



Научная статья

Геолого-генетическая модель алмазоносной флюидно-магматической системы

А.В.Козлов, Е.А.Васильев, А.С.Иванов, Я.Ю.Бушуев, А.И.Колядина ✉

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Как цитировать эту статью: Козлов А.В., Васильев Е.А., Иванов А.С., Бушуев Я.Ю., Колядина А.И. Геолого-генетическая модель алмазоносной флюидно-магматической системы // Записки Горного института. 2024. Т. 269. С. 708-720. EDN CFZLAK

Аннотация. Предложена геолого-генетическая модель формирования месторождений алмазов, связанных с кимберлитами и лампроитами, основанная на синтезе опубликованной информации об алмазоносных кимберлитовых системах и оригинальном исследовании онтогенетических особенностей кристаллов алмаза. В единой системе скомпонованы процессы глубинной кристаллизации алмаза, его восходящего переноса и последующей концентрации в приповерхностных кимберлит-лампроитовых телах и других породах, в том числе выведенных на поверхность в результате высокоамплитудных поднятий пород кристаллического фундамента. Выдвинуто предположение о коренных источниках алмазов анабарских россыпей. Показана возможность генерации углеводородов на мантийных уровнях, соответствующих областям алмазообразования, и их переноса в верхние зоны земной коры по механизму, аналогичному мантийно-коровой миграции алмазоносных флюидизированных магм. Высокая скорость их восходящего перемещения позволяет осуществить доставку к поверхности без существенной потери в результате растворения в расплавах и сорбции на поверхности минеральных фаз. Отмечена важная роль флюидодинамических процессов на всех этапах развития этой системы.

Ключевые слова: алмазы; алмазоносная флюидно-магматическая система; гидроразрыв; мантийно-коровый перенос

Финансирование. Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания FSRW-2024-0008 «Исследование термодинамических процессов Земли с позиции генезиса углеводородов на больших глубинах».

Поступила: 03.05.2024

Принята: 14.10.2024

Онлайн: 12.11.2024

Опубликована: 12.11.2024

Введение. Большой интерес к алмазам и условиям их образования связан не только с высокой ценностью этого минерала как ювелирного и технического сырья, но и с тем, что он является источником уникальной информации о веществе и термодинамических условиях, в недоступных для прямого изучения мантийных глубинах. Правильное понимание условий формирования месторождений алмазов позволяет эффективно осуществлять прогнозно-поисковые работы и повысить эффективность политики в области управления минеральными ресурсами [1]. Алмаз, мантийные ксенолиты, кимберлиты и лампроиты являются доступными для изучения фрагментами мантийного вещества, но только алмаз может донести это вещество до земной поверхности в первозданном виде. Весьма значительный интервал глубин образования алмазов (120-600 км от поверхности Земли) [2] позволяет анализировать особенности флюидного и минерального вещества на этих глубинах. Например, изучение флюидных включений в алмазах выявило наличие метана и тяжелых углеводородов, что доказало принципиальную возможность генерации углеводородных флюидов в мантийных условиях [3-5].

В связи с большими глубинами образования алмазов и их концентрацией в приповерхностных кимберлитовых телах (дайках, силлах, трубках) возникает вопрос о механизме их транспортировки из мантийных глубин к поверхности. В предлагаемой геолого-генетической модели алмазоносной флюидно-магматической системы рассмотрены и структурированы важнейшие элементы: процессы глубинной кристаллизации алмаза, его восходящий мантийно-коровый перенос и последующая концентрация в приповерхностных кимберлитовых и лампроитовых телах.



Концептуальная модель алмазонасной флюидно-магматической системы. В системе формирования коренных месторождений алмазов, связанных с кимберлитами и лампроитами, можно выделить три основных подсистемы: кристаллизации алмаза и его перехода в подвижную форму; мантийно-коровой миграции алмаза; концентрации алмаза в приповерхностном кимберлитовом (лампроитовом) теле (дайке, силле, трубке).

Сложность исследования этой системы связана с большой вертикальной протяженностью (до 600-750 км), охватывающей уровни сублитосферной мантии, литосферной мантии и континентальной земной коры, широким диапазоном термодинамических параметров ее функционирования в этом интервале глубин ($T = 0-1500\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 10^{-4}-8\text{ ГПа}$) и ограничениями получения прямой информации о ее вещественном составе [6, 7]. Концептуальная модель системы приведена на рис. 1.

Выделенные подсистемы изучены в разной степени. Детальнее охарактеризован наиболее доступный для изучения верхний уровень – подсистема приповерхностной концентрации алмазов, представленная алмазонасными кимберлитовыми и лампроитовыми трубками, силлами и дайками. Эти геологические образования исследованы геофизическими методами, вскрыты горными выработками, кимберлиты и извлеченные из них мантийные ксенолиты и алмазы детально изучены. Полученная обширная информация о морфологических особенностях кимберлитовых тел, структурно-текстурных особенностях кимберлитов, их минеральном и химическом составе позволила разным исследователям прийти к близким геолого-генетическим моделям формирования алмазонасных кимберлитовых тел [8-10].

В меньшей степени, но достаточно подробно изучена подсистема образования алмазов. Несмотря на очень большие и недоступные для прямого наблюдения глубины ее функционирования, изучение мантийных ксенолитов, алмазов, а также значительный объем экспериментальных исследований по выращиванию алмазов в различных средах позволили приблизиться к пониманию условий их образования. Длительное время представительность получаемых при изучении алмазов данных была ограничена доступностью для исследования только мелких кристаллов. В последние годы в рамках деятельности Геммологического института Америки (GIA) стали доступными для исследований неразрушающими методами самые крупные алмазы и бриллианты, а их фрагменты, оставшиеся после огранки, изучались и разрушающими методами. В результате были получены исключительно важные данные, характеризующие условия образования алмазов в условиях сублитосферной мантии на глубинах 600 и более километров [11].

Наименее изученной оказалась подсистема мантийно-корового переноса алмазов, которая выполняет функции доставки алмазов от уровня их кристаллизации в мантии (120-600 км) до поверхности Земли, где они концентрируются в кимберлитовых или лампроитовых телах. Главным условием, которому должна соответствовать эта подсистема, является сохранение алмаза, который при восходящем переносе пересекает границу термодинамической устойчивости и может превратиться в графит. Сложность заключается и в том, что модели, разработанные для восходящего

