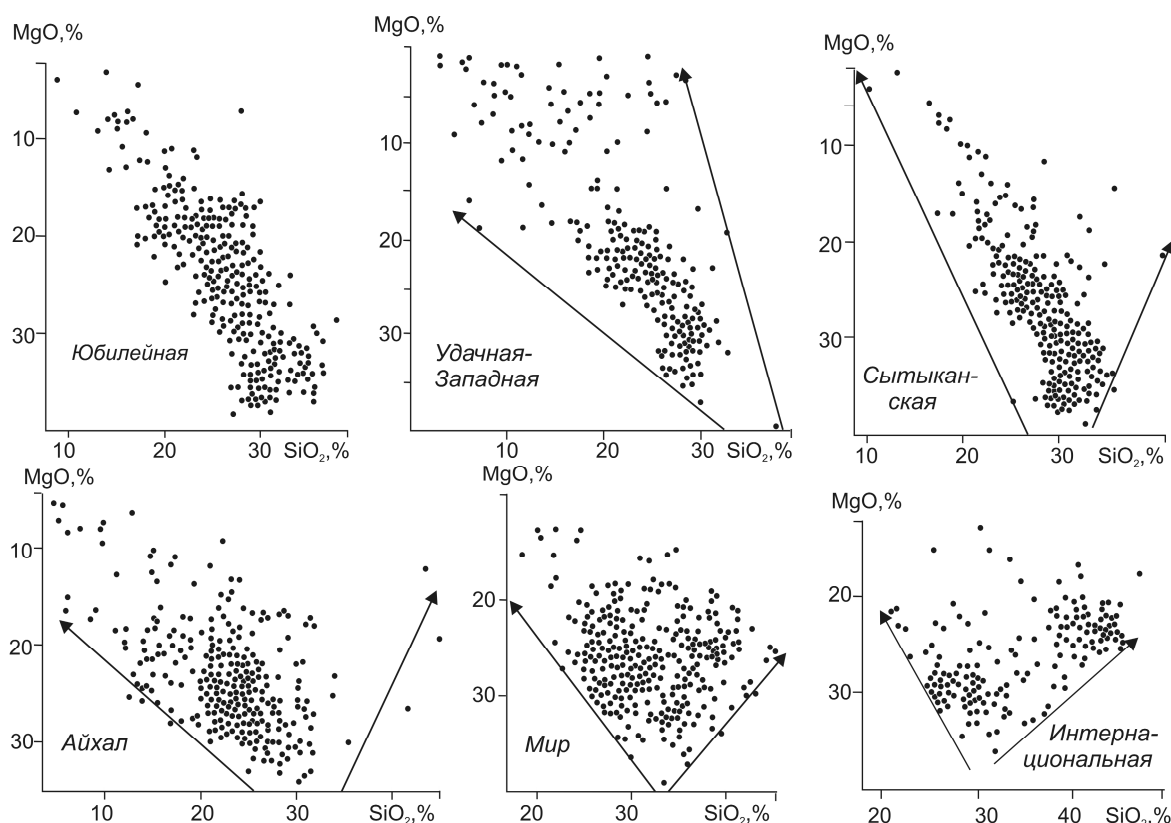


Рис. 3. Поля составов продуктивных кимберлитовых трубок Якутии на диаграммах MgO-SiO_2 , по данным [1]

жения содержания расплавовфильных легких редких земель в кимберлитах по сравнению с поздними расплавленными включениями в алмазах [4].

Кумулаты расслоенных интрузий обычно весьма неоднородны по составу. В них чередуются участки с различными количественными соотношениями минералов. Поэтому соотношения различных плавившихся минералов в разных частях поднимающихся магматических колонн должны были сильно варьировать. Плавление их при подъеме приводило к формированию кимберлитов разного состава. Из богатых оливином участков возникали кимберлиты близкие к пикритам, из существенно карбонатных — карбонатитовые, а из богатых флогопитом — кимберлиты с повышенным содержанием калия. Этим объясняются характерные для кимберлитовых трубок большие неоднородность и вариации их состава. Например, в промышленных трубках Якутии содержания MgO колеблются от 1 до 40%, а SiO_2 от 5 до 45% (рис. 3). Присутствие в кимберлитах остаточного и новообразованного при подъеме расплавов служит причиной обогащения их как низкотемпературными расплавовфильными компонентами (летучие, легкие редкие земли), так

и компонентами, характерными для высокотемпературных магм (магний, хром).

Формирование на поздней стадии остывания верхней мантии платформ обусловило относительно небольшую начальную температуру кимберлитовых магм (800–1050°C, см. рис. 2). Это привело к типичному только для кимберлитов высокому содержанию недоплавившихся при подъеме глубинных минералов — хромистых граната и диопсида, оливина, пикроильменита. Частичное плавление и истирание их при подъеме предопределяет часто округлую форму зерен этих минералов, что приближает кимберлиты по облику к осадочным породам. Кимберлитовые остаточные расплавы возникали в процессе формирования мантийных пород, пространственно были тесно с ними связаны и поэтому частично захватывали их при подъеме. Как известно, своеобразие кимберлитов состоит в значительном содержании ксенолитов различных мантийных пород.

На малоглубинной стадии подъема (участки 4 на линиях эволюции магм, см. рис. 2) летучие компоненты выкипали из расплава под влиянием декомпрессии. Поскольку эти компоненты являются сильнейшими плавнями, их удаление из распла-

ва приводило к его затвердеванию. При дальнейшем подъеме затвердевшие верхние части магматических колонн взрывались под влиянием законсервированного затвердеванием высокого внутреннего давления газовой фазы (участки 5).

