

Происхождение и закономерности размещения алмазоносных кимберлитов

Полученные доказательства горячей гетерогенной аккреции Земли привели к принципиально новому решению генетических проблем кимберлитов и алмазов. По этим данным, импактное тепловыделение при аккреции обусловило образование глобального магматического океана. Показано, что формирование кимберлитовых расплавов и алмазов в результате его фракционирования полностью объясняет все многочисленные особенности кимберлитов.

Ключевые слова: горячая аккреция, магматический океан, фракционирование, кимберлиты, алмаз.

V. S. SHKODZINSKIY (DPAMGI SB RAS)

Origin and patterns of diamondiferous kimberlite location

The obtained evidence of hot heterogeneous accretion of the Earth led to a fundamentally new solution to genetic problems of kimberlites and diamonds. According to these data, the impact heat generation during the accretion resulted in the formation of a global magmatic ocean. It is shown that the formation of kimberlites and their diamonds because of its fractionation is responsible for all numerous kimberlite features.

Keywords: hot accretion, magmatic ocean, fractionation, kimberlites, diamond.

Для цитирования: Шкодзинский В. С. Происхождение и закономерности размещения алмазоносных кимберлитов // Региональная геология и металлогения. – 2022. – № 89. – С. 50–58. DOI: 10.52349/0869-7892_2022_89_50-58

Введение. Выяснение генезиса и закономерностей размещения кимберлитов имеет основополагающее значение для их успешного прогноза и поисков. До последнего времени эта проблема не имела убедительного решения [6]. Как показал анализ [13], это связано с ошибочностью обычно использовавшейся для их решения гипотезы холодной гомогенной аккреции Земли, выдвинутой математиком О. Ю. Шмидтом в середине прошлого столетия. По этой гипотезе, наша планета сформировалась путем одновременного объединения под влиянием сил взаимного гравитационного притяжения относительно холодных железных и силикатных частиц протопланетного облака, захваченного гравитационным полем Солнца. Разделение этих частиц по плотности в земных недрах привело к образованию ядра, мантии и земной коры. Магмы образуются путем отделения выплавов в частично подплавленных глубинных породах.

Эта гипотеза не была обоснована геологическими данными. К настоящему времени установлено большое количество противоречащих ей явлений. Известно, что падающие метеориты плавятся и частично испаряются в результате импактного тепловыделения. Расчеты показали, что под его влиянием вещество Земли могло разогреться до 34 000 °С [8]. Это подтверждается присутствием трендов магматического фракционирования в мантийных ксенолитах и кристаллической коре, соответствием изотопного возраста

и температуры кристаллизации их различных пород последовательности образования при магматическом фракционировании, проекцией наиболее ранних геотермических градиентов в область очень высокой температуры (до 1000 °С) на земной поверхности, комплементарностью этих градиентов (3,5 град/км) распределению температур в магматическом океане, возникшем в результате импактного тепловыделения [14].

Резкая химическая неравновесность мантийных пород с металлическим железом [16] указывает, что силикатные и железные частицы никогда не были перемешаны в земных недрах. Железные частицы объединились раньше силикатных под влиянием магнитных сил, поскольку при небольшом размере частиц они были в миллиарды раз мощнее гравитационных. Наглядно это иллюстрирует быстрое объединение намагниченных мелких железных предметов, тогда как под влиянием сил взаимного гравитационного притяжения они никогда не объединяются. Солнце в это время имело в тысячи раз более мощное магнитное поле, чем современное, поскольку находилось на эволюционной стадии Т Тельца. Поэтому оно сильно намагнитило железные частицы, что подтверждается намагниченностью железа в метеоритах.

Происхождение геосфер и кимберлитовых магм. Расчеты [13] свидетельствуют, что выпадавшие на железное ядро силикатные частицы

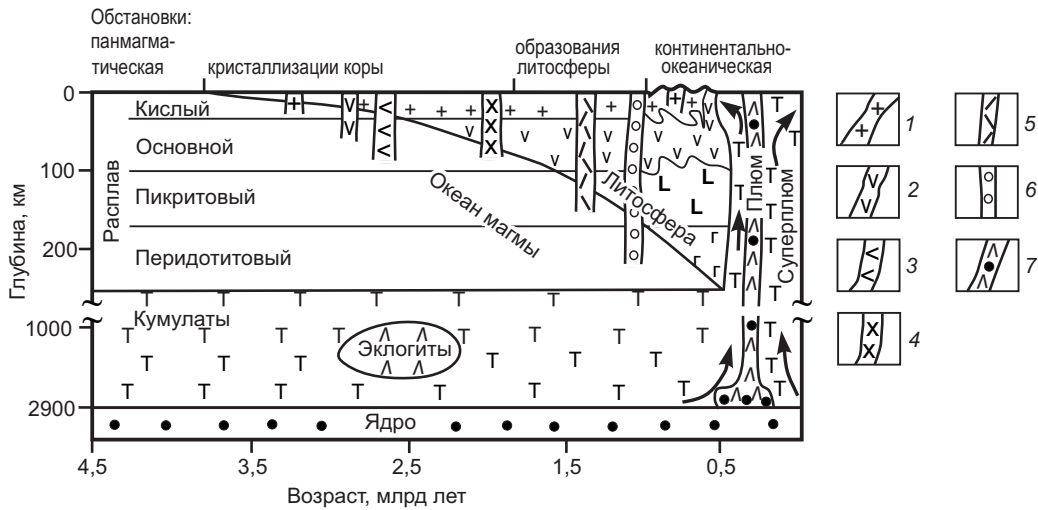


Рис. 1. Схема образования различных геодинамических обстановок и магм

1 – кислых; 2 – основных; 3 – анортозитовых; 4 – щелочно-основных; 5 – щелочно-ультраосновных карбонатитсодержащих; 6 – кимберлитовых; 7 – океанических и траппов, иногда включающих ксенолиты ядра

