



ПРИРОДА ПАРАДОКСАЛЬНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ КИМБЕРЛИТОВ

В. С. ШКОДЗИНСКИЙ

Институт геологии алмазов и благородных металлов СО РАН, Якутск

shkodzinskiy@diamond.ysn.ru

На основании полученных доказательств горячей гетерогенной аккреции Земли и рассчитанной количественной модели кимберлитовых магм объясняется природа главных особенностей кимберлитов. Наличие их только в пределах древних кратонов обусловлено возникновением кратонов в результате кристаллизации океана магмы. Формирование кимберлитов из остаточных расплавов придонного перидотитового слоя океана магмы является причиной их обогащенности расплавофильными компонентами, наличия в них алмазов, небольшого объема тел и разобщенного распределения на больших площадях. Декомпрессионное затвердевание магм на малоглубинной стадии подъема является причиной взрыва под влиянием законсервированного давления газовой фазы и отсутствия кимберлитовых лав.

Ключевые слова: происхождение кимберлитов, магматический океан, модель кимберлитовых магм.

GENESIS OF PARADOXICAL FEATURES OF KIMBERLITES

V. S. Shkodzinskiy

Institute of Geology of Diamonds and Precious Metals SB RAS, Yakutsk

Based on the obtained evidence of hot heterogeneous accretion of the Earth and the calculated quantitative model of kimberlite magmas, the nature of the main features of kimberlites is explained. Their presence only within ancient cratons is conditioned by the crystallization of the magma ocean. The formation of kimberlites from residual melts in the bottom peridotite layer resulted in the enrichment of kimberlites with melt-like components, the presence of diamonds in them, the small volume of bodies and the scattered distribution. Decompression solidification of magmas at the shallow stage of ascent is the cause of the explosion under the influence of the preserved pressure of the gas phase and the absence of kimberlite lavas.

Keywords: origin of kimberlites, magmatic ocean, model of kimberlite magmas.

Введение

Кимберлиты резко отличаются от других магматических пород особенностями распространения и состава. Их главной особенностью является расположение исключительно на древних платформах при полном отсутствии в океанических и складчатых областях (правило Клиффорда), хотя интенсивные тектонические движения и массовый магматизм в этих областях создают, казалось бы, наиболее благоприятные условия для образования и внедрения кимберлитовых магм. Это составляет первый парадокс, связанный с кимберлитами. Второй парадокс связан с их размещением: на платформах алмазоносные разности кимберлитов приурочены к кратонам с возрастом кристаллического фундамента более полутора миллиардов лет, хотя такие участки наименее проницаемы для магм. Следующий парадокс состоит в большой временной амплитуде: средний возраст кимберлитовых трубок составляет 236 млн лет (рис. 1), а содержащихся в них алмазов — от трех миллиардов до сотен миллионов лет, в то время как возраст кристаллического фундамента кратонов превышает 1.5 млрд лет.

Кимберлиты выявлены на всех древних платформах, за исключением Антарктиды, что обусловлено, видимо, ее слабой изученностью. На Сибирской и Африканской платформах выявлены тысячи кимберлитовых трубок,

образующих так называемые поля. В кимберлитовых полях, занимающих площади менее тысячи квадратных километров, расположены иногда многие десятки кимберлитовых тел. Однако объем кимберлитов в каждом теле обычно меньше 1 км³, что в тысячи — миллионы раз меньше, чем у большинства других магматических тел. Непонятна причина небольшого размера и точечного размещения кимберлитовых тел, образующих кимберлитовые трубки, дайки, силлы, сложенные в основном субвуликаническими породами — различными брекчиями и туфами. Но даже в участках массового распространения трубок обычно отсутствуют кимберлитовые лавы. Этим кимберлиты сильно отличаются от других пород.

Судя по присутствию высокотемпературных глубинных минералов (оливина, граната, ильменита, пироксенов), кимберлитовые магмы образовались в условиях высокотемпературной мантии. Однако около кимберлитовых трубок во вмещающих породах обычно отсутствует контактный метаморфизм. Кимберлиты имеют, казалось бы, несовместимые особенности состава. Их минералы высокомагнезиальны (магнезиальность оливина обычно 84—97 %), что характерно для бедных либо литофильными компонентами магматических пород. Однако содержание типичного литофильного компонента K₂O превышает 1 %, а легких редких земель — почти ты-

Для цитирования: Шкодзинский В. С. Природа парадоксальных особенностей кимберлитов // Вестник геонаук. 2021. № 2 (314). С. 3—8. DOI: 10.19110/geov.2021.2.1