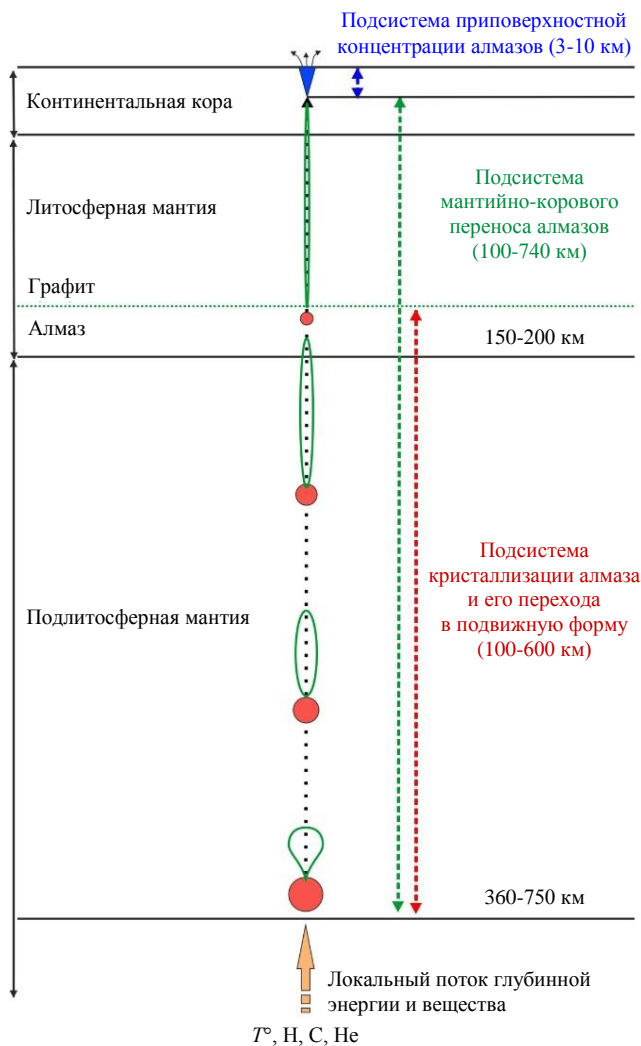


Рис. 1. Система формирования месторождения алмазов

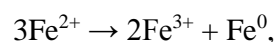


движения магмы при формировании вулканических систем, обычно предполагают гидродинамическую связь промежуточного магматического очага с поверхностью [12, 13]. Это допустимо при нахождении промежуточного магматического очага на глубине первых километров, но недопустимо при зарождении алмазосодержащей кимберлитовой магмы на глубине 120-600 км от поверхности Земли.

Целью исследования является разработка геолого-генетической модели формирования месторождений алмазов, связанных с кимберлитами и лампроитами, в которой в единой системе объединены процессы глубинной кристаллизации алмаза, его восходящего переноса и последующей концентрации в приповерхностных кимберлит-лампроитовых телах. Рассмотрены вопросы образования глубинных углеводородов и возможные механизмы их доставки в приповерхностные зоны земной коры, где они могут принимать участие в формировании месторождений углеводородного сырья.

Подсистема кристаллизации алмаза и его перехода в подвижную форму. На основании исследования включений в алмазах сделаны предположения о возможных средах их образования. Непосредственный рост алмазов мог реализоваться в жидкой (флюидной) среде различного состава (силикатной, сульфидной, карбонатной, металлической) [7, 14, 15]. По результатам изучения сингенетических включений в алмазах силикатно-карбонатная среда рассматривается как одна из наиболее вероятных для роста алмазов [16, 17], что подтверждено и экспериментально [18].

Ограниченная распространенность металлических включений в алмазах не позволяла рассматривать расплавы металлов как преобладающий вариант природной алмазообразующей среды, однако предпринятое в последнее время исследование высококачественных кулинаноподобных алмазов типа CLIPPIR (Cullinan-like, Large, Inclusion-Poor, Pure, Irregular и Resorbed) позволили выявить новые особенности их образования [7, 11]: мельчайшие железо-никелевые металлические включения, окруженные флюидной оболочкой, состоящей из метана и водорода. Комплексное исследование этих алмазов позволило предположить их рост в расплаве никельсодержащего железа (содержащего в растворенном виде углерод и водород) в резко восстановительных условиях сублитосферной мантии на глубинах около 600 км. Флюидные метан-водородные оболочки были выявлены вокруг включений металлов и в синтетических алмазах [19]. Предполагается [11], что на глубине около 250 км и ниже металлическое железо может являться одной из стабильных фаз в мантийных породах, а нижняя мантия может содержать примерно 1 вес.% металлического расплава, богатого железом [20]. Железо может возникать в результате реакции диспропорционирования, при которой валентные электроны в существующих атомах Fe^{2+} перераспределяются по реакции



где Fe^{3+} входит в состав силикатов, а Fe^0 выделяется в собственную металлическую фазу [19].

Экспериментальные исследования подтвердили реальность образования самородных металлов (Fe, Ni, Co) в земной коре при взаимодействии водорода с базальтовыми расплавами даже при параметрах гипабиссальной фации. Впервые показано, что процесс металл-силикатной ликвации в базальтовых расплавах при их взаимодействии с водородом может осуществляться при реальных температурах магм в природе (≤ 1250 °C) значительно меньших температур плавления железа и его сплавов с никелем и кобальтом. При этом в базальтовом расплаве заметно возрастает содержание H_2O , что связывается с тем, что все реакции восстановления окислов железа водородом приводят к образованию воды [21].

Развитие представлений об условиях образования кристаллов алмаза, новые данные по разнообразию их термической истории, морфологии и анатомии [22], составу включений [23] и дефектно-примесному составу [24] позволяют выделить несколько групп кристаллов, выросших в различных условиях и, вероятно, в разных средах. В каждом коренном месторождении имеются кристаллы всех групп [25], но особую совокупность составляют беззотные алмазы типа Па, к которым относятся и кристаллы, выделяемые в группу CLIPPIR [11]. Эти кристаллы без зонально-секториальных неоднородностей, с полицентрическим строением поверхности содержат железо-никелевые металлические включения.



Исследование особенностей распределения водородных и азотных дефектов в кристаллах алмазов выявило важную закономерность – повышение температуры на некотором этапе роста кристалла алмаза сопровождается возрастанием в нем концентрации водорода [16]. Поэтому можно предположить, что именно водород являлся основным поставщиком глубинной энергии, необходимой для функционирования алмазообразующей системы.

Подводя итог краткому анализу условий кристаллизации алмазов в мантии, можно обозначить моменты, наиболее важные для понимания состояния среды образования алмазов и ее термодинамических параметров.

Алмазы кристаллизовались в гетерогенной среде, содержащей твердую, жидкую и, возможно, газовую фазы. Жидкая фаза, вероятно, также была гетерогенной и имела силикатно-карбонатный или силикатно-металлический состав. Газовые компоненты, преимущественно метан и водород, находились в растворенном состоянии, но частично могли присутствовать и в виде газовой фазы.

Растворимость водорода в силикатных расплавах при термодинамических параметрах, соответствующих образованию алмаза, незначительна и по результатам экспериментов составляет около $\sim 7 \cdot 10^{-3}$ мас.% [21, 26], а для расплава металлического железа растворимость возрастает на порядок и составляет $4 \cdot 10^{-2}$ мас.% [27, 28]. Это определяет преимущественное накопление водорода в фрагментах расплава железа при их прохождении через силикатный расплав.

Метан можно рассматривать в качестве основного источника углерода для роста алмазов. При кристаллизации алмазов типа CLIPPIR в оболочке железо-никелевого расплава возможна реакция металлического железа с метаном с образованием свободного углерода [19]. Углерод будет концентрироваться преимущественно в железо-никелевом расплаве в связи с большей растворимостью в нем по сравнению с силикатным расплавом. Насыщенный углеродом железо-никелевый расплав представляет в данном случае алмазообразующую среду, захваченные фрагменты которой и были выявлены при исследовании алмазов типа CLIPPIR, принципиальная схема этого процесса показана на рис.2.

Равновесные температуры и давления, определенные для алмазов различными методами, находятся в диапазоне 900-1300 °С и 4,5-6,5 ГПа соответственно [29]. Экспериментально показано, что рост алмаза на затравках возможен, начиная с температуры 1400 °С при 7,5 ГПа и 1520 °С при 6,3 ГПа. Для гомогенной нуклеации алмаза в кимберлитовом расплаве требуются более высокие P - T -параметры. (1570 °С при 7,5 ГПа) [30]. Следовательно, термодинамические параметры в литосферной и сублитосферной мантии в интервале глубин 120-750 км определяют возможность роста кристаллов алмаза в силикатно-карбонатных и железоникелевых расплавах и создают возможность для их перемещения в соответствующих флюидонасыщенных жидких средах.

Весьма интересен состав флюидных компонентов, которые в виде включений в алмазе доставляются с мантийных глубин к поверхности. Уже ранние исследования, проведенные С.И.Мелтоном и А.А.Гиардини [4, 5, 31] и подтвержденные позднее [32], позволили обнаружить во включениях H_2 , H_2O , CO , CO_2 , CH_4 , N_2 , а также O_2 , Ar и тяжелые углеводороды. Экспериментально доказана возможность образования углеводородов за счет реакции углерода из различных источников (карбонатов, графита, алмаза, аморфного углерода) и водорода [33], генерируемого реакцией Fe^0 или $Fe^{+2}O$ с водой.