плавилась под влиянием импактного тепловыделения и сформировали глобальный магматический океан на самой ранней стадии аккреции. Представления о магматическом океане получили широкое распространение в последние десятилетия. При этом обычно не рассматривается образование этого океана, что не позволяет правильно оценить и его роль в геологических процессах. Между тем она является определяющей и приводит к принципиально новому решению генетических проблем. Под влиянием роста давления образующихся верхних частей придонная часть магматического океана кристаллизовалась и фракционировалась. Небольшая глубина раннего магматического океана и пониженная сила тяжести на еще небольшой Земле обусловили низкое давление в его придонном слое. Поэтому раннее придонное фракционирование было низкobarическим, что привело к образованию большого количества остаточных расплавов от кислого до толеитового составов и является причиной широкого распространения пород такого состава. Кумулаты сформировали мантию (рис. 1). Всплывание и кристаллизация кислых расплавов привели к образованию раннедокембрийских кристаллических комплексов и континентальной коры. С увеличением размера Земли и интенсивности аккреции повышалась температура и глубина магматического океана. Состав возникших придонных остаточных расплавов эволюционировал до ультраосновного. Это привело к образованию слоистости в магматическом океане и обратного геотермического градиента в мантии, а также отсутствию в ней конвекции и современных геодинамических обстановок на ранней Земле. Кристаллизация и фракционирование слоистого океана сверху вниз и всплывание остаточных расплавов различных его слоев после завершения аккреции обусловили эволюцию магматизма древних платформ от кислого к основному,

щелочно-ультраосновному карбонатитсодержащему и далее к кимберлитовому.

Формирование кимберлитовых магм обычно объясняют отделением выплавов в слабopодплавленных (примерно на 0,1 %) мантийных плюмах, предварительно метасоматически обогащенных некогерентными (расплавфильными) компонентами [4]. Но этому противоречит отсутствие кимберлитов в океанических областях, где происходит массовый подъем мантийных плюмов. Вязкость слабopодплавленных пород составляет около 10^{21} – 10^{22} пуаз. Расчеты [12] показали, что при такой огромной вязкости капли расплава за всю историю Земли способны всплыть лишь на первые миллиметры и поэтому не могли сформировать магмы. В мантии нет флюидной фазы и связанных с ней процессов метасоматоза, так как ее присутствие при высоком давлении снижает температуру плавления пород на многие сотни градусов, приводит к их расплавлению и полному растворению флюида в расплаве. По экспериментальным данным [17], фракционирование богатых углекислотой перидотитовых магм при давлении менее 2,5 ГПа обуславливало образование карбонатитовых остаточных расплавов, а при большем – кимберлитовых, вследствие достижения полной смесимости карбонатитовых и силикатных расплавов. Поэтому фракционирование придонного слоя магматического океана привело к возникновению и всплыванию кимберлитовых магм. Мантийные ксенолиты в кимберлитах являются не остатками родоначального субстрата кимберлитовых магм, как обычно предполагается, а кумулатами фракционировавших перидотитовых магм.

Природа взрывов кимберлитовых магм. Загадочная особенность кимберлитов – отсутствие их лав на земной поверхности и размещение обычно в виде конических тел (трубок), имеющих

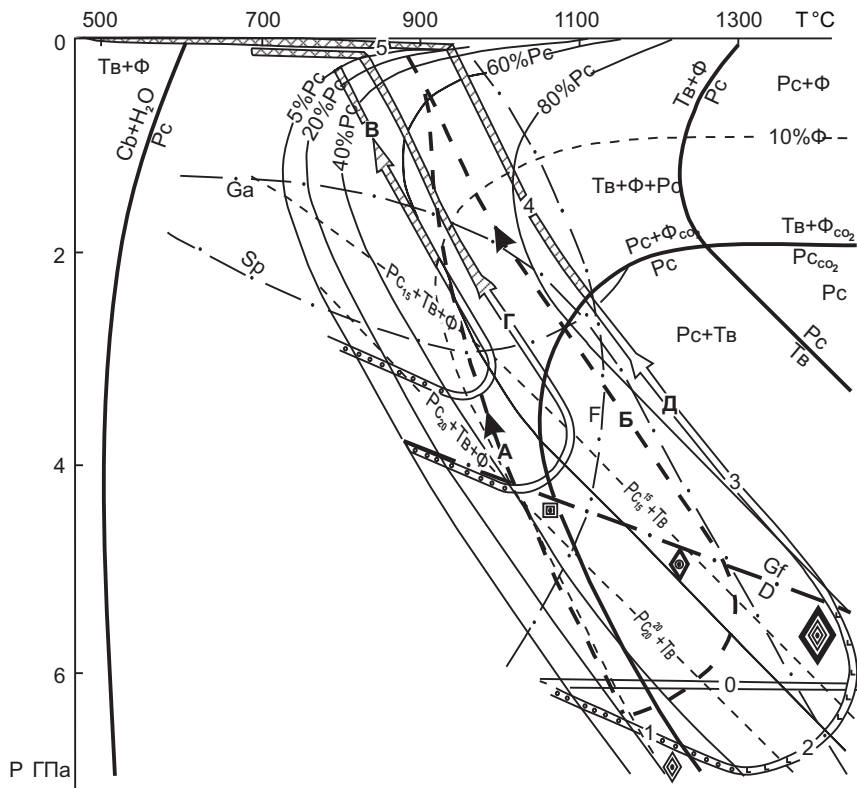


Рис. 2. P-T-диаграмма фазового состава и эволюции кимберлитовых магм (линии со стрелками А–Д) с содержанием по 10 % H₂O и CO₂

Сб – карбонат, D – алмаз, Ga – гранат, Gf – графит, Sp – шпинель, Ф – флюид, Тв – твердые фазы кимберлита, Рс₂₀²⁰ – расплав и содержание в нем H₂O (нижний) и CO₂ (верхний индексы). На линиях эволюции: 0 – образование мантии; 1, 2 – этапы интенсивного соответственно фрикционного и декомпрессионно-фрикционного плавления; 3–5 – этапы соответственно декомпрессионного плавления, декомпрессионного затвердевания и эксплозивной дезинтеграции. Рисунки кристаллов – морфология возникавших алмазов [12]

