

Термогидравлический эффект как возможная причина образования природных алмазов и условия его проявления

Показано, что образование алмазов может быть связано с проявлением термогидравлического эффекта – взрывной реакцией воды на импульсивное воздействие сверхвысоких температур, в данном случае кимберлитовых магм. Особенность процесса состоит в том, что в нём одновременно разрушается «старое» и создаётся «новое» с возможностью синтеза и сохранности идиоморфных кристаллов алмаза. Рассмотрены вопросы осуществления процесса в природных условиях. Отмечено наличие общей закономерности в размещении месторождений алмазов, состоящей в их предпочтительной приуроченности к немагнитным и слабомагнитным полям земной коры, которым свойственна восстановительная обстановка, благоприятная для образования алмазов и других полезных ископаемых.

Ключевые слова: термогидравлический эффект в образовании алмазов, закономерности размещения алмазных месторождений.

ЛИХАЧЁВ АЛЕКСАНДР ПЕТРОВИЧ, доктор геолого-минералогических наук

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Центральный научно-исследовательский геолого-разведочный институт цветных и благородных металлов» (ФГБУ «ЦНИГРИ»), г. Москва

Thermohydraulic effect as a possible reason for natural diamonds formation and its manifestation conditions

A. P. LIKHACHEV

Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals (TsNIGRI), Moscow

It is shown that diamond formation can be associated with the manifestation of the thermohydraulic effect, the explosive water reaction to the impulse action of ultrahigh temperatures (kimberlite magmas). The process simultaneously destroys the “old” diamonds and creates the “new” ones, with possible synthesis and preservation of idiomorphic diamond crystals. The issues of the process occurrence in natural conditions are considered. The general pattern in diamond deposits distribution is noted, which is their preferable confinement to non-magnetic and weakly magnetic fields of the Earth’s crust; these fields are characterized by a reducing environment favorable for diamonds and other minerals formation.

Key words: thermohydraulic effect in diamond formation, patterns of diamond deposit location.

Вопросы происхождения эндогенных алмазов по-прежнему остаются актуальными как в практическом, так и научном отношениях. Некоторые данные и представления о них получены автором в ходе многолетних исследований мафит-ультрамафитового магматизма и связанных с ним месторождений полезных ископаемых [11, 14–16].

В представленной статье основное внимание уделяется возможностям образования алмазов в пределах земной коры. Показывается, что в её условиях может проявляться процесс импульсивного воздействия высокотемпературной магмы на содержащуюся в коре воду, при котором совершается взрывная реакция воды, создающая высокие и сверхвысокие

давления. Данный процесс можно назвать термогидравлическим эффектом. Его осуществление наблюдалось автором в экспериментах по изучению состояния и поведения веществ при сверхвысоких температурах и давлениях, достигающих параметров устойчивости алмаза и превышающих их [13].

Исследования основывались на выявленном Прохоровым А. М. с сотрудниками [1, 2] светогидравлическом эффекте, возникающем в фокусе импульсного воздействия лазерного луча на вещества и предметы, погружённые в воду.

В экспериментах применялись квантовые генераторы, работающие на рубиновом и неодимовом стержнях. Энергия генератора на выходе изменялась от 2

до 300 Дж при длительности генерации от 500 до 1 мсек. Температура в фокусе луча, по приближительной оценке, достигала ≥ 5000 °С, а давление ≥ 100 ГПа.

В качестве исходного материала (мишени) использовались породы и руды норильских месторождений: пикритовый, такситовый и оливиновый габбро-долериты, пентландит-халькопирит-пирротиновые агрегаты, зёрна моноклинного пироксена (авгита) оливинового габбро-долерита.

Среди новообразованных продуктов находились идиоморфные кристаллы силикатных минералов (в основном состава пироксенов), выросшие за микросекундное время на шариках силикатного расплава (рис. 1, А, Б), а также отдельные их разновидности (см. рис. 1, В, Г).

Литературный поиск других воздействий сверхвысоких температур на воду приводит к известному электрогидравлическому эффекту (ЭГЭ), или эффекту Л. А. Юткина, который представляет собой высоковольтный электрический разряд в жидкой среде (заявка 1950 г. совместно с Л. А. Гольцевой «Способ получения высоких и сверхвысоких давлений»; авторское свидетельство получено в 1957 г., в дальнейшем они оформили около 150 изобретений на основе этого эффекта).

Наибольшее применение электрогидравлические методы получили при металлообработке в целях формования, штампования, калибрования, прессования, очистки, упрочнения, а также для воздействия на твёрдые и жидкие среды с целью изменения объекта, его избирательного разрушения, структурных преобразований среды. Этими методами осуществляется дробление самых различных материалов, начиная от простого превращения каменных глыб в щебень.