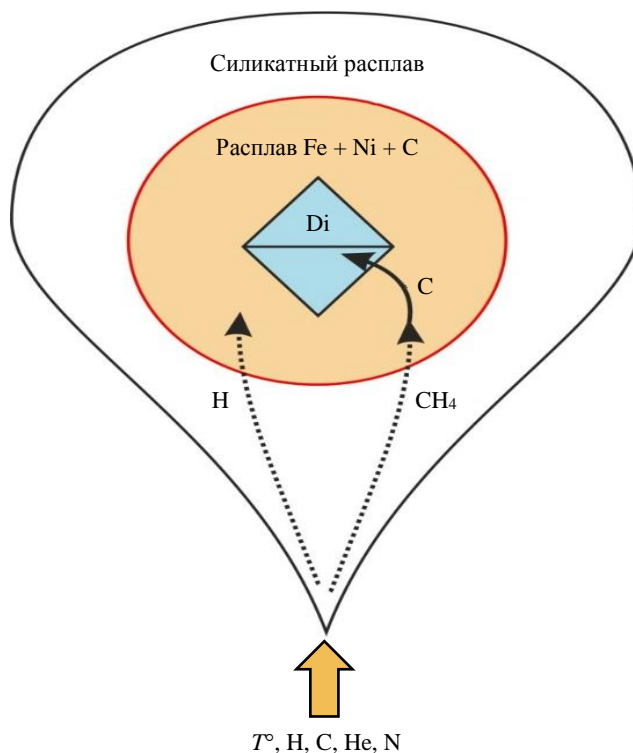


Рис.2. Подсистема образования алмазов в железо-никелевом расплаве



Важные данные получены при исследовании взаимодействия в системе карбонат (CaCO_3 , MgCO_3 , $\text{Ca}(\text{Fe}_{0,5}\text{Mg}_{0,5})(\text{CO}_3)_2$) – вюстит (FeO) или Fe^0 – H_2O [34-36]. Установлено, что такое взаимодействие обеспечивает образование смеси легких алканов с преобладанием CH_4 при P - T -параметрах верхней мантии. Более того, в богатом водой флюиде может возникать значимое количество кислородсодержащих органических веществ (C_9 - C_{10} альдегидов) и тяжелых алканов (C_{12} - C_{16}) [36]. Экспериментальные исследования показали, что в мантийных условиях с повышением глубины увеличивается вероятность генерации все более тяжелых углеводородов [37]. Следовательно, теоретические расчеты, результаты экспериментальных исследований и анализ флюидных включений в алмазах свидетельствуют о существовании углеводородных соединений в мантийных условиях.

Механизмы транспортировки алмазов из мантийной области их кристаллизации к конечному приповерхностному алмазоносному кимберлитовому телу. Главным регламентирующим моментом в механизме переноса алмазов из области кристаллизации к приповерхностному кимберлитовому или лампроитовому телу являются условия их сохранности. На восходящей траектории подъема алмаз пересекает границу своей устойчивости и может превратиться в графит. Скорость этой реакции зависит от температуры, давления и состава среды, в которой алмаз перемещается к поверхности Земли. Значимая скорость перехода алмаза в графит достигается только при температуре выше $1000\text{ }^\circ\text{C}$, которая соответствует глубине более 40 км. Следовательно, восходящий перенос алмаза от места образования до глубин, обеспечивающих его сохранность, должен осуществляться или с высокой скоростью, или в среде, сохраняющей условия его стабильности в значительном интервале его перемещения. Возможно и сочетание этих условий.

Заключения о скоростях подъема кимберлитовой магмы основаны на различных кинетических ограничениях и предполагают типичные скорости в диапазоне 10-30 м/с в глубокозалегающих средах [38, 39]. Динамика этого процесса может уточняться результатами изучения вещественных и онтогенических особенностей алмазов. Например, особенностью россыпных алмазов территории Зимми в Западной Африке является низкая степень агрегации в них азота с преобладанием C -центров. Эта особенность объясняется тем, что алмазы после завершения роста были быстро перемещены на глубины, в пределах которых температуры уже недостаточны для агрегации азота [40].

Основные модели переноса алмаза из места кристаллизации в приповерхностные части земной коры можно разделить на два типа. Первый предполагает гидродинамическую связь областей формирования и конечного накопления алмазов. Вторым типом основан на представлениях о возникновении локальных порций содержащей алмазы кимберлитовой магмы, которые отделяются от исходного алмазообразующего магматического очага и автономно перемещаются к поверхности. Поскольку у исследователей нет информации о веществе по трассе перемещения кимберлитового расплава, то при выборе наиболее предпочтительного варианта необходимо принимать во внимание морфологические особенности, внутреннее строение кимберлитовых тел и специфику содержащихся в них алмазов.

Важнейшая особенность кимберлитовых трубок, основных хранителей глубинных алмазов, которые являются вулканическими аппаратами [10], – ограниченный объем заключенного в них кимберлитового материала. В отличие от обычных вулканов кимберлитовые аналоги никогда не образуют крупных вулканических построек. На слабо эродированных кимберлитовых телах (трубки Орапа, Мвадуи) в приповерхностной части образуются только невысокие периферические туфовые кольца, а в кратерной части отмечаются отложения кратерных озер. Весьма показательны результаты исследования наиболее молодых голоценовых кимберлитовых тел, выявленных в Танзании, которые сохранились почти в первозданном виде [41]. Они представляют собой низкие вулканические постройки, высота которых даже с учетом эродированной части не превышала 100 м, сложенные пирокластическим материалом с небольшим объемом лав. Эти особенности объясняются формированием кимберлитовых диатрем в результате поступления в приповерхностную зону земной коры локальной ограниченной по объему порции флюидизированной кимберлитовой магмы.



Существующие модели подъема кимберлитов предполагают восходящее перемещение локальной, ограниченной по вертикали, трещины, которая заполнена богатой летучими компонентами магмой, вверх через мантийную литосферу. Выделение газов и расширение жидкой фазы в мигрирующей трещине создает градиенты давления более 70 МПа [42], что позволяет ей подниматься с высокой скоростью. Такой дискретно-импульсный механизм детально рассмотрен в публикациях [43-45]. В работе [43] проанализированы процессы дифференциации в перемещающейся порции мантийного вещества, представленного смесью флюидизированного силикатного расплава, мантийных ксенолитов и алмазов. Эта порция гетерогенного флюида может автономно перемещаться вверх за счет приоткрытия верхнего выклинивания трещины с увеличением объема и параллельным падением давления в системе, приводящего к схлопыванию в области нижнего выклинивания трещины [45]. В соответствии с предлагаемым механизмом снижение давления в трещинной полости приводит к частичной дегазации расплава и созданию псевдооживленной, богатой твердыми частицами суспензии. На твердые фрагменты, находящиеся в заполняющем трещину флюидизированном силикатном расплаве, действуют две разнонаправленные силы: направленная вниз сила гравитации и направленная вверх сила восходящего потока газовых пузырьков дегазируемой магмы. Активное взаимодействие между твердыми частицами способствует механическому измельчению мантийных ксенолитов и ксенокристаллов, вызывая изменение их формы и характера поверхности. Мантийный груз (ксенокристаллы и ксенолиты) непрерывно оседает через столб расплава, накапливаясь в области нижнего выклинивания трещины, по следу которой формируется богатый кристаллами и ксенолитами хвост [43].