признаки образования в результате взрывов. Существуют фреатомагматическая и флюидно-магматическая гипотезы происхождения взрывов. Первая предполагает их возникновение в результате взрывного отделения паров воды, образовавшихся под влиянием соприкосновения грунтовых вод с кимберлитовыми магмами. Однако в многочисленных случаях стекания в водоемы даже очень высокотемпературных базальтовых магм (1000–1200 °С) не происходят взрывы. Образующийся пар спокойно отделяется, что обусловлено большой теплоемкостью воды и поэтому медленным ее испарением. Во флюидномагматической гипотезе предполагается взрывной прорыв газов, накопившихся под перекрывающими породами. Но образование гидротермальных месторождений на расстоянии многих километров от родоначальных магматических тел свидетельствует, что малоглубинные породы вследствие их трещиноватости проницаемы для газов и не могут существенно препятствовать отделению эманаций кимберлитовых магм. Обе гипотезы не объясняют дробление в основном кимберлитов, а не вмещающих пород.

Очевидно, что взрывы происходили под влиянием внутренних процессов в кимберлитовых магмах. Выяснить это можно на основании детальной модели эволюции кимберлитовых

магм. На рис. 2 приведена количественная P-T-диаграмма фазового состава и эволюции кимберлитовых магм, впервые рассчитанная по опубликованным экспериментальным данным [12]. Она иллюстрирует существование в магмах обычно не учитываемых явлений – отсутствие самостоятельной флюидной фазы при высоких давлениях и температуре вследствие полного растворения ее в расплаве, возрастание содержания твердых фаз в безфлюидных магмах с увеличением давления и его падением во флюидосодержащих относительно низкотемпературных.

Последнее явление определяет главные особенности малоглубинной эволюции кимберлитовых магм. Вследствие остаточно-магматического происхождения и поэтому относительно невысокой температуры вскипание кимберлитовых магм на малоглубинной стадии подъема обусловило декомпрессионное затвердевание верхних частей магматических колонн и взрыв их под влиянием законсервированного затвердеванием высокого внутреннего давления газовой фазы. Она содержалась в виде мелких равномерно распределенных пузырьков. Поэтому дробление чаще всего было очень тонким, что объясняет возникновение огромных палящих туч при взрывах декомпрессионно затвердевавших кислых магм, явившихся причиной чаще всего формирования

кимберлитовыми магмами трубок взрыва, большого содержания в них взрывчатых веществ и отсутствия на земной поверхности кимберлитовых лав.

Быстрое декомпрессионное затвердевание магм обусловило отсутствие в кимберлитовых трубках осадения мантийных ксенолитов, алмаза, граната и других высокоплотных минералов. Давление при взрывах уменьшалось. Оно было во много раз меньше, чем необходимо для образования алмаза. Это противоречит иногда предполагавшемуся образованию алмазов в результате взрывов. Вследствие значительного объема кимберлитовых магм по сравнению с зарядами в искусственных взрывах масштабы взрывов были в тысячи раз больше атомных взрывов [15].

Вследствие примерно в 5 раз большей растворимости воды в расплаве, чем углекислоты, бедные последней магмы вскипали и декомпрессионно затвердевали лишь в приповерхностных условиях и не формировали протяженные трубки. Продукты их взрыва размещались не в диатремах, а в основном на земной поверхности и формировали слои туфов, иногда большой протяженности. Например, карнийский горизонт высокоалмазных туффзитов в приустьевой части р. Лена имеет протяженность около 500 км при мощности менее 0,5 м [3]. Обычно повышенный средний размер алмазов (до 200–300 мг в Южной Африке и Вишерском Урале) в связанных с туфами россыпях приводил во всем мире к многочисленным попыткам найти интрузивные коренные источники этих россыпей. В Африке для этого из кимберлитовых тел отбирались многие тысячетонные пробы [9]. Однако найти их не удалось.

Коренные источники найдены в Вишерском Урале [10]. Здесь в районе россыпей обнаружены штокверки, секущие и согласные тела и диатремы, сложенные туффзитами. Диатремы имеют большой диаметр (до первых километров), подтверждающий возникновение их при поверхностных взрывах. Вертикальная протяженность их и штокверов – обычно 50–100 м. Значительно меньшая ее величина, чем у кимберлитовых трубок (до первых километров), также подтверждает взрывы их магм в приповерхностных условиях.

Обширные россыпи с крупными округлыми алмазами распространены на многих континентах [9]. Это свидетельствует о существовании особого алмазоносного магматизма, обусловленного внедрением бедных углекислотой магм, переходных по составу к лампроитовым, вещество которых сильно разбрасывалось при взрывах, поэтому их интрузивные тела редко встречаются.

Генезис алмазов. Чаще всего предполагается, что алмаз в кимберлитах является ксеногенным, захваченным из архейской мантии. Однако, как показало обобщение опубликованных данных [13], более 60 % включений в алмазах являются постархейскими и иногда фанерозойскими, поэтому этот минерал не захватывался из древней мантии. Предполагалось метасома-

тическое образование алмазов в мантии и из углерода погруженных при субдукции осадков. Но процессы метасоматоза под влиянием флюида не могут происходить в мантии вследствие интенсивного плавления пород в присутствии флюида и полного растворения его в расплаве. В зонах субдукции обычно нет кимберлитов и алмазов, что противоречит их субдукционному генезису.