В современных представлениях полагается, что во время электрического разряда в воде происходят сложные процессы. На первой его стадии, длящейся микросекунды, образуется плазменный канал с температурой до 40 000 °С. Плазма расширяется со скоростью звука в воде (1410 м/с), создавая первую ударную волну и полость, наполненную раскалённым паром и газом, которая затем начинает пульсировать и в конце концов схлопывается. Возникающее давление может достигать 10^4 МПа и более.

Анализ происходящих при этом событий показывает, что в данном процессе, как и в автогидравлическом эффекте [1, 2], основной причиной возникновения высокого давления и его влияния на вещество, находящееся в водной среде или содержащее её в своём составе, является взрывная реакция воды на резкое (импульсное) воздействие высокой температуры.

На основании приведённых и других данных автором был сделан вывод [4], что вода земной коры

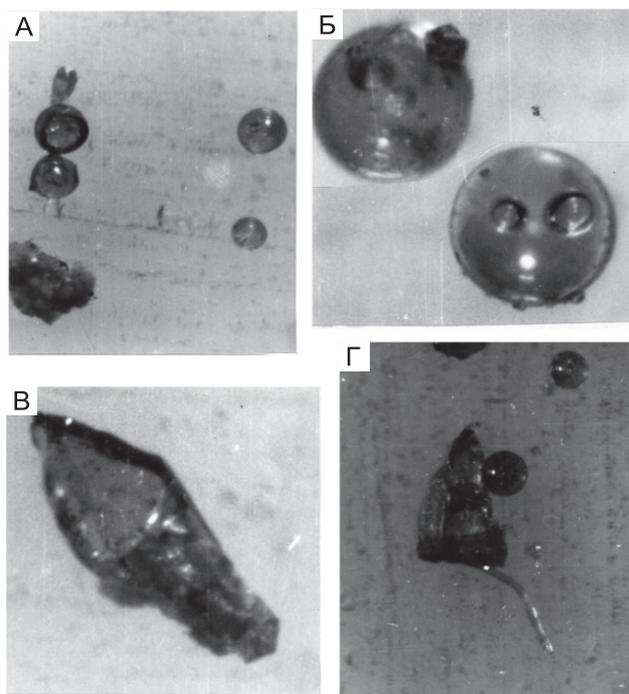


Рис. 1. Продукты, полученные при воздействии сфокусированного лазерного луча на образцы пород, погружённых в воду [12]:

А, Б – кристаллы на шариках силикатного расплава; В, Г – отдельные кристаллы, увел. 130; приблизительные параметры воздействия: энергия импульса ~ 2 Дж, температура в фокусе ~ 6000 °С, давление ~ 1 ГПа

может способствовать образованию алмазов и иных высокобарических фаз при импульсном воздействии на неё высокотемпературных мантийных магм.

Это допущение позволяет рассматривать кимберлитовые трубки как скоростные инъекции высокотемпературного расплава мантии в обводнённые тектонически нарушенные участки земной коры, которые сопровождаются термогидравлическими взрывами, вызываемыми импульсивным воздействием магмы на воду коры.

Следовательно, в данных случаях для образования алмазов кроме углерода требуются сверхвысокая температура магматического расплава и наличие существенного количества воды.

Сверхвысокая температура (до 1600 °С и более) является характерной особенностью кимберлитовых магм [22, 24], а наличие воды проявлено в массовой гидратации кимберлитов, включениях воды и гидрофлюидов в кристаллах алмаза и в том факте, что кимберлитовые трубки формируются и находятся в самой верхней, обычно обводнённой части земной коры (рис. 2). К тому же само образование трубок

определяется наличием воды. Без неё не происходит взрыва, то есть образуются в основном кимберлитовые дайки, не содержащие алмазов. Раструбная же (взрывная и наиболее алмазоносная) часть известных кимберлитовых трубок находится в водонасыщенной области разреза земной коры, располагаясь выше водоупорных горизонтов (см. рис. 2).

Скопления глубинных вод обычно свойственны тектонически нарушенным зонам. Размещение алмазоносных трубок также контролируется ими.

К разломным зонам, как известно, приурочены и русла рек планеты, питающих по своей протяжённости водой глубинные части разреза земной коры. При этом возможно формирование локальных участков, благоприятных для проявления термогидравлических взрывов и образования алмазоносных трубок.

Следовательно, русла рек древнего заложения могут контролировать нахождение таких трубок. Например, некоторые признаки их контроля проявлены в размещении кимберлитовых трубок Сибирского кратона и Южной Африки (рис. 3).

При сравнительно небольшом сечении каналов поступления высокотемпературной кимберлитовой магмы соприкосновение её с водной средой сопровождается однонаправленными импульсивными взрывами, которые разрушением встречаемых пород обеспечивают дальнейшее продвижение расплава и создают высокобарические условия для образования алмазов (рис. 4, А).