Ключевые аспекты рассматриваемой модели:

- Зарождение алмазосодержащего мантийного расплава происходит в области повышенной пластичности, что предполагает близкую к сферической форму исходной порции расплава.
- При переходе в более хрупкие породы в процессе восходящего перемещения исходная порция расплава будет приобретать все более уплощенную и протяженную по вертикали форму, способствующую увеличению скорости ее подъема за счет увеличения градиента давления между нижним и верхним ее выклиниванием.
- Способность к восходящему перемещению порции расплава зависит от избыточного давления растворенных в расплаве флюидных компонентов (H_2O , CO_2 , H_2 , CH_4 и др.). Данная модель реализуется только при условии существенно более высокого давления в восходящей порции расплава по сравнению с литостатическим давлением, что предполагает сохранение термодинамических параметров устойчивости алмаза до более высоких уровней при его восходящем перемещении. Продвижение вверх локальной внутритрещинной порции расплава может прекратиться при исчерпании накопленной энергии и возобновиться при дополнительном ее поступлении в виде глубинного флюидного потока.
- По мере перемещения вверх будет происходить фазовая дифференциация этой гетерогенной системы с перемещением газовой фазы в верхнюю часть и осаждением твердых фаз в область нижнего выклинивания. Особенно интересен результат захвата твердых фаз при схлопывании трещины в области нижнего выклинивания. По представлению Р.К.Бретта этот богатый кристаллами хвост (relict dyke) образует подобие гипабиссальной интрузии [43]. Однако, с учетом очень высокой скорости продвижения трещины по такому механизму (до 20-90 м/с) [46], трудно предполагать накопление большого объема твердой фазы; скорее это будет цепочка захваченных при схлопывании трещины мантийных ксенолитов, их фрагментов и, что существенно важно, алмазов. Фактически это новый тип алмазных концентраций, который вряд ли будет представлять промышленную ценность в связи с малой вероятностью попадания на современную поверхность и низкой концентрацией алмазов, но можно предположить его выход на эрозионный срез в наиболее эродированных фрагментах кристаллического фундамента, где эти образования могут стать коренными источниками россыпей. Возможно, такие образования были поставщиками алмазов в россыпи восточного склона Анабарского щита, коренные источники которых до сих пор не обнаружены.
- Рассматриваемый механизм перемещения дискретных трещин подобен механизму гидро-разрыва, который широко используется для активизации извлечения нефти. Эта технология предполагает использование пропанта – твердых гранул, препятствующих полному закрытию трещин

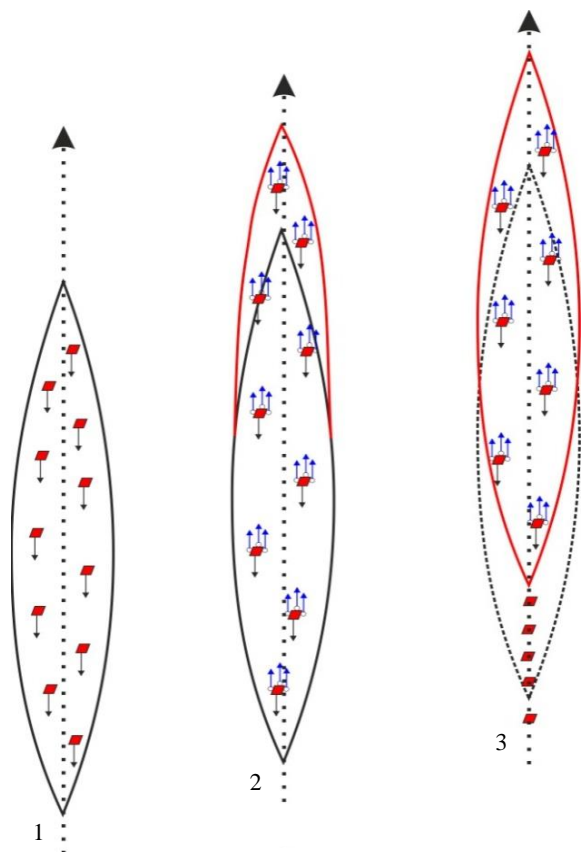


Рис.3. Схема дискретно-импульсной системы восходящей миграции алмазоносного флюидизированного расплава
 1 – исходное состояние заполненной расплавом трещины с кристаллическими фрагментами; 2 – приоткрытие трещины в области верхнего выклинивания с увеличением объема трещинной полости и дегазацией магмы; 3 – схлопывание трещины в области нижнего выклинивания с захватом кристаллических фрагментов по трассе ее перемещения

гидроразрыва. Твердые фрагменты мантийного вещества, захваченные по мере восходящего перемещения вмещающей его трещины, также могут выполнять функции пропанта, сохраняя проницаемость для глубинных флюидных компонентов в пределах траектории следа от перемещающейся трещины. По этой проницаемой структуре могут перемещаться дополнительные порции мантийных флюидов, поддерживающих процесс ее восходящего перемещения. Принципиальная схема дискретно-импульсной системы транспортировки содержащей алмазы порции расплава показана на рис.1, а отдельные стадии ее перемещения отражены на рис.3.

Различный вклад тектонических и флюидодинамических процессов в восходящий перенос локальных порций алмазосодержащего расплава должен проявляться на разных глубинных уровнях. В подлитосферной мантии при относительно высокой доле жидкой фазы ведущую роль в перемещении насыщенных флюидом фрагментов алмазосодержащего расплава будут играть флюидодинамические процессы. При продвижении вверх и сегрегации его каплевидных выделений будут возникать более крупные скопления флюидизированного расплава, движение которого может поддерживаться подтоком дополнительных порций газовой фазы. При переходе по восстанию в твердую среду литосферной мантии сформируется трещинная полость по механизму, близкому к гидроразрыву.

На этом этапе важно подчеркнуть первичность флюидодинамических процессов, которые используют уже существующие неоднородности в горных породах (в том числе и тектонические трещины) для генерации трещинной полости, заполненной алмазоносной флюидизированной магмой. При дальнейшем автономном восходящем движении она может сопрягаться с другими ранее возникшими тектоническими трещинами или формировать их по механизму гидроразрыва, используя локальные неоднородности в породах любого происхождения.

Концентрирование алмазов в приповерхностных кимберлитовых телах. Механизм формирования кимберлитовых трубок рассмотрен в многочисленных публикациях [9, 10, 47]. В.А.Милашев выделяет два главных этапа этого процесса: этап разработки трубообразной полости, который развивается от земной поверхности вглубь, и этап ее заполнения магматическим материалом, начиная из глубины к поверхности [10].

Большинство исследователей при изучении кимберлитовых трубок пришли к выводу об образовании диатрем с участием магматических расплавов, флюидов и газов [44, 48]. Мнения расходятся по вопросам значимости отдельных фаз в процессах формирования полости и становления трубок. Однако трудно отрицать, что необходимым условием реализации этих процессов является наличие флюидного потока, который после отделения от кимберлитовой магмы определяет флюидодинамический режим взрывной фазы формирования кимберлитовых тел, а проходя сквозь магму выступает в качестве трансмагматического флюида. По данным источников [46, 48] кимберлитовый флюид представлял собой жидкость преимущественно карбонат-магнезильного состава, обогащенную водой и углекислым газом, содержащую взвешенную твердую фазу.



Функции этого флюида разнообразны: активный теплоперенос в кимберлитовой магматической системе с нижних уровней к верхним; основная движущая сила переноса мантийных ксенолитов, алмазов и других твердых фрагментов с различных уровней кимберлитовой системы к поверхности; разработка трубообразной полости, вмещающей кимберлитовое тело; внутритрубочная дифференциация кимберлитовой магмы; реализация процессов формирования автомагматических метасоматитов.