При горячей аккреции Земли алмаз формировался в кристаллизовавшемся перидотитовом слое магматического океана вследствие накопления углерода в остаточном расплаве, поскольку этот элемент почти не входил в состав формировавшихся породообразующих минералов. Небольшое количество свободного углерода присутствовало в расплаве вследствие диссоциации углеродсодержащих соединений. Алмаз начал формироваться примерно 3,5 млрд лет назад при еще преимущественно гарцбургитовом составе придонного перидотитового слоя. Это объясняет присутствие включений такого состава в алмазах и их наиболее древний возраст. Низкое содержание свободного углерода в расплавах обусловило относительно небольшое количество алмазов (обычно первые караты на тонну) даже в самых богатых трубках. В случае иногда предполагаемого привноса углерода флюидами или погружающимися при субдукции океаническими осадками содержание алмазов было бы в сотни – тысячи раз большим.

В поднимавшихся мантийных плюмах происходило плавление вещества под влиянием декомпрессии. Возрастание количества расплава при этом приводило к уменьшению в нем концентрации углерода. Поэтому в плюмах обычно не кристаллизовались алмазы, хотя вещество плюмов на глубокой стадии подъема находилось при очень высоком давлении. Алмазы могли возникать лишь при процессах кристаллизации и фракционирования плюмовых магм при остывании их в условиях высокого давления. Это является причиной изредка присутствия алмазов в щелочных базитах, лампрофирах, минеттах. Однако длительность кристаллизации их магм в условиях большого давления была несопоставимо меньше, чем продолжительность (2–3 млрд лет) кристаллизации родоначального для кимберлитов перидотитового слоя магматического океана. Это объясняет в сотни – тысячи раз меньший размер алмазов в некимберлитовых породах (десятые – сотые доли миллиметра).

Очень низкая вязкость перидотитовых расплавов (десятые доли пуаза) обусловила большую скорость диффузии в них углерода. Поэтому он успевал достигать торцов слоев роста кристаллов алмаза и присоединялся к ним, поскольку здесь обнажалось больше свободных ковалентных связей углерода, чем на гранях. В результате путем послонного тангенциального роста формировались идеальные остросереберные октаэдры алмаза с зеркально-гладкими гранями. При фракционировании содержание кремния, алюминия и других многовалентных элементов в остаточных

расплавах возрастало. Это приводило к увеличению их вязкости в тысячи раз, уменьшению скорости диффузии углерода и возрастанию степени пересыщения им расплава. Вследствие увеличения скорости возникновения новых центров кристаллизации уменьшалась площадь образующихся слоев роста на гранях и формировались выпуклые полицентрические, блочные, слоистые и округло-ступенчатые октаэдры. При дальнейшем уменьшении площади образующихся слоев на месте ребер и вершин возникали грани соответственно ромбододекаэдра и куба и формировались кристаллы переходной морфологии. Затем возникали ромбододекаэдры, кубы и агрегаты. Тангенциальный послойный рост сменялся на радиальный и формировались многочисленные скульптуры на кристаллах [14].

С началом радиального роста связано нарастание мутных фибриллярных оболочек на октаэдрические округлые прозрачные кристаллы в алмазах IV разновидности, по Ю. Л. Орлову. В алмазах V разновидности радиальные волокна начинаются в центре кристаллов и, расширяясь, продолжают к периферии. Для алмазов этих разновидностей характерно присутствие полостей (шрамов), протягивающихся обычно параллельно волокнам. Их обычно связывают с протеканием гипотетических процессов растворения. Однако циркуляция растворяющего вязкого расплава в узких заканчивающихся внутри кристаллов полостях практически не возможна. Видимо, эти шрамы образовались вследствие возникновения пустых промежутков между расширяющимися к периферии волокнами при уменьшении скорости диффузии углерода. Позднее образование разновидностей IV и V подтверждается часто высоким содержанием в них накапливающегося в остаточных расплавах легкого изотопа углерода и обычно пониженной степенью удельной рентгенолюминесценции [1], указывающей на содержание множества примесей. Пониженное содержание углекислоты в кремнекислотных магмах обусловило формирование ими россыпей с сильноразрушенными при взрыве коренными источниками и объясняет присутствие в этих россыпях алмазов IV и V разновидностей. Характерные для кимберлитов с повышенным содержанием кремнекислоты и глинозема округлые кристаллы алмаза образовались под влиянием сокращения площади возникших граней вследствие уменьшения скорости диффузии углерода во фракционировавших магмах. То есть, они являются результатом антискелетного роста, а не растворения, как часто предполагается. Доказательство — более крупный в среднем размер округлых алмазов по сравнению с плоскогранными в одних и тех же кимберлитах и россыпях и присутствие округлых внутренних зон роста в некоторых кристаллах.

Рассмотренное происхождение алмазов подтверждается эволюцией состава минеральных включений в них от перидотитового парагенезиса к эклогитовому, пироксенитовому и далее

к кимберлитовому (карбонатсодержащему) [13] и возрастанием в тысячи раз от ранних алмазов к поздним содержания примесей, накапливавшихся в остаточных расплавах химических компонентов, в том числе азота и легкого изотопа углерода. Примеси поглощают рентгенолюминесценцию. Поэтому в поздних алмазах удельная интенсивность рентгенолюминесценции снижена почти до нуля, ее величина является показателем последовательности формирования алмазов в процессе эволюции магм.

В переходной верхней части перидотитового слоя изначально повышенное содержание кремния и алюминия приводило к ромбододекаэдрической и кубической огранке даже ранних алмазов, опускание которых под влиянием высокого удельного веса в нижние части обусловило включение их в центральные части возникших здесь позже октаэдрических кристаллов.

Очевидно, что придонное фракционирование в магматическом океане не сопровождалось полным разделением твердых фаз и расплава. Часть последнего захоронялась среди кумулатов. Поэтому после завершения аккреции в подстилавших магматический океан кумулатах на различной глубине находились тела расплавов. При остывании в них также формировались алмазы, которые отличались от алмазов постагрегационного магматического океана присутствием более глубоких включений. Иногда всплывание таких расплавов приводило к привносу в магматический океан ультравысокобарических алмазов. Видимо, этим объясняются единичные находки в кимберлитах алмазов с включениями феррипериклаза, бриджманита.