For citation: Shkodzinskiy V. S. Genesis of paradoxical features of kimberlites. Vestnik of Geosciences, 2021, 2 (314), pp. 3—8, doi: 10.19110/geov.2021.2.1

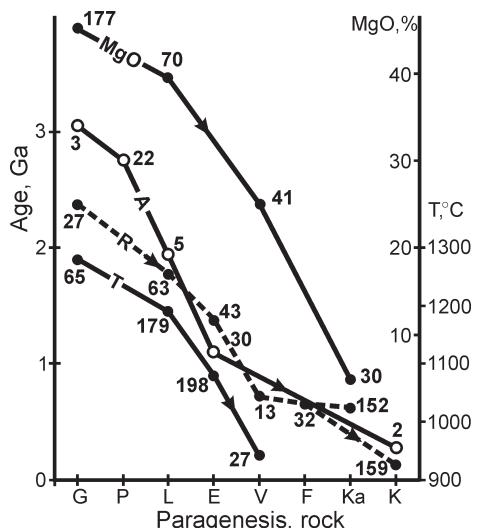


Рис. 1. Средние изотопные возрасты различных мантийных пород из ксенолитов в кимберлитах (линия R), включений в алмазах (линия A); средняя температура образования при 5 ГПа (линия T) и среднее содержание MgO в породах (линия MgO). Составы включений в алмазах и породах: G — гарцбургитовый, P — перидотитовый нерасчлененный, L — лерцолитовый, E — эклогитовый, V — верлитовый и вебстеритовый, F — флогопитсодержащие породы, Ka — карбонаты, K — кимберлиты. Числа у точек — количество использованных определений [6]

Fig. 1. Average isotopic ages of various mantle rocks from xenoliths in kimberlites (line R), inclusions in diamonds (A line); average formation temperature at 5 GPa (T line), and average MgO content in rocks (MgO line). Compositions of inclusions in diamonds and xenoliths: G — harzburgite, P — peridotite undifferentiated, L — lherzolite, E — eclogite, V — verlite and websterite, F — phlogopite-containing rocks, Ka — carbonates, K — kimberlites. The number of points — the number of used definitions [6]

сячи хондриевых норм, что не согласуется с высокой магнезиальностью этих пород. Непонятны преимущественно округлая форма зерен оливина в кимберлитах и частое присутствие в них более высокой магнезиальности внешней оболочки кристаллов по сравнению с центральными частями.

Генезис кимберлитовых магм

О природе этих особенностей высказывались самые различные, противоречащие друг другу предположения. Однако они не согласуются с имеющимися эмпирическими данными и основаны на устаревшей гипотезе холодной гомогенной аккреции Земли. В последние десятилетия получены многочисленные доказательства ее горячего гетерогенного образования. Об этом свидетельствуют расчеты [4], указывающие на импактный разогрев вещества Земли при аккреции до 34 000 °C, существование трендов магматического фракционирования в мантийных ксенолитах (линия MgO на рис. 1) и в раннедокембрийских кристаллических комплексах, полное соответствие изотопного возраста и температуры кристаллизации их различных пород последовательности образования при фракционировании (линии R и T на рис. 1), проекции наиболее древних геотермических градиентов в область очень высокой температуры на земной поверхности (до 1000 °C) и многие другие данные [6–11].

О гетерогенном формировании Земли свидетельствуют резкая химическая неравновесность мантийных пород с металлическим железом в отношении содержания хорошо растворимых в нем сидерофильных элементов и кислорода, распространение на ней воды и углекислоты, а не продуктов их восстановления металлическим железом и многие другие данные [4]. При гетерогенной аккреции ядро образовалось раньше мантии под влиянием магнитных сил, мощность которых при небольшом размере тел в миллиарды раз больше, чем гравитационных. Падавшие на него силикатные планетизмы плавились под влиянием импактного тепловыделения и сформировали океан магмы глубиной до 250 км. Кристаллизация и фракционирование его придонного слоя при аккреции под влиянием давления нагрузки формирующихся верхних частей и возрастание импактного тепловыделения привели к образованию сначала кислых, затем все более мафических остаточных расплавов и возникновению слоистости в магматическом океане (рис. 2). Длительная кристаллизация и фракционирование вещества сверху вниз под влиянием преимущественно кондуктивных теплопотерь после завершения аккреции обусловили сначала формирование раннедокембрийских комплексов и кислой коры из его верхнего слоя, затем литосферы древних платформ из более глубинных слоев. Эволюция состава остаточных расплавов