В механизме формирования кимберлитовых и лампроитовых тел необходимо отметить принципиальный аспект, не нашедший достаточного отражения в публикациях. В алмазоносной флюидно-магматической системе в процессе ее развития силикатный расплав после подъема на уровень корневой части трубки ведет себя пассивно. Основные процессы формирования трубообразных полостей и специфика механизма их выполнения регламентируются флюидодинамическим режимом, определяемым кинетической энергией отделяющегося от кимберлитового расплава газа. Основным его источником является газ, выделяемый в процессе ретроградного кипения кимберлитовой магмы при падении давления в приповерхностных условиях. Возможно участие и других источников газовой фазы: трещинных и пластовых вод вмещающих пород, озерных и морских вод при извержении в водную среду. Именно эта флюидная фаза в свободном виде приводит к разработке трубообразной полости, а, выступая в качестве трансмагматического потока газовых пузырьков, способствует переносу в кимберлитовой магме находящихся в ней твердых фаз, в том числе и алмазов. Исходя из предлагаемого механизма формирования кимберлитовых трубок, их морфологические особенности будут зависеть от флюидодинамического режима данного процесса, определяющегося следующими факторами: давление находящихся в магме газов на момент начала их отделения от магмы; перепад давления от уровня зарождения трубки до земной поверхности; объем дегазируемой части магматической системы (ее флюидный потенциал); глубина начала вскипания магмы; длительность эксплозивного этапа; непрерывность или дискретность эксплозивного и интрузивного процессов; длительность интервала между эксплозивными актами; пространственная совмещенность или разобщенность отдельных актов эксплозивного процесса; участие только магматического флюида или дополнительное вовлечение флюида из внешнего источника; характер проницаемости пород на интервале прохождения флюида; среда поверхностной дегазации (атмосфера или водная среда).

Дегазация магмы в интрузии трещинного типа при ее подъеме к поверхности начинается с головной части магматической колонны и только с момента прямого соединения кимберлитовой флюидно-магматической системы с палеоповерхностью. Процесс дегазации быстро локализуется у основания будущей трубки в участке, где падение давления максимально. По мере падения давления фронт дегазации смещается вглубь и расширяется, захватывая все большие объемы магмы, в которой флюидное давление еще не упало до предела растворимости газа при данных термодинамических параметрах. Результатом проявления этого процесса является возникновение в дайке столбообразной области дегазации магмы под основанием формирующегося трубообразного кимберлитового тела, в пределах которой до завершения момента дегазации будет существовать поток газовых пузырей (рис.4).

При выходе магмы в полость формирующейся кимберлитовой трубки кристаллы алмаза совместно с другими твердыми фазами будут перемещаться во флюидном потоке вверх вплоть до земной поверхности с участием природных флотационных процессов. Следовательно, распределение алмазов в пределах кимберлитовой трубки будет определяться флюидодинамическим режимом их формирования, что является принципиальной основой разработки критериев алмазоносности кимберлитовых и лампроитовых тел. При этом вероятность активного флюидодинамического режима в дайкообразных телах и силах значительно ниже, чем в трубках, что существенно снижает их потенциальную алмазоносность.

Темп дегазации магмы будет определяться начальными значениями градиента давления флюидной фазы на уровне основания кимберлитовой трубки и вязкостью флюидно-магматической субстанции, которая связана функциональной зависимостью с вязкостью кимберлитового расплава, его флюидонасыщенностью и количеством взвешенной твердой фазы. Этот механизм, элементом которого является и природная флотация, может объяснить многие особенности распределения в пределах кимберлитовых систем мантийных ксенолитов, алмазов и других твердых фаз, находящихся в кимберлитовом расплаве в процессе его внедрения.

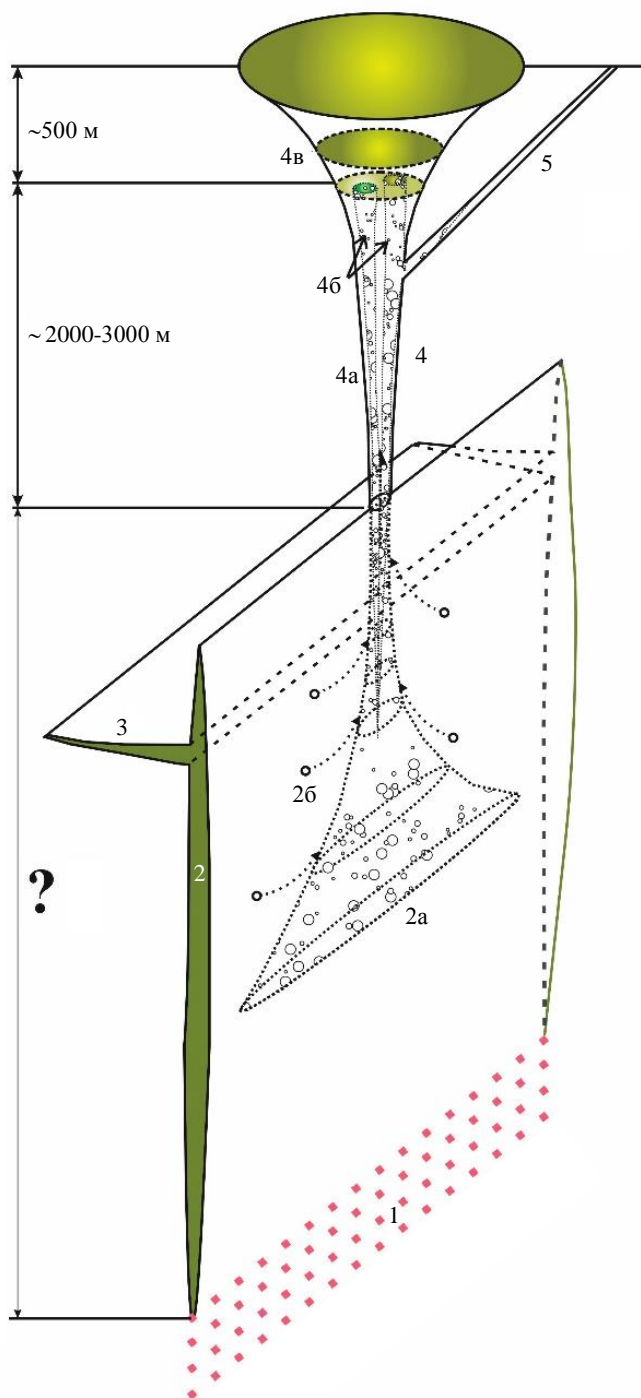


Рис.4. Схема концентрации алмаза в приповерхностном кимберлитовом (лампроитовом) теле

- 1 – реликтовая дайка; 2 – подводящая дайка (2а – стержневая зона активной дегазации; 2б – направление сбора газовых компонентов);
- 3 – кимберлитовый силл; 4 – кимберлитовая трубка (4а – диатремовая часть; 4б – трансмагматические флюидные потоки; 4в – кратерная часть); 5 – отводящая дайка

Важно подчеркнуть, что на уровне формирования кимберлитовых и лампроитовых трубок велико активное влияние флюодинамических процессов. Анализ трещиноватости во вмещающих кимберлитовые тела породах привел С.И.Костровицкого и других исследователей к выводу о дотрубочном характере всех трещин, активизация которых вблизи кимберлитовых тел связана с локальным полем напряжения, возникающем в процессе внедрения кимберлитового расплава [46-48]. Характер сочетания флюодинамических и тектонических процессов находит отражение в морфологических особенностях кимберлитовых тел. Совместное влияние тектоники и флюодинамики проявляется в сочетании плоскостных и конусных элементов в морфологии кимберлитовых тел, отражающих плоскостную симметрию тектонических и центральную симметрию флюодинамических процессов соответственно. Это наблюдается как в морфологических особенностях поперечных сечений кимберлитовых тел (рис.5, а), так и в их вертикальном сечении (рис.5, б) со сменой преимущественно линейных форм на конусные по направлению к поверхности, которая определяется увеличением скорости флюидного потока при дегазации кимберлитовой магмы по мере его продвижения к поверхности и возрастания градиента давления [48].