Сначала остывание придонного перидотитового слоя было медленным, поскольку он был перекрыт еще горячими верхними слоями. Поэтому длительная (более миллиарда лет) кристаллизация привела к возникновению здесь алмазов-гигантов массой до многих сотен карат, иногда присутствующих в кимберлитах. Такое происхождение подтверждается резким преобладанием (более чем в 99 % [1]) среди них октаэдров и увеличением их размера в последовательности кристаллизации: для гладкогранных октаэдров он равен в среднем 46 кар, полицентрических — 50 кар, слоистых — 72 кар, изредка встречающихся ромбододекаэдров (3 из 330) — 151 кар.

Судя по высокому содержанию углекислоты в кимберлитах и других ультраосновных дифференциатах магматического океана (до десятков процентов) и низкому (десятые доли процента) в кислых магматических породах, содержание углерода в магматическом океане в среднем возрастало сверху вниз. В этом направлении увеличивалось давление и мафичность расплавов. Поэтому наиболее глубокие мафические части магматического океана были самыми благоприятными для процессов алмазообразования. Это подтверждается на 1,5 ГПа более высоким максимальным давлением при образовании гранатов высокопродуктивной (6,75 кар/т) Нюрбинской

кимберлитовой трубки по сравнению с близко расположенной менее алмазоносной (0,26–0,51 кар/т) Сюльдюканской [11] в Якутии. Следовательно, повышенное содержание в кимберлитах компонентов ультраосновных магм должно положительно коррелироваться с их алмазоносностью.

Для перидотитов типичны большие содержания MgO и Cr₂O₃. Как показало обобщение опубликованных данных [15], количество алмазов в кимберлитах действительно резко увеличивается от десятков условных единиц (у. е.) при величине MgO/FeO менее 2 и до 1600 у. е. при его величине от 4 до 4,5. Возрастание в гранате содержания Cr₂O₃ от 2–7 до 12–17 % сопровождается увеличением алмазоносности кимберлитов в среднем от 40 до 720 у. е., то есть в 18 раз. Возрастание алмазоносности с увеличением содержания магния и хрома в кимберлитах отмечали Н. Н. Зинчук и В. И. Коптиль [5].

Очевидно, что критериями алмазоносности могут быть не только особенности состава кимберлитов. С возрастанием глубины зарождения кимберлитовых магм и мощности перекрывающей литосферы все большее количество этих магм не достигало земной поверхности, поскольку расходовалось на формирование глубинных кимберлитовых тел по пути подъема. Поэтому алмазоносность кимберлитов должна обратно коррелироваться с размером и количеством их тел в продуктивных кимберлитовых полях. Действительно, алмазоносность кимберлитовых трубок с сечением меньше 0,05 км² в среднем в 6 раз больше, чем с сечением 0,2–0,4 км². При количестве тел в кимберлитовых полях менее 10 до 90 % их могут быть алмазоносными. При количестве тел более 100 лишь около 10 % из них содержат алмазы.

Природа особенностей распространения кимберлитов. Обусловленная слоистостью кристаллизация магматического океана сверху вниз привела к относительно позднему образованию кимберлитовых магм. Это объясняет значительно более молодой изотопный возраст кимберлитов (в среднем 236 млн лет) по сравнению с карбонатитами (688 млн лет [13]). Очень высокое (до тысячи хондритовых норм) содержание в кимберлитах, накопившихся в остаточных расплавах легких редких земель, свидетельствует о возникновении их расплавов при почти полном затвердевании (более чем на 99,9 %) перидотитового слоя и магматического океана. Это привело к возможности подъема к земной поверхности основных магм, формировавшихся ниже постагрегационного магматического океана. Такие магмы образовались в результате декомпрессионного переплавления всплывавших линз основных пород, возникавших путем заполнения придонными расплавами синаккреционного магматического океана импактных кратеров на его дне. Они образовались при падении крупных планетезималей. Большой размер этих линз обусловил огромный объем возникавших из них магм

траппов (до миллионов кубических километров). Такой генезис объясняет постоянное присутствие траппов в областях распространения кимберлитов и их почти одинаковый с кимберлитами средний возраст (рис. 3). Присутствие в наиболее ранних кратерах обломков земного ядра обусловило редкие находки в траппах крупных (до десятков тонн) тел никелистого (до 7 %) железа.

Резкое увеличение интенсивности тектонических процессов в конце протерозоя указывает на установление в мантии прямого геотермического градиента в результате прогрева ее изначально на тысячи градусов более высокотемпературным ядром. Значительно меньшие по размеру ядра не смогли прогреть мантии на других планетах земной группы. Это объясняет удивительное отсутствие на них ясных признаков проявления плитной тектоники и современного вулканизма. Преимущественное размещение малоплотного магматического океана на удаленной от притяжения Земли обратной стороне Луны и поэтому его позднее затвердевание обусловило значительно большую мощность здесь коры и редкость крупных импактных бассейнов. Подъем на Земле плюмов с началом мантийной конвекции привел к образованию океанических областей. Раздвижение при этом континентальной литосферы, в которой формировались кимберлитовые магмы, полностью объясняет отсутствие кимберлитов в океанических областях (правило Клиффорда). Проблема отсутствия кимберлитов в этих областях до сих пор не имела обоснованного решения и казалась наиболее загадочной. Всеземное распространение магматического океана обусловило присутствие кимберлитов на всех изученных древних платформах. Судя по высокому содержанию легких редких земель, объем кимберлитовых остаточных расплавов составлял менее тысячной доли перидотитового слоя. Это объясняет очень небольшой объем кимберлитовых тел (десятые – сотые доли кубического километра). Линейное размещение большинства кимберлитовых полей указывает на большую роль в подъеме кимберлитовых магм тектонического выжимания по возникавшим в литосфере зонам растяжения. Формирование таких зон в результате глобальных плитнотектонических процессов, видимо, является причиной образования кимберлитов в регионах преимущественно в определенные возрастные эпохи. Чаше всего связь кимберлитов с субмеридиональными тектоническими разломами [7] обусловлена существованием западного дрейфа континентов, вызванного отклонением к западу под влиянием силы Кориолиса всплывавших плюмов и магм.