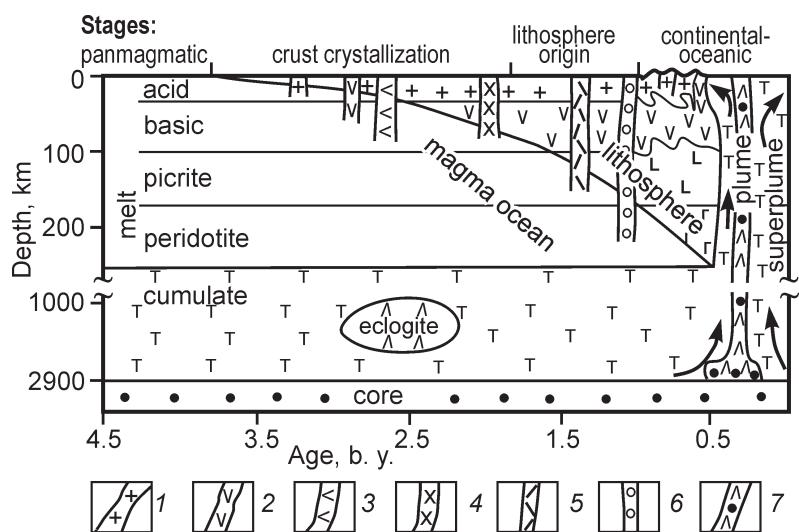


Рис. 2. Схема кристаллизации магматического океана и образования магм в различных геодинамических обстановках: 1 — кислых, 2 — основных, 3 — анортозитовых, 4 — щелочно-основных, 5 — щелочно-ультраосновных карбонатсодержащих, 6 — кимберлитовых, 7 — океанических и траппов, иногда с ксенолитами ядра

Fig. 2. Scheme of crystallization of the magma ocean and formation of magmas in different geo-dynamic settings: 1 — acid, 2 — basic, 3 — anorthositic, 4 — alkaline-basic, 5 — alkaline-ultra-basic with carbonatites, 6 — kimberlite, 7 — oceanic and traps, and sometimes contain xenoliths of the earth core



различных слоев от кислого к щелочно-ультраосновному объясняет генезис, состав и последовательность образования магматических пород на древних платформах [6].

При горячем образовании Земли кимберлитовые магмы возникали из остаточных расплавов придонного перидотитового слоя магматического океана, что согласуется с экспериментальными данными о формировании таких расплавов при давлении более 2.5 ГПа. Наиболее распространенным представлением [1, 5] об отделении кимберлитовых магм в поднимающихся плюмах от подплавленных примерно на 1 % перидотитов, предварительно метасоматически обогащенных лиофильными компонентами, противоречит отсутствие кимберлитов в океанических областях, хотя существование в них подъема плюмов не вызывает сомнений. Такому генезису противоречит исключительно высокая вязкость слабоподплавленных пород, равная примерно 10^{20} – 10^{22} пуз. Как показали расчеты [7], за всю историю Земли (4.5 млрд лет) в таких породах выплавки способны всплыть всего на доли миллиметра. Это подтверждается автохтонностью анатектического жильного материала в мигматитах даже при содержании его около 40 %.

Предположениям о возникновении магм под влиянием радиогенного тепловыделения [2] противоречат очень низкие содержания радиоактивных компонентов в мантийных породах, а также расчетные данные. Понимание радиоактивное тепловыделение обеспечивает лишь около 9 % современного теплового потока в земных недрах [4]. Остальное тепло является реликтовым, возникшим в результате импактного тепловыделения при акреции.

Широко распространенным представлениям о подъеме флюидов в мантии противоречат многочисленные экспериментальные данные об очень сильном (более чем на 500 °C) снижении температуры плавления мантийных пород при избытке летучих компонентов и высокая растворимость их в расплаве при высоком давлении, достигающая десятков процентов. Это иллюстрирует положение линий солидуса и ликвидуса на Р-Т-диаграмме для перидотитов с 0.5 % воды (рис. 3). По этой причине в мантии не может существовать самостоятельная флюидная фаза, все летучие в ней связаны в минералах или растворены в расплаве. В условиях земной поверхности летучие компоненты под влиянием низких давлений и температур должны выделяться и формировать включения, поэтому присутствие их в мантийных породах не свидетельствует о существовании флюида в мантии, который в случае необъяснимого гипотетического появления приведет к плавлению мантийных пород и полностью растворится в расплаве.

Явления замещения одних минералов другими, иногда наблюдающиеся в мантийных породах, обусловлены реакцией остаточных расплавов с ранними минералами магм. Это подтверждается большей низкотемпературностью, наличием поздних минералов и повышенным содержанием в них расплавофильных компонентов. Такие явления рассматриваются как доказательство существования метасоматических процессов, связанных с гипотетическим подъемом глубинных флюидов. Однако из-за очень высокого давления в мантии не могут существовать открытые трещины и поры, необходимые для подъема флюидов. Вследствие высокой вязкости мантии они не могут всплыть в ней и в виде пузырьков.