Характер внедрения кимберлитовой магмы, доставленной в виде ограниченной порции в приповерхностные зоны (первые километры от палеоповерхности), определяется флюодинамическим режимом реализуемых магматических систем. В условиях относительно закрытых систем, которые не имеют непосредственной связи с земной поверхностью, образуются преимущественно дайки и силлы. При возникновении прямой гидродинамической связи локальных кимберлитовых флюидно-магматических систем с земной поверхностью во фронтальных частях магмоподводящих трещин зарождаются трубообразные тела как следствие гетерогенизации насыщенного флюидом кимберлитового расплава, в котором флюидная фаза начинает играть формообразующую роль и определяет процессы вертикальной и латеральной дифференциации гетерофазовой флюидно-магматической системы. Схема этого процесса, который сопровождается возникновением на верхних уровнях двух принципиально различных по флюодинамическому режиму магматических кимберлитовых систем, приведена на рис.б.

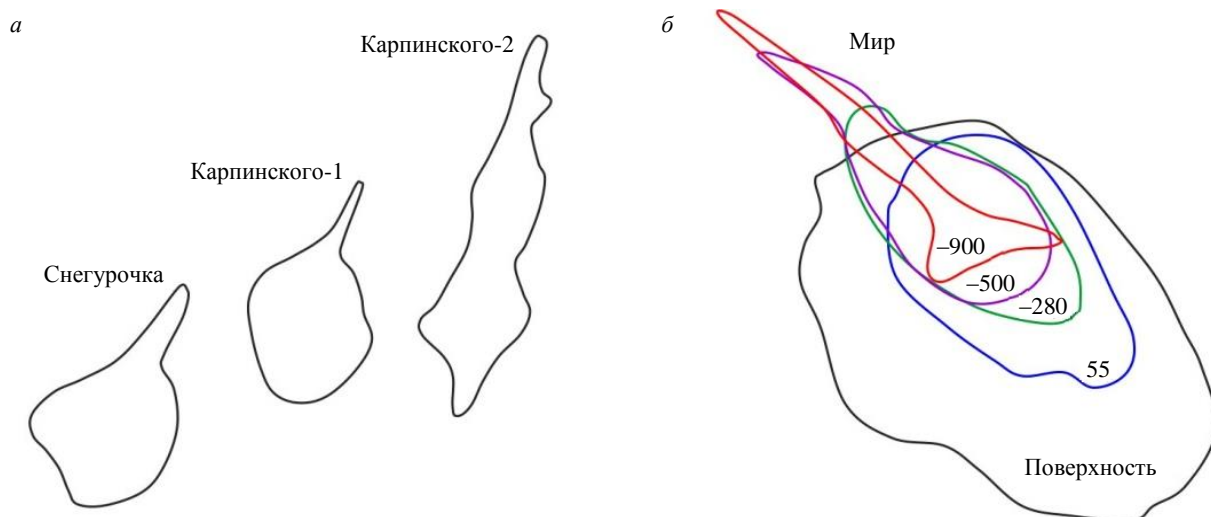


Рис.5. Соотношение линейных и округлых элементов в поперечном сечении кимберлитовых трубок на поверхности (а) и на различных гипсометрических уровнях (б)

Заключение. Результаты анализа предлагаемой геолого-генетической модели алмазонной флюидно-магматической системы позволяют сделать следующие выводы:

- На мантийных глубинах, соответствующих уровням образования алмазов, в свободном и растворенном в расплавленном веществе виде присутствуют водород, гелий, углекислый газ, азот, метан и тяжелые углеводороды. Непосредственной средой кристаллизации алмазов могут являться железо-никелевые или силикатно-карбонатные расплавы.

- Наиболее эффективно восходящее перемещение содержащей алмазы кимберлитовой магмы реализуется по дискретно-импульсному механизму автономной миграции вмещающей ее трещинной полости, который обеспечивает высокую скорость подъема магмы и длительное сохранение в ней термодинамических условий устойчивости алмаза. В зависимости от стартовых параметров восходящей порции магмы ее перемещение до поверхности может осуществляться одноактно или многоактно. Важнейшими параметрами исходной порции расплава, определяющими ее миграционный потенциал, являются объем расплава, его температура, давление и содержание растворенной газовой фазы. При восходящем движении кимберлитовмещающей трещины залечиваемый шов по трассе ее перемещения еще длительное время может быть проницаемым, что дает возможность пополнения восходящей порции кимберлитового расплава мантийным флюидом, которое может приводить к возобновлению процесса перемещения трещины. В процессе восходящего подъема локальная трещинная порция расплава может захватывать жидкие и твердые фрагменты вещества вдоль трассы перемещения, в том числе и алмазы, образовавшиеся на более высоких уровнях.

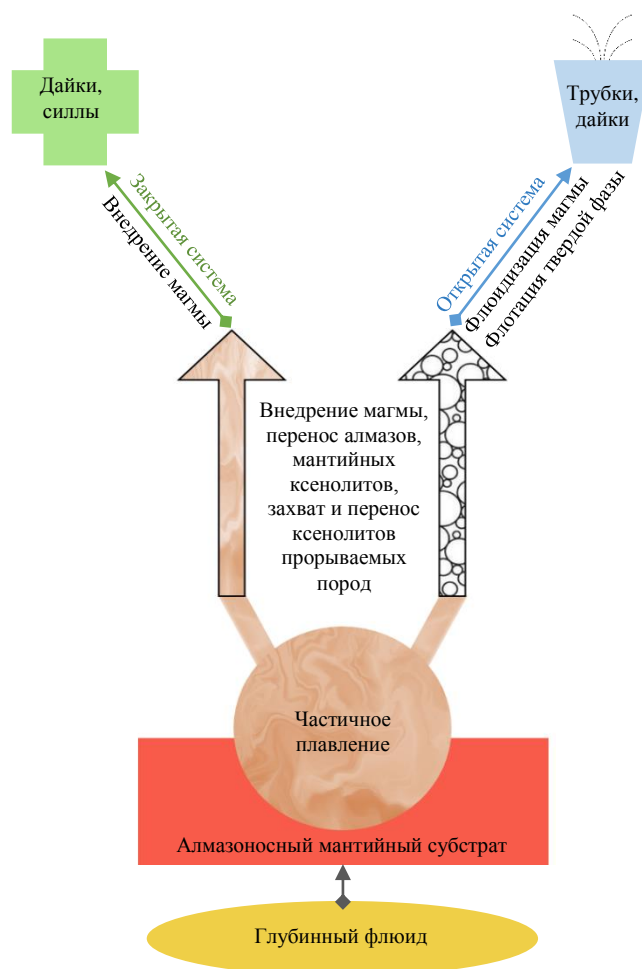


Рис.6. Развитие алмазонной флюидно-магматической системы на различных уровнях становления



• Алмазы в процессе переноса по механизму автономной миграции трещины, заполненной флюидизированным расплавом, наравне с мантийными ксенолитами находятся в твердом состоянии и поэтому могут при схлопывании нижней части трещины захватываться и трассировать след ее перемещения. Эти алмазы из-за нахождения в твердой среде могут испытывать пластические и хрупкие деформации.

• Алмазоносными могут быть не только кимберлитовые (лампроитовые) трубки, дайки и силлы, но и другие породы, попавшие на трассу восходящего перемещения локальной порции алмазосодержащей флюидно-магматической субстанции (породы кристаллического фундамента, выведенные на поверхность в результате высокоамплитудных поднятий). Таков предполагаемый коренной источник алмазов анабарских россыпей, который до сих пор не выявлен. Потенциальным индикатором таких локальных алмазоносных структур могут быть аномалии хрома в кислых метаморфитах, возникшие в результате захвата зерен хромшпинелидов (типичных минералов кимберлитов) по трассе перемещения локальной порции алмазоносной флюидизированной магмы.