Перидотитовый и близкий к нему по составу пикритовый слой имеют большую суммарную мощность – около 150 км (см. рис. 1). Почти во всех их частях формировались кимберлитовые и близкие к ним по составу остаточные расплавы. Снизу вверх в слоях увеличивалось содержание кремнекислоты, глинозема, щелочей и других литофильных компонентов. Поэтому

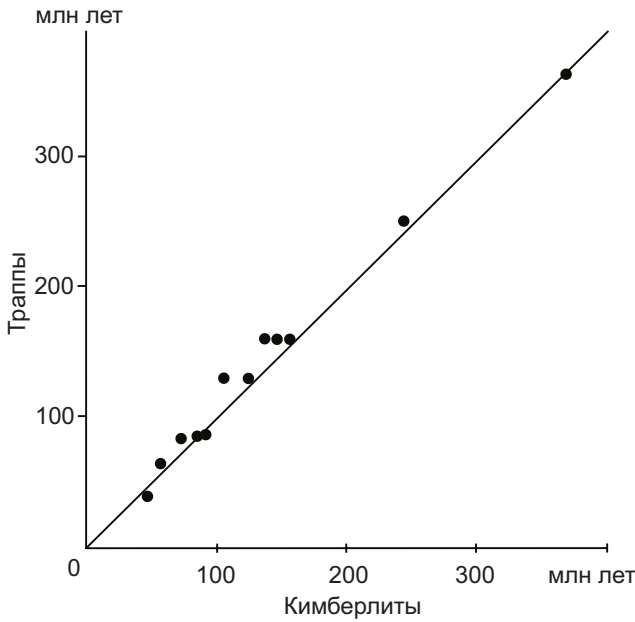


Рис. 3. Соотношение среднего изотопного возраста кимберлитов и траппов в различных регионах [2]

кимберлитовые остаточные расплавы формировались в различающихся по составу частях магматического океана, что должно отражаться в составе кимберлитов. Это подтверждается на рис. 4, где показано существование двух главных разновидностей кимберлитов.

В продуктивных кимберлитах центральной части Якутской провинции уменьшение содержания MgO при фракционировании перидотитового слоя сопровождалось сокращением количества

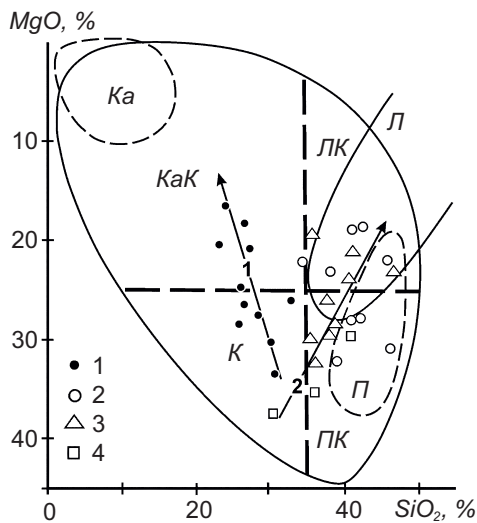


Рис. 4. Поля составов на диаграмме MgO–SiO₂ [13]

К – кимберлиты, Ka – карбонатиты, KaK – карбокимберлиты, Л – лампроиты, ЛК – лампрокимберлиты, П – пикриты и ПК – пикрокимберлиты. Точки – средний состав трубок Якутии (1), Архангельской провинции (2), Африки (3) и Канады (4). Стрелки – карбонатитовый (1) и кимберлитовый (2) тренды фракционирования

кремнекислоты, и остаточные расплавы приближались по составу к карбонатитам, хотя и не достигали их. Видимо, это обусловлено повышенным содержанием углекислоты в перидотитовом слое Якутской провинции.

В африканских, архангельских и большинстве канадских кимберлитов фракционирование приводило к росту кремнекислотности остаточных расплавов и приближению их по составу к лампроитам.

Такие ультраосновные магмы в общем случае должны были располагаться в магматическом океане выше бедных кремнекислотой. Это согласуется с более низким содержанием алмаза (обычно десятые доли карата на тонну) в возникших из них кимберлитах по сравнению с продуктивными кимберлитами Якутской провинции (в среднем 8,57 кар/т в трубке Интернациональная [7]). Продукты фракционирования наиболее глубинного бедного кремнекислотой перидотитового слоя, скорее всего, часто эродировались мантийными конвективными потоками на краях континентов. Поэтому здесь должны реже встречаться бедные кремнекислотой высокоалмазные кимберлиты. Это согласуется с отсутствием их на северной окраине Сибирской платформы. Оно обусловлено пониженной глубиной зарождения кимберлитовых магм, а не их более молодым возрастом, как иногда предполагается.

Преимущественно округлая форма алмазных додекаэдров в карнийских туффизитах и в россыпях севернее промышленных трубок Якутской провинции, возникших из богатых водой и кремнекислотой магм, также обусловлена образованием этих магм из верхних частей перидотитового слоя магматического океана. Вследствие пониженной мощности литосферы эти части платформ более интенсивно деформировались под влиянием тектонических напряжений. Это способствовало подъему остаточных расплавов магматического океана и объясняет