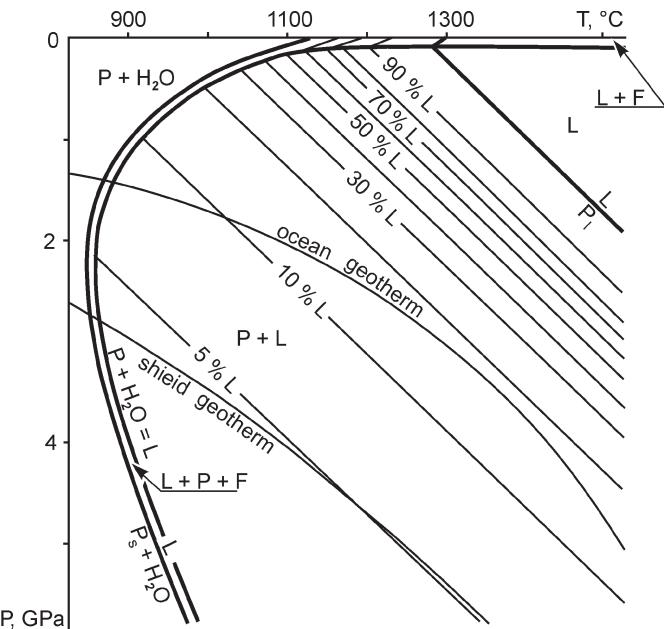


Рис. 3. Р-Т-диаграмма фазового состава перидотитовых магм с 0.5 % H_2O . F — флюидная фаза, L — расплав; P_s , P_l , P — твердые фазы перидотита соответственно в условиях солидуса, ликвидуса и в промежуточных

Fig. 3. P-T-diagram of phase composition for peridotite magma with 0.5 % H_2O . F — fluid, L — liquid, P_s , P_l , P — hard phases peridotite in conditions of solidus, liquidus and in intermediate conditions accordingly

Происхождение особенностей распространения и состава кимберлитов

Полученные данные о возникновении кимберлитовых магм из остаточных расплавов придонного перидотитового слоя магматического океана полностью объясняют все, казалось бы парадоксальные, особенности кимберлитов. Общепризнано, что океанические области образуются в результате раздвижения континентальной литосферы под влиянием подъема мантийных плюмов. Очевидно, что раздвижение удаляет из них родонаучальные для кимберлитовых магм продукты фракционирования придонного перидотитового слоя магматического океана. Это является причиной отсутствия кимберлитов в океанических областях. Иногда предполагается [5], что кимберлитовые магмы возникают в результате переплавления карбонатсодержащих осадочных пород, погруженных в мантию в зонах субдукции. Этому противоречит отсутствие кимберлитов и алмазов в этих зонах, а также повышенные содержания в кимберлитах калия и легких редкоземельных элементов, накапливающихся в остаточных расплавах, что однозначно указывает на ведущую роль магматического фракционирования в формировании кимберлитовых магм.

При остаточно-магматическом происхождении кимберлитовых магм они и раннедокембрийские комплексы являются продуктом кристаллизации одного и того же глобального магматического океана. Поэтому там, где нет возникших из верхнего слоя раннедокембрийских кристаллических комплексов, нет и родонаучального для кимберлитов его придонного перидотитового слоя. В участках наложения на древние комплексы более поздних гео-



логических процессов придонный перидотитовый слой в общем случае также должен быть нарушен. Это является причиной отсутствия в таких участках кимберлитов или редкого нахождения в них неалмазоносных разностей и объясняет приуроченность алмазоносных кимберлитов к древним кратонам. Кристаллизация магматического океана сверху вниз обусловила относительно небольшой (в среднем 236 млн лет, рис. 1) изотопный возраст большинства кимберлитов. Широко распространенные на древних платформах карбонатиты являются чаще всего более древними (в среднем 688 млн лет), так как их остаточные расплавы образовались в результате более раннего фракционирования менее глубинного пикритового слоя магматического океана.