• Восходящее перемещение любых глубинных флюидов – силикатных расплавов с растворенными в них газами, непосредственно газов (в том числе углеводородов) – могут реализоваться по механизму автономной дискретно-импульсной миграции заполненных флюидом трещин. Высокая скорость их восходящего перемещения позволяет осуществить доставку к поверхности без существенных потерь в результате растворения в расплавах и сорбции на поверхности минеральных фаз.

ЛИТЕРАТУРА

1. Литвиненко В.С., Петров Е.И., Василевская Д.В. и др. Оценка роли государства в управлении минеральными ресурсами // Записки Горного института. 2023 Т. 259. С. 95-111. DOI: [10.31897/PMI.2022.100](https://doi.org/10.31897/PMI.2022.100)
2. Shirey S.B., Shigley J.E. Recent Advances in Understanding the Geology of Diamonds // *Gems & Gemology*. 2013. Vol. 49. № 4. P. 188-222. DOI: [10.5741/GEMS.49.4.188](https://doi.org/10.5741/GEMS.49.4.188)
3. Kenney J.F., Kutcherov V.A., Bendeliani N.A., Alekseev V.A. The evolution of multicomponent systems at high pressures: VI. The thermodynamic stability of the hydrogen-carbon system: The genesis of hydrocarbons and the origin of petroleum // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2002. Vol. 99. № 17. P. 10976-10981. DOI: [10.1073/pnas.172376899](https://doi.org/10.1073/pnas.172376899)
4. Melton C.E., Giardini A.A. The Composition and Significance of Gas Released from Natural Diamonds from Africa and Brazil // *American Mineralogist*. 1974. Vol. 59. № 7-8. P. 775-782.
5. Melton C.E., Giardini A.A. Experimental Results and a Theoretical Interpretation of Gaseous Inclusions Found in Arkansas Natural Diamonds // *American Mineralogist*. 1975. Vol. 60. № 5-6. P. 413-417.
6. Popov O., Talovina I., Lieberwirth H., Duryagina A. Quantitative Microstructural Analysis and X-ray Computed Tomography of Ores and Rocks – Comparison of Results // *Minerals*. 2020. Vol. 10. Iss. 2. № 129. DOI: [10.3390/min10020129](https://doi.org/10.3390/min10020129)
7. Smith E.M., Shirey S.B., Wuyi Wang. The Very Deep Origin of the World's Biggest Diamonds // *Gems and Gemology*. 2017. Vol. 53. № 4. P. 388-403. DOI: [10.5741/GEMS.53.4.388](https://doi.org/10.5741/GEMS.53.4.388)
8. Mukhina E., Kolesnikov A., Kutcherov V. The lower pT limit of deep hydrocarbon synthesis by CaCO₃ aqueous reduction // *Scientific Reports*. 2017. Vol. 7. № 5749. DOI: [10.1038/s41598-017-06155-6](https://doi.org/10.1038/s41598-017-06155-6)
9. Милашев В.А. Трубки взрыва. Л.: Недра, 1984. 268 с.
10. Милашев В.А. Кимберлиты и глубинная геология. Л.: Недра, 1990. 167 с.
11. Smith E.M., Shirey S.B., Nestola F. et al. Large gem diamonds from metallic liquid in Earth's deep mantle // *Science*. 2016. Vol. 354. Iss. 6318. P. 1403-1405. DOI: [10.1126/science.aal1303](https://doi.org/10.1126/science.aal1303)
12. Алексеев В.И., Марин Ю.Б. Вариации состава минералов группы пироклора в онгонитах и цвиттерах Верхнеурмийского массива (Дальний Восток) // *Записки Российского минералогического общества*. 2018. Т. 147. № 2. С. 65-79. DOI: [10.30695/zrmo/2018.1472.04](https://doi.org/10.30695/zrmo/2018.1472.04)
13. Cashman K.V., Sparks R.S.J. How volcanoes work: A 25 year perspective // *Geological Society of America Bulletin*. 2013. Vol. 125. № 5-6. P. 664-690. DOI: [10.1130/B30720.1](https://doi.org/10.1130/B30720.1)
14. Бутвина В.Г. Возможные алмазообразующие среды // *Научно-исследовательские публикации*. 2014. № 11 (15). С. 48-54.
15. Литвин Ю.А., Васильев П.Г., Бобров А.В. и др. Материнские среды природных алмазов и первичных минеральных включений в них по данным физико-химического эксперимента // *Геохимия*. 2012. № 9. С. 811-847.
16. Васильев Е.А., Козлов А.В. Водород в алмазе и термическая история кристаллов // *Записки Российского минералогического общества*. 2018. Т. 147. № 6. С. 103-112. DOI: [10.30695/zrmo/2018.1476.05](https://doi.org/10.30695/zrmo/2018.1476.05)
17. Скузоватов С.Ю., Зедгенизов Д.А., Шацкий В.С. и др. Особенности состава облакоподобных микровключений в октаэдрических алмазах из кимберлитовой трубки Интернациональная (Якутия) // *Геология и геофизика*. 2011. Т. 52. № 1. С. 107-121.
18. Литвин Ю.А. Экспериментальные исследования физико-химических условий образования природного алмаза на примере системы эклогит-карбонатит-сульфид-алмаз // *Геология рудных месторождений*. 2012. Т. 54. № 6. С. 523-539.