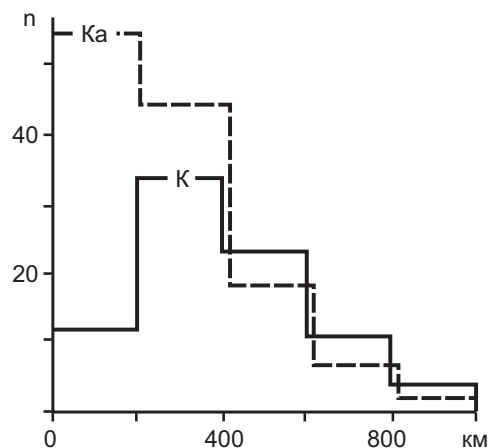


Рис. 5. Распределение количества (n) карбонатитовых комплексов (Ka) и кимберлитовых полей (K) на главных платформах в зависимости от расстояния до их ближайших краев [13]

формирование повышенного количества кимберлитовых тел на севере Сибирской платформы. Этим же обусловлена большая приуроченность подъема менее глубинных магм карбонатитов к окраинам платформ по сравнению с кимберлитами (рис. 5). Формирование магм из остаточных расплавов в большом интервале глубин магматического океана объясняет иногда совмещение в одних и тех же полях кимберлитов различной алмазности и состава. Значительно большая однородность состава кимберлитовых тел, по сравнению с карбонатитосодержащими комплексами, связана с невозможностью всплывания ранних дифференциатов придонного перидотитового слоя через еще жидкие малоплотные верхние слои океана. Преобладание в одних регионах бедных кремнекислотой кимберлитов (Якутия), а в других богатых (Африка, Канада и др.) позволяет предполагать значительную латеральную неоднородность состава магматического океана и сформировавшейся из него континентальной литосферы.

Полученные результаты свидетельствуют, что наиболее перспективны на обнаружение высокоалмазоносных кимберлитов — центральные районы древних платформ с мощной низкотемпературной литосферой, древним возрастом кристаллической коры и с небольшим проявлением в ней поздних тектонических и магматических процессов.

Заключение. Таким образом, полученные доказательства горячей гетерогенной аккреции Земли приводят к принципиально новому решению генетических проблем петрологии и кимберлитов. По этим данным, мантия образовалась из кумулатов глобального магматического океана, возникшего путем импактного тепловыделения при аккреции. Кимберлиты и их алмазы сформировались в результате фракционирования придонного перидотитового слоя магматического океана. Такой генезис впервые полностью объясняет многочисленные особенности состава, распространения и алмазности кимберлитов. Он подтверждает полузабытые представления классиков петрологии П. Боуэна, А. Н. Заварицкого и других о ведущей роли магматического фракционирования в формировании многообразия пород Земли.

6. Люхин А. М. Вопрос о происхождении кимберлитов и алмазов — основа эффективности их поисков // Эффективность геологоразведочных работ на алмазы: прогнозно-ресурсные, методические, инновационно-технологические пути ее повышения: Материалы V Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 50-летию Алмазной лаборатории ЦНИГРИ — НИГП АК «АЛРОСА» (ПАО). Мирный, 29 мая — 01 июня 2018 г. — Мирный, 2018. — С. 297–301.

7. Минералогия платформенного магматизма (траппы, карбонатиты, кимберлиты) / С. В. Белов, А. В. Лапин, А. В. Толстов, А. А. Фролов. — Новосибирск: СО РАН, 2008. — 537 с.

8. Рингвуд А. Е. Происхождение Земли и Луны. — М.: Недра, 1982. — 294 с.

9. Россыпи алмазов Мира / В. М. Подчасов, М. Н. Евсеев, В. Е. Минорин, В. Г. Черников. — М.: Геоинформмарк, 2005. — 747 с.

10. Рыбальченко А. Я., Рыбальченко Т. М., Силаев В. И. Теоретические основы прогнозирования и поисков коренных месторождений алмазов туффицитового типа // Известия Коми научного центра УрО РАН. — Сыктывкар, 2011. — Вып. 1 (5). — С. 54–66.

11. Тарский О. В., Шахурдина Н. К. Латеральная неоднородность верхней мантии территории Якутской алмазоносной провинции (на примере Мирнинского, Накынского и Сьюльдюкарского кимберлитовых полей) // Эффективность геологоразведочных работ на алмазы: прогнозно-ресурсные, методические, инновационно-технологические пути ее повышения: Материалы V Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 50-летию Алмазной лаборатории ЦНИГРИ — НИГП АК «АЛРОСА» (ПАО). Мирный, 29 мая — 01 июня 2018 г. — Мирный, 2018. — С. 195–199.

12. Шкодзинский В. С. Фазовая эволюция магм и петрогенезис. — М.: Наука, 1985. — 232 с.

13. Шкодзинский В. С. Генезис литосферы и алмазов. Модель горячей гетерогенной аккреции Земли. — Saarbrücken: Palmarium academic publishing, 2015. — 687 с.

14. Шкодзинский В. С. Глобальная петрология по современным данным о горячей гетерогенной аккреции Земли. — Якутск: СВФУ, 2018. — 244 с.

15. Шкодзинский В. С. Природа критериев алмазоносности кимберлитов // Уральский геологический журнал. — 2021. — № 4. — С. 42–52.

16. O'Neil H. S. Oxygen fugacity and siderophile elements in the Earth's mantle: implications for the origin of the Earth // Meteoritics. — 1990. — № 25 (4). — Pp. 361–395.

17. Wyllie P. J. Mantle fluid composition buffered in peridotite-CO₂-H₂O by carbonates, amphibole, and phlogopite // The Journal of Geology. — 1978. — Vol. 86, № 1. — Pp. 687–713.

1. Аргунов К. П. Алмазы Якутии. — Новосибирск: ЯНЦ СО РАН, 2005. — 406 с.

2. Арясова Д. В., Хазан Я. М. «Правило Клиффорда» и геодинамика кимберлитового магматизма // Геофизический журнал, 2013. — Т. 35, № 6. — С. 101–113.

3. Граханов С. А., Коптиль В. И. Триасовые палеороссыпи алмазов северо-востока Сибирской платформы // Геология и геофизика. — 2003. — Т. 44, № 11. — С. 1191–1201.

4. Добрецов Н. Л. Введение в глобальную петрологию. — Новосибирск: Наука, 1980. — 240 с.