Образование из остаточных расплавов объясняет повышенное содержание в кимберлитах калия, воды, углекислоты и легких редких земель, поскольку эти компоненты интенсивно накапливались в остаточном расплаве при высокобарическом фракционировании. Исходные перидотитовые магмы были высокомагнезиальными. Большая магнезиальность мало изменялась при высокобарическом фракционировании, так как вследствие огромного давления происходили повышенная кристаллизация и осаждение феррофильного граната, мало обеднявшие остаточный расплав магнием, но выносившие из него железо. Это объясняет редко встречающееся сочетание в кимберлитах большой магнезиальности и повышенного содержания многих расплавофильных компонентов, на основании чего они часто рассматриваются как гибридные породы, возникшие из метасоматически измененных глубинных пород. Как отмечалось выше, метасоматические процессы не могли происходить в мантии.

Судя по содержанию в кимберлитах почти до тысячи хондритовых норм, накапливающихся в остаточных расплавах легких редких земель, кимберлитовые расплавы образовались при затвердевании исходной перидотитовой магмы более чем на 99.9 %. Поэтому их объем в мантии в период образования кимберлитов был очень небольшим. Они, видимо, располагались в виде небольших линз и жил. Это объясняет относительно небольшой объем кимберлитовых тел. Широкое распространение глобального магматического океана на всей Земле обусловило повсеместное присутствие остаточных кимберлитовых расплавов в основании континентальной литосферы и является причиной образования и рассеянного распределения кимберлитов почти на всех древних платформах.

Мантийные ксенолиты в кимберлитах являются кумулатами перидотитовых магм, фракционировавших с образованием кимберлитовых остаточных расплавов. Это объясняет широкое распространение их в кимберлитах, иногда присутствие в них алмазов и эволюцию их состава в сторону кимберлитов (рис. 1).

Алмазы формировались в результате накопления в остаточном расплаве углерода, поскольку он почти не входил в состав кристаллизовавшихся породообразующих минералов. Формирование алмазов началось еще при ультраосновном составе придонного слоя. Это объясняет присутствие в них включений ультраосновного парагенезиса и наиболее древний их возраст (более 3 млрд лет, рис. 1). Вследствие накопления в остаточных расплавах многовалентных элементов (кремния, алюминия, титана) вязкость их повышалась в тысячи раз [6].

Это приводило к уменьшению скорости диффузии углерода, возрастанию степени пересыщения им расплавов, смене послойного тангенциального роста алмазов радиальным, октаэдрической морфологии возникавших кристаллов на ромбододекаэдрическую и кубическую и к образованию разнообразных скульптур на кристаллах. Из-за накопления расплавофильных компонентов в расплавах содержание примесей, и в частности азота, увеличивалось в тысячи раз от ранних алмазов к поздним.

Кимберлитовые магмы могли подниматься из различных по глубине частей перидотитового слоя. Очевидно, что наиболее высокоалмазоносными должны быть самые глубинные магмы. Вследствие повышенной плотности наиболее мафические магнезиальные и хромистые разновидности перидотитовых магм располагались в самых нижних частях перидотитового слоя. Это объясняет существование положительной корреляции между алмазоносностью кимберлитов и магнезиальностью и хромистостью содержащихся в них минералов.

Вследствие более древнего изотопного возраста включений в некоторых алмазах по сравнению с вмещающими их кимберлитами до настоящего времени широко распространены представления о захвате алмазов кимберлитовыми магмами при подъеме через мантию и, следовательно, о ксеногенном их генезисе. Однако таким представлениям противоречат изменение состава и возраста содержащихся в них включений в полном соответствии с закономерностями магматического фракционирования (рис. 1), резкое повышение содержания расплавофильных примесей от ранних алмазов к поздним, эволюция морфологии кристаллизовавшихся алмазов от октаэдров к додекаэдроидам и кубам, которая указывает на большой рост вязкости среды при их образовании. Многочисленным предположениям о кристаллизации алмазов в результате метасоматических процессов противоречат признаки невозможности существования флюидной фазы в мантии.

Происхождение кимберлитовых тел

Для выяснения генезиса особенностей кимберлитов, связанных с процессами их кристаллизации, необходимо иметь количественную Р-Т-диаграмму их фазового состава и эволюции при подъеме. Такая диаграмма приведена на рис. 4. Она впервые построена на основе рассчитанной по опубликованным экспериментальным и термодинамическим данным Р-Т-диаграммы состояния системы «перидотит — вода — углекислота» [7]. На диаграмме фазового состава содержание летучих компонентов заданное. Оно равно наиболее распространенному количеству их в природных магмах — по 10 мас. % воды и углекислоты. Диаграмма выявила существование неизвестных и мало известных явлений в кимберлитовых магмах. В них, как и в других магмах, выделяется 4 поля, различающихся по фазовому составу: расплав, расплав + твердые фазы, расплав + флюид, расплав + твердые фазы + флюид. Несмотря на высокие концентрации летучих компонентов, флюидная фаза присутствует только в малоглубинных относительно низкотемпературных условиях, при высоких температуре и давлении она полностью растворена в расплаве.