При взрыве формировались конусообразные диатремы (рис. 4) и происходил захват раздробленным кимберлитовым материалом многочисленных обломков вмещающих пород. Это объясняет происхождение ярко выраженной обломочной текстуры большинства кимберлитов и залегание их преимущественно в виде трубок. Относительно невысокая первичная температура кимберлитовых магм обусловила декомпрессионное затвердевание всех их разностей и невозможность достижения земной поверхности в жидком состоянии (см. рис. 2). Поэтому отсутствуют излившиеся на поверхность кимберлитовые лавы. Этим кимберлиты кардинально отличаются от других магматических пород. Степень декомпрессионного затвердевания в магматических колоннах перед взрывом увеличивалась снизу вверх, что приводило к смене в кимберлитовых трубках магматических кимберлитов подводящей дайки жидкокластическими брекчиями с округлыми участками кимберлитового материала. Их обычно называют шаровыми кимберлитами. Выше располагаются пластичнокластические брекчии с менее округлыми участками (автолитовые кимберлиты), еще выше — твердокластические с угловатыми обломками (туфобрекчии, туфы).

Все участки литосферы древних платформ, образовавшихся в результате фракционирования постагрегационного магматического океана, перспективны на присутствие алмазоносных кимберлитов, если в них сохранились кимберлитосодержащие части верхней мантии. В настоящее время установлены большое количество (многие тысячи) кимберлитовых тел на всех древних платформах и широкое распространение алмазоносных россыпей даже в тех участках, где кимберлиты еще не выявлены.

Судя по содержанию в кимберлитах до тысячи хондритовых норм наиболее расплавофильных химических компонентов, легких редких земель, остаточные расплавы приобрели кимберлитовый состав после затвердевания исходных перидотитовых магм более чем на 99,9%. Из этого следует, что близкие к кимберлитам по составу участки в мантии имеют относительно небольшой объем, а возникавшие из них кимберлитовые тела чаще всего небольшой размер (сотни метров). Объем тел кимберлитов в тысячи–миллионы раз меньше объема наиболее распространенных магматических пород — гранитных интрузий и тел основных вулканитов.

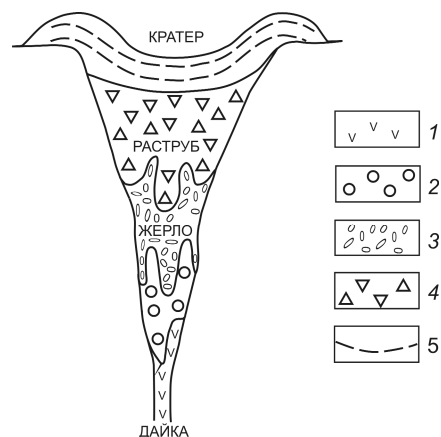


Рис. 4. Распределение интрузивных кимберлитов и explosивных брекчий в типичной кимберлитовой трубке [3]:

1 — интрузивные кимберлиты; эндогенные explosивные брекчии: 2 — жидкокластические, 3 — пластичнокластические, 4 — твердокластические, 5 — эпигенные твердокластические

Большая мощность перидотитового слоя магматического океана (многие десятки километров) привела к многоярусному расположению близких по составу к кимберлитам участков в верхней мантии платформ и их различной алмазоносности. Выжимание и всплывание разноглубинных полужидких кимберлитовых субстратов по одним и тем же зонам растяжения при тектонических деформациях — причина совмещения кимберлитовых трубок различного состава и алмазоносности даже в одном и том же поле. Присутствие близких по составу кимберлитов на всех древних платформах связано с всеземной первичной латеральной протяженностью перидотитового слоя магматического океана.

Формирование кимберлитопроводящих зон тектонических деформаций на платформах обусловлено главным образом механическим воздействием на них поднимающихся из нижней мантии потоков горячего вещества (плюмов). Под влиянием декомпрессии в плюмах происходило плавление эклогитов (затвердевших основных расплавов раннего магматического океана) и подъем основных магм из возникавших магматических очагов. Отсюда — широкое распространение покровов и секущих тел основных пород (траппов) в пределах и окрестностях кимберлитовых провинций.

Итак, новейшие данные о глобальном магматическом фракционировании при эволюции Земли позволяют разработать принципиально новую детальную модель образования кимберлитов и объяснить все специфические особенности их

состава и размещения. Кроме того, они могут использоваться при решении других генетических проблем геологии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Василенко В.Б., Зинчук Н.Н., Кузнецова Л.Г. Петрохимические модели алмазных месторождений Якутии. – Новосибирск: Наука, 1997.
2. Шкодзинский В.С. Фазовая эволюция магм и петрогенезис. – М.: Наука, 1985.
3. Шкодзинский В.С. Происхождение мантии, магм, кимберлитов и алмаза. – Saarbrücken: Palmarium academic publishing, 2012.
4. Шкодзинский В.С. Петрология литосферы и кимберлитов. – Якутск: Издательский дом СВФУ, 2014.
5. Arndt N.T. The separation of magmas from partially molten peridotite // *Carnegie Inst. Wash. Yearb.* 1977. Vol. 76. P. 424–428.
6. Hofmeister A.M. Effect of hadean terrestrial magma ocean on crust and mantle evolution // *J. Geophys. Res.* 1983. Vol. B88. N 6. P. 4963–4983.
7. Mysen B.O., Boettcher A.L. Melting of a hydrous mantle. 1. Phase relations of natural peridotite at high pressures and temperatures with controlled activities H₂O, CO₂ and H₂ // *J. Petrol.* 1975. Vol. 16. N 3. P. 520–548.