5. Зинчук Н. Н., Коптиль В. И. Типоморфизм алмазов Сибирской платформы. — М.: Недра, 2003. — 603 с.

1. Argunov K. P. Almazы Yakutii [Diamonds of Yakutia]. Novosibirsk, 2005, 406 p.

2. Aryasova D. V., Khazan Ya. M. «Clifford's rule» and the geodynamics of kimberlite magmatism. *Geophysical Journal*, 2013, vol. 35, no. 6, pp. 101–113. (In Russian).

3. Grahonov S. A., Koptil V. I. Triasovaya paleorossyp almasov Severo-Vostoka Sibirskoi platformy [Triassic diamond paleoplacer on North-East of Siberian platform]. *Russian Geology and Geophysics*, 2003, vol. 44, no. 11, pp. 1191–1201. (In Russian).

4. Dobretsov N. L. Vvedenie v global'nyuyu petrologiyu [Introduction to global petrology]. Novosibirsk, Nauka, 1980, 240 p.

5. Sinchuk N. N., Koptil V. I. Tipomorfizm almasov Sibirskoi platformy [Typomorphism of diamonds of the Siberian platform]. Moscow, Nauka, 2003, 603 p.
6. Lyukhin A. M. Vopros o proiskhozhdenii kimberlitov i almazov – osnova effektivnosti ikh poiskov [The question of the origin of kimberlites and diamonds – the basis for the effectiveness of their search]. *Effektivnost' geologorazvedochnykh rabot na almazy: prognozno-resursnye, metodicheskie, innovatsionno-tehnologicheskie puti ee povysheniya: Materialy V Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoy 50-letiyu Almaznoy laboratorii TsNIGRI – NIGP AK «ALROSA» (PAO). Mirnyy, 29 maya – 01 iyunya 2018 g.* Mirnyy, 2018, pp. 297–301. (In Russian).
7. Belov S. V., Lapin A. V., Tolstov A. V., Frolov A. A. Minerageniya platformennogo magmatizma (trappy, karbonatity, kimberlity) [Mineralogy of platform magmatism (traps, carbonatites, kimberlites)]. Novosibirsk, 2008, 537 p.
8. Ringvud A. E. Proiskhozhdenie Zemli i Luny [Origin of the Earth and the Moon]. Moscow, Nedra, 1982, 294 p.
9. Podchasov V. M., Evseev M. N., Minorin V. E., Chernikov V. G. Rossypi almazov Mira [Placers of diamonds of the World]. Moscow, Geoinformmark, 2005, 747 p.
10. Rybal'chenko A. Ya., Rybal'chenko T. M., Silaev V. I. Teoreticheskie osnovy prognozirovaniya i poiskov korennykh mestorozhdeniy almazov tuffizitovogo tipa [Theoretical foundations for forecasting and prospecting for primary deposits of tuffizite-type diamonds]. *Izvestiya Komi nauchnogo tsentra UrO RAN.* Syktyvkar, 2011, iss. 1 (5), pp. 54–66. (In Russian).
11. Tarskii O. V., Schahurdina N. K., Tarskiy O. V., Shakhurdina N. K. Lateral'naya neodnorodnost' verkhney mantii territorii Yakutskoy almazonosnoy provintsii (na primere Mirninskogo, Nakynskogo i Syul'dyukarskogo kimberlitovykh poley) [Lateral heterogeneity of the upper mantle of the territory of the Yakutsk diamond province (on the example of the Mirny, Nakyn and Syuldyukar kimberlite fields)]. *Effektivnost' geologorazvedochnykh rabot na almazy: prognozno-resursnye, metodicheskie, innovatsionno-tehnologicheskie puti ee povysheniya: Materialy V Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoy 50-letiyu Almaznoy laboratorii TsNIGRI – NIGP AK «ALROSA» (PAO).* Mirnyy, 29 maya – 01 iyunya 2018 g. Mirnyy, 2018, pp. 195–199. (In Russian).
12. Shkodzinskiy V. S. Fazovaya evolyutsiya magm i petrogenезis [Phase evolution of magmas and petrogenesis]. Moscow, Nauka, 1985, 232 p.
13. Shkodzinskiy V. S. Genezis litosfery i almazov. Model' goryachey geterogennoy akkretsii Zemli [Genesis of the Lithosphere and Diamonds. Model of hot heterogeneous accretion of the Earth]. Saarbrücken, Palmarium academic publishing, 2015, 68 p.
14. Shkodzinskiy V. S. Global'naya petrologiya po sovremennym dannym o goryachey geterogennoy akkretsii Zemli [Global petrology based on modern data on the Earth's hot heterogeneous accretion]. Yakutsk, 2018, 244 p.
15. Shkodzinskiy V. S. Priroda kriteriev almazonosnosti kimberlitov [The nature of criteria for the diamond content of kimberlites]. *Ural'skiy geologicheskiy zhurnal*, 2021, no. 4, pp. 42–52. (In Russian).
16. O'Neil H. S. Oxygen fugacity and siderophile elements in the Earth's mantle: implications for the origin of the Earth. *Meteoritics*, 1990, no. 25 (4), pp. 361–395.
17. Wyllie P. J. Mantle fluid composition buffered in peridotite-CO₂-H₂O by carbonates, amphibole, and phlogopite. *The Journal of Geology*, 1978, vol. 86, no. 1, pp. 687–713.

Шкодзинский Владимир Степанович – доктор геол. минерал. наук, вед. науч. сотрудник, Институт геологии алмазов и благородных металлов СО РАН (ИГАБМ СО РАН). Пр. Ленина, 39, Якутск, Россия, 677980. <shkodzinskiy@diamond.ysn.ru>

Shkodzinskiy Vladimir Stepanovich – Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (DPAMGI SB RAS). 39 Prosp. Lenina, Yakutsk, Respublika Sakha (Yakutiya), Russia, 677980. <shkodzinskiy@diamond.ysn.ru>