На диаграмме линии со стрелками показывают эволюцию магм при подъеме. Она рассчитана с учетом всех факторов эволюции: декомпрессии, фрикционного тепловыделения, теплоотдачи во вмещающие породы, теп-

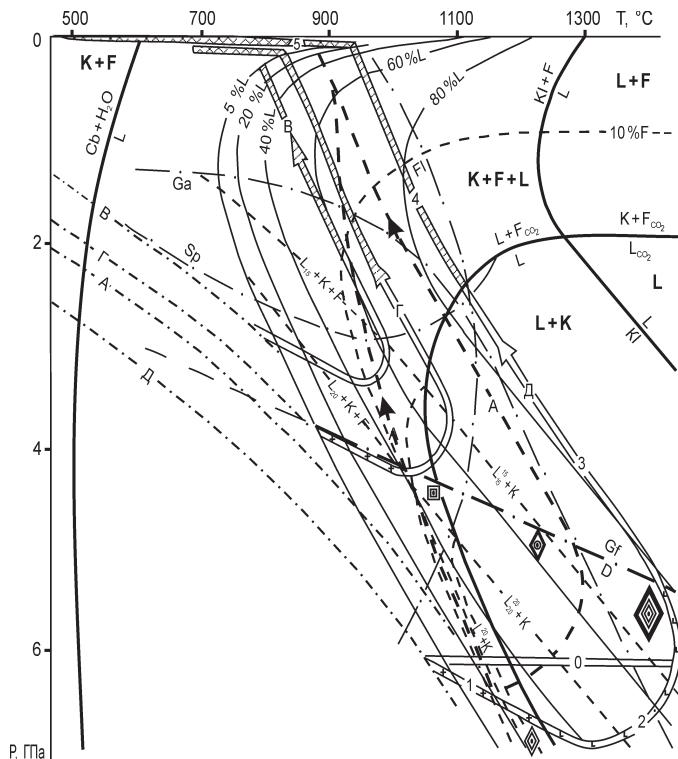


Рис. 4. Р-Т-диаграмма фазового состава и эволюции кимберлитовых магм (линии со стрелками А — Г) с содержанием по 10 % H_2O и CO_2 . Сб — карбонат, Д — алмаз, Га — гранат, Гф — графит, Сп — шпинель. Ф — флюид, К — твердые фазы кимберлита, L^{20}_{20} — расплав и содержание в нем H_2O (нижний индекс) и CO_2 (верхний). На линиях эволюции: 0 — образование мантии; 1 и 2 — этапы интенсивного соответственно фрикционного и декомпрессионно-фрикционного плавления; 3, 4 и 5 — этапы соответственно декомпрессионного плавления, декомпрессионного затвердевания и эксплозивной дезинтеграции. А — Г — линии геотермических градиентов. Рисунки кристаллов — морфология возникающих алмазов

Fig. 4. P-T-diagram of the phase composition and evolution of kimberlite magmas (lines with arrows A — G) with H_2O and CO_2 10% content. Сб — carbonate, Д — diamond, Га — garnet, Гф — graphite, Сп — spinel. Ф — fluid, К — hard phases of kimberlite, L^{20}_{20} — melt and content in it H_2O (lower index) and CO_2 (top). On evolution lines: 0 — mantle formation; 1 and 2 — stages of intensive correspondingly friction and decompression-friction melting; 3, 4 and 5 — stages of correspondingly decompression melting, decompression solidification and explosive disintegration. А — Г — geothermic gradients. Drawings of crystals — morphology of formed diamonds

лозатрат на расширение фаз при декомпрессии и на фазовые переходы [7]. В наиболее глубинном поле Рс + Тв линии эволюции магм при подъеме пересекают изоконцентраты расплава с увеличивающимися значениями, что свидетельствует о декомпрессионном плавлении твердых фаз при подъеме. Это объясняет окружную форму большинства ранних минералов в кимберлитах. Плавлением при подъеме обусловлена и широко распространенная более высокая магнезиальность внешних частей крупных кристаллов минералов по сравнению с внутренними. Например, в трубке Интернациональной магнезиальность внешних частей зерен оливина достигает 97 %, тогда как в его ядрах она составляет 83—94 % [13].