В этих взрывах, реакционных по сути и продуктивных по результативности, одновременно совершаются два процесса: разрушение (дробление и частичное плавление) «старого» и образование «нового». Разрушению подвергаются в основном твёрдые вещества (см. рис. 4, Б), а синтез осуществляется за счёт растворённых в воде компонентов. При наличии в водном растворе углерода могут синтезироваться алмазы идиоморфного габитуса, сохраняющиеся в целостности до завершения процесса кристаллизации кимберлитового расплава (см. рис. 4, В).

Импульсные взрывы имеют локальный характер. Они происходят на границе высокотемпературной магмы с вышележащей водной средой. Вначале магматический расплав поднимается в спокойном состоянии, создавая дайкообразные каналы, фиксируемые в настоящее время подводными дайками кимберлитовых трубок (см. рис. 2). Как только магма таких каналов достигает водонасыщенных горизонтов, начинают последовательно проявляться (по мере продвижения магмы) импульсные взрывы термогидравлического характера. И здесь же начинает формироваться раструбная часть трубок, как и происходит образование самих алмазов.

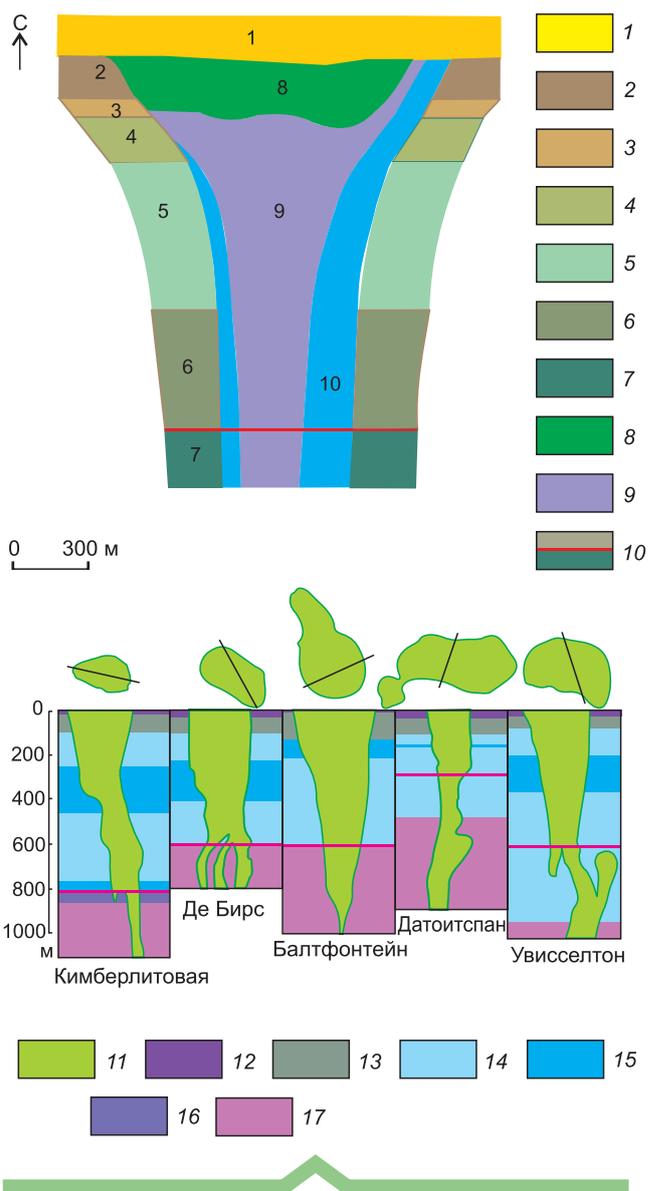


Рис. 2. Морфология и уровни размещения кимберлитовых трубок:

А – трубка Юбилейная Сибирской платформы [8]: 1 – перекрывающие породы верхнего палеозоя (углистые алевролиты, песчанистые алевролиты, разнозернистые песчаники, туфоалевролиты; 2–7 – вмещающие породы: 2 – известняки лландоверийского яруса меикской свиты, 3 – мергелистые и глинистые известняки кылахской свиты, 4 – доломиты и песчанистые известняки сохолоохской свиты, 5 – доломиты, глинистые доломиты и доломитистые известняки олдондинской свиты, 6 – терригенно-карбонатные породы маркокинской свиты, 7 – глинисто-карбонатные породы мархинской свиты; 8–9 – кимберлитовые породы: 8 – порфиоровые породы первой фазы внедрения, 9 – автолитовые брекчи второй фазы внедрения; 10 – приблизительная верхняя граница водоупорного горизонта; Б – трубки Южной Африки (очертания поверхности и вертикальные разрезы) [27]: 11 – кимберлиты; 12 – долериты и 13 – сланцы Карру; 14 – андезитовые лавы, 15 – кварциты и 16 – конгломераты формации Вентерсдорп 17 – гнейсы, амфиболиты, сланцы архейского фундамента