19. Smith E.M., Wuyi Wang. Fluid CH₄ and H₂ trapped around metallic inclusions in HPHT synthetic diamond // *Diamond and Related Materials*. 2016. Vol. 68. P. 10-12. DOI: [10.1016/j.diamond.2016.05.010](https://doi.org/10.1016/j.diamond.2016.05.010)
20. Frost D.J., Liebske C., Langenhorst F. et al. Experimental evidence for the existence of iron-rich metal in the Earth's lower mantle // *Nature*. 2004. Vol. 428. № 6981. P. 409-412. DOI: [10.1038/nature02413](https://doi.org/10.1038/nature02413)
21. Персиков Э.С., Бухтияров П.Г., Аранович Л.Я. и др. Экспериментальное моделирование процесса образования самородных металлов (Fe, Ni, Co) в земной коре при взаимодействии водорода с базальтовыми расплавами // *Геохимия*. 2019. Т. 64. № 10. С. 1015-1025. DOI: [10.31857/S0016-752564101015-1025](https://doi.org/10.31857/S0016-752564101015-1025)
22. Klepikov I.V., Vasilev E.A., Antonov A.V. Regeneration Growth as One of the Principal Stages of Diamond Crystallogenes // *Minerals*. 2022. Vol. 12. Iss. 3. № 327. DOI: [10.3390/min12030327](https://doi.org/10.3390/min12030327)
23. Костровицкий С.И., Спеццус З.В., Яковлев Д.А. и др. Атлас коренных месторождений алмазов Якутской кимберлитовой провинции. Мирный: АЛРОСА, 2015. 480 с.
24. Stachel T., Aulbach S., Harris J.W. Mineral Inclusions in Lithospheric Diamonds // *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 2022. Vol. 88. № 1. P. 307-391. DOI: [10.2138/rmg.2022.88.06](https://doi.org/10.2138/rmg.2022.88.06)
25. Green B.L., Collins A.T., Breeding C.M. Diamond Spectroscopy, Defect Centers, Color, and Treatments // *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 2022. Vol. 88. № 1. P. 637-688. DOI: [10.2138/rmg.2022.88.12](https://doi.org/10.2138/rmg.2022.88.12)
26. Персиков Э.С., Бухтияров П.Г., Польской С.Ф., Чехмир А.С. Взаимодействие водорода с магматическими расплавами / Эксперимент в решении актуальных задач геологии. М.: Наука, 1986. С. 48-70.
27. Skublov S.G., Berezin A.V., Xian-Hua Li et al. Zircon from a Pegmatite Cutting Eclogite (Gridino, Belomorian Mobile Belt): U-Pb-O and Trace Element Constraints on Eclogite Metamorphism and Fluid Activity // *Geosciences*. 2020. Vol. 10. Iss. 5. № 197. DOI: [10.3390/geosciences10050197](https://doi.org/10.3390/geosciences10050197)
28. Sokol A.G., Khokhryakov A.F., Borzdov Yu.M. et al. Solubility of carbon and nitrogen in a sulfur-bearing iron melt: Constraints for siderophile behavior at upper mantle conditions // *American Mineralogist*. 2019. Vol. 104. Iss. 12. P. 1857-1865. DOI: [10.2138/am-2019-7103](https://doi.org/10.2138/am-2019-7103)
29. Mitchell R.H. Kimberlites. Mineralogy, Geochemistry, and Petrology. Springer, 1986. 442 p. DOI: [10.1007/978-1-4899-0568-0](https://doi.org/10.1007/978-1-4899-0568-0)
30. Пальянов Ю.Н., Сокол А.Г., Хохряков А.Ф., Крук А.Н. Условия кристаллизации алмаза в кимберлитовом расплаве по экспериментальным данным // *Геология и геофизика*. 2015. Т. 56. № 1-2. С. 254-272. DOI: [10.15372/GiG20150113](https://doi.org/10.15372/GiG20150113)
31. Melton C.E., Giardini A.A. The nature and significance of occluded fluids in three Indian diamonds // *American Mineralogist*. 1981. Vol. 66. № 7-8. P. 746-750.
32. Сокол А.Г., Томиленко А.А., Бульбак Т.А. и др. Состав флюида восстановленной мантии по экспериментальным данным и результатам изучения флюидных включений в алмазах // *Геология и геофизика*. 2020. Т. 61. № 5-6. С. 810-825. DOI: [10.15372/GiG2020103](https://doi.org/10.15372/GiG2020103)
33. Peña-Alvarez M., Brovarone A.V., Donnelly M.-E. et al. In-situ abiogenic methane synthesis from diamond and graphite under geologically relevant conditions // *Nature Communications*. 2021. Vol. 12. № 6387. DOI: [10.1038/s41467-021-26664-3](https://doi.org/10.1038/s41467-021-26664-3)
34. Sharma A., Cody G.D., Hemley R.J. In Situ Diamond-Anvil Cell Observations of Methanogenesis at High Pressures and Temperatures // *Energy and Fuels*. 2009. Vol. 23. Iss. 11. P. 5571-5579. DOI: [10.1021/ef9006017](https://doi.org/10.1021/ef9006017)
35. Scott H.P., Hemley R.J., Mao H.-k. et al. Generation of methane in the Earth's mantle: In situ high pressure-temperature measurements of carbonate reduction // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2004. Vol. 101. P. 14023-14026. DOI: [10.1073/pnas.0405930101](https://doi.org/10.1073/pnas.0405930101)
36. Сонин В.М., Бульбак Т.А., Жимулев Е.И. и др. Синтез тяжелых углеводородов при температуре и давлении верхней мантии Земли // *Доклады Академии наук*. 2014. Т. 454. № 1. С. 84-88. DOI: [10.7868/S0869565214010216](https://doi.org/10.7868/S0869565214010216)
37. Lobanov S.S., Pei-Nan Chen, Xiao-Jia Chen et al. Carbon precipitation from heavy hydrocarbon fluid in deep planetary interiors // *Nature Communications*. 2013. Vol. 4. № 2446. DOI: [10.1038/ncomms3446](https://doi.org/10.1038/ncomms3446)
38. Russell J.K., Sparks R.S.J., Kavanagh J.L. Kimberlite Volcanology: Transport, Ascent, and Eruption // *Elements*. 2019. Vol. 15. № 6. P. 405-410. DOI: [10.2138/gselements.15.6.405](https://doi.org/10.2138/gselements.15.6.405)
39. Spera F.J. Carbon dioxide in petrogenesis III: role of volatiles in the ascent of alkaline magma with special reference to xenolith-bearing mafic lavas // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1984. Vol. 88. Iss. 3. P. 217-232. DOI: [10.1007/BF00380167](https://doi.org/10.1007/BF00380167)
40. Smit K.V., D'Haenens-Johansson U.F.S., Howell D. et al. Deformation-related spectroscopic features in natural Type Ib-IaA diamonds from Zimmi (West African craton) // *Mineralogy and Petrology*. 2018. Vol. 112. Suppl. 1. P. 243-257. DOI: [10.1007/s00710-018-0587-6](https://doi.org/10.1007/s00710-018-0587-6)
41. Brown R.J., Manya S., Buisman I. et al. Eruption of kimberlite magmas: physical volcanology, geomorphology and age of the youngest kimberlitic volcanoes known on earth (the Upper Pleistocene/Holocene Igwisi Hills volcanoes, Tanzania) // *Bulletin of Volcanology*. 2012. Vol. 74. Iss. 7. P. 1621-1643. DOI: [10.1007/s00445-012-0619-8](https://doi.org/10.1007/s00445-012-0619-8)
42. Sparks R.S.J. Kimberlite Volcanism // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 2013. Vol. 41. P. 497-528. DOI: [10.1146/annurev-earth-042711-105252](https://doi.org/10.1146/annurev-earth-042711-105252)
43. Brett R.C., Russell J.K., Andrews G.D.M. et al. The ascent of kimberlite: Insights from olivine // *Earth and Planetary Science Letters*. 2015. Vol. 424. P. 119-131. DOI: [10.1016/j.epsl.2015.05.024](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.05.024)
44. Wilson L., Head III J.W. An integrated model of kimberlite ascent and eruption // *Nature*. 2007. Vol. 447. № 7140. P. 53-57. DOI: [10.1038/nature05692](https://doi.org/10.1038/nature05692)
45. Жатнуев Н.С., Васильев В.И., Санжиев Г.Д., Васильева Е.В. Модель кимберлитового магматизма / *Материалы VI Всероссийской с международным участием конференции «Ультрамафит-мафитовые комплексы: геология, строение, рудный потенциал»*, 19-20 сентября 2024, Сахюрта, Россия. Иркутск: Оттиск, 2019. С. 119-125.
46. Костровицкий С.И. Физические условия, гидравлика и кинематика заполнения кимберлитовых трубок. Новосибирск: Наука, 1976. 96 с.



47. *Kjarsgaard B.A.* Kimberlite diamond deposits / Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces and Exploration Methods. Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, 2007. Special Publication № 5. P. 245-272.

48. *Rezvykhina O.V., Skublov S.G.* Rutile in diamondiferous metamorphic rocks: New insights from trace-element composition, mineral/fluid inclusions, and U-Pb ID-TIMS dating // *Lithos*. 2021. Vol. 394-395. № 106172. DOI: [10.1016/j.lithos.2021.106172](https://doi.org/10.1016/j.lithos.2021.106172)

Авторы: **А.В.Козлов**, д-р геол.-минерал. наук, заведующий кафедрой, <https://orcid.org/0000-0002-8759-4088> (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия), **Е.А.Васильев**, д-р геол.-минерал. наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-2216-0956> (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия), **А.С.Иванов**, канд. геол.-минерал. наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-8258-5967> (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия), **Я.Ю.Бушуев**, канд. геол.-минерал. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0002-1159-6175> (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия), **А.И.Колядина**, канд. геол.-минерал. наук, доцент, colyadina.a@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-5744-0004> (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.