В поле Рс + Тв + Ф линии эволюции магм при подъеме пересекают изоконцентраты расплава с уменьшающимися значениями. Это иллюстрирует существование очень важного для понимания генезиса кимберлитов явления декомпрессионного затвердевания магм при подъеме. Оно обусловлено уменьшением концентрации летучих компонентов в расплаве, снижающих температуру плавления твердых фаз вследствие выделения их под влиянием снижения давления. Поэтому уменьшение их концентрации приводит к затвердеванию расплава путем образования твердых фаз, или остеклования. Вследствие больших затрат тепла на расширение флюидной фазы и на теплоотдачу в более холодные вмещающие породы температура магм сильно понижается.

Из-за резкого повышения вязкости декомпрессионно затвердевавших магм верхние части поднимающихся колонн кимберлитовых магм на малоглубинных этапах подъема переставали расширяться под влиянием законсервированного затвердеванием высокого давления флюидной фазы. На приповерхностных этапах подъема внутреннее давление флюидной фазы начинало превосходить прочность затвердевших частей магматических колонн и вмещающих пород. В результате этого происходила их эксплозивная дезинтеграция, формировались кимберлитовые тела, выполненные различными брекчиями.

Как показали расчеты [6], мощность взрывов вследствие большого объема взрывавшегося вещества в тысячи раз превосходила силу взрыва атомной бомбы, сброшенной на Хиросиму. Это объясняет дробление многокилометровых толщ перекрывающих пород и формирование протяженных кимберлитовых трубок. Как иллюстрирует диаграмма, все кимберлитовые магмы затвердевают при подъеме и поэтому не способны изливаться на земную поверхность. Это объясняет отсутствие кимберлитовых лав даже в участках широкого распространения кимберлитов.

Распространенным предположениям о фреатомагматическом происхождении взрывов кимберлитовых магм в результате быстрого превращения в пар грунтовых вод при соприкосновении их с кимберлитовой магмой [10] противоречит отсутствие взрывов при излиянии базальтовых лав в водные бассейны. В них раскаленная лава просвечивает сквозь воду и даже пара образуется немного. Это связано с низкой теплопроводностью воды. Вследствие этого небольшое количество возникающего пара успевает удаляться без взрывов. Флюидно-магматическая гипотеза взрывов в результате накопления летучих под затвердевшей верхней частью магматической колонны [12] не согласуется с отсутствием взрывов в затвердевших верхних частях подавляющего большинства интрузий и с образованием крупных трещин отдельности в кристаллизующихся магмах вследствие уменьшения объема при затвердевании. По этим трещинам газы могли свободно удаляться по мере выделения из расплава.

Декомпрессионное затвердевание магм не сопровождалось образованием трещин отдельности, так как микропузырьки газов выделялись в пластично деформировавшихся очень вязких остеклованных расплавах. Очевидно, что нижние части не полностью декомпрессионно затвердевших кимберлитовых колонн при взрыве являлись пластичными и формировали пластично-кластические и даже жидкокластические брекчии [6]. Это объясняет значительное разнообразие брекчий в кимберлитовых трубках. Образованию брекчий иногда предше-



ствовало формирование массивных кимберлитов, возникавших, видимо, из невзрывавшихся более высокотемпературных магм. Это указывает на значительные вариации исходной температуры кимберлитовых магм даже в одном и том же регионе.

Как иллюстрируют линии подъема, при взрыве температура кимберлитового материала могла понижаться до менее чем 500 °С вследствие больших затрат тепла на сильное расширение флюида и на теплоотдачу в ксенолиты холодных вмещающих пород. Это объясняет обычно отсутствие термального метаморфизма вмещающих пород на контакте с кимберлитовыми брекчиями и приконтактовых изменениях. Вследствие низкой температуры и высокого содержания летучих компонентов дезинтегрированный остеклованный расплав после взрыва замешался низкотемпературными серпентином, хлоритом, карбонатами. Поэтому низкотемпературность не свидетельствует о возникновении кимберлитовых трубок путем прорыва относительно холодной смеси газов с кристаллами минералов, как иногда предполагается некоторыми исследователями [3].

Заключение

Таким образом, все парадоксы и загадочные на первый взгляд особенности кимберлитов находят полное объяснение при учете современных данных о горячей аккреции Земли и рассчитанной количественной модели кимберлитовых магм. Существование нерешенных генетических вопросов кимберлито- и алмазообразования связано с недостаточной разработанностью теории эндогенных процессов.

Полученные результаты могут способствовать более успешному прогнозу и поиску алмазоносных кимберлитов.

Литература

1. Добрецов Н. Л. Основы тектоники, геодинамики. Новосибирск: Изд. НГУ, 2011. 492 с.
2. Милашев В. А. Трубки взрыва. Л.: Недра, 1984. 268 с.
3. Портнов А. Н. Флюидный диапиритм и генезис алмазов в кимберлитах // Бюлл. МОИП. 1997. Т. 59. Вып. 6. С. 35–53.
4. Рингвуд А. Е. Происхождение Земли и Луны. М.: Наука, 1982. 294 с.
5. Сорохтин О. Г. Развитие Земли. М.: МГУ, 2002. 506 с.
6. Шкодзинский В. С. Глобальная петрология по современным данным о горячей гетерогенной аккреции Земли. Якутск: Изд. СВФУ, 2018. 274 с.
7. Шкодзинский В. С. Фазовая эволюция магм и петрогенезис. М.: Наука, 1985. 232 с.
8. Шкодзинский В. С., Толстов А. В. Генезис кимберлитовых магм и алмаза по результатам корреляции его кристалломорфологии с составом вмещающих кимберлитов // Записки РМО. 2009. Т. 138. № 3. С. 1–14.
9. Шкодзинский В. С., Толстов А. В. Признаки алмазоносности кимберлитов // Наука и образование. 2007. № 4. С. 11–16.
10. Lapin A. V., Tolstov A. V., Antonov A. V. Sr- and Nd-isotopic composition of kimbeline and associated rocks of the Siberian craton // Doklady Earth Sciences. 2007. T. 414. No. 1. P. 557–560.

11. Lorenz V., Kuzlaukis S. Kimberlite pipes: growth models and resulting implications for diamond exploration // 8th International Kimberlite Conference. Long Abstract. Canada, 2003.

12. Skinner E. M., Marsh J. S. Kimberlite eruption processes // 8th International Kimberlite Conference. Long Abstract. Canada, 2003.

13. Yakovlev D. A., Kostrovitsky S. A., Suvorova L. F. Typomorphic features of groundmass minerals from kimberlites of Yakutia // 10th International Kimberlite Conference, Bangalore, 2012. 101KC-49.

References

1. Dobretsov N. L. *Osnovy tektoniki i geodinamiki* (Fundamentals of tectonics and geodynamics). Novosibirsk: NSU Publishing house, 2011, 492 p.
2. Milashov V. A. *Trubki Vzryva* (Diatreme). Leningrad: Nedra, 1984, 268 p.
3. Portnov A. N. *Fludnyj diapirizm i genesis almasov v kimerlitah* (Fluid diapirism and diamond genesis in kimberlites). Bull. MOIP., 1994, V. 59, 6, pp. 35–53.
4. Ringwood A. E. *Obrazovanie Zemli i Luny* (The origin of the Earth and the Moon). Moscow: Nedra, 1982, 294 p.
5. Sorohtin O. G. *Evoluzija Zemli v Dokembrii* (Evolution of the Earth in Precambrian). Moscow: MSU, 2002, 506 p.
6. Shkodzinskiy V. S. *Globalnaja petrologija po sovremennym dannym o gorjachei heterogennoj akkpezii Zemli* (Global petrology based on current data on hot heterogeneous accretion of the Earth). Yakutsk: SVFU, 2018, 244 p.
7. Shkodzinskiy V. S. *Fasovaja evoluzija magn i petrogenesis* (Phase evolution of magmas and petrogenesis). Moscow: Nauka, 1985, 232 p.
8. Shkodzinskiy V. S., Tolstov A. V. Genesis kimerlitovyh magn i almasa po resultatam korrelazii ego kristallomorfologii s sostavom vmeschajushchih kimerlitov (Genesis of kimerlie magmas according to correlation cristallomorphology with composition of kimberlites), Proceedings of RMS, 2009, V. 138, No. 3, pp. 1–14.
9. Shkodzinskiy V. S., Tolstov, A. V. *Prisnaki almasonnosti kimerlitov* (Evidences of diamond content in kimberlites). Nauka i obrasovanie (Science and education), 2007, No. 4, pp. 11–16.
10. Lapin A. V., Tolstov A. V., Antonov A. V. Sr- and Nd-isotopic composition of kimbeline and associated rocks of the Siberian craton. *Doklady Earth Sciences*, 2007, V. 414, No. 1, pp. 557–560.
11. Lorenz V., Kuzlaukis S. Kimberlite pipes: growth models and resulting implications for diamond exploration. 8th International Kimberlite Conference. Long Abstract. Canada, 2003.
12. Skinner E. M., Marsh J. S. Kimberlite eruption processes. 8th International Kimberlite Conference. Long Abstract. Canada, 2003.
13. Yakovlev D. A., Kostrovitsky S. A., Suvorova L. F. Typomorphic features of groundmass minerals from kimberlites of Yakutia. 10th International Kimberlite Conference, Bangalore, 2012. 101KC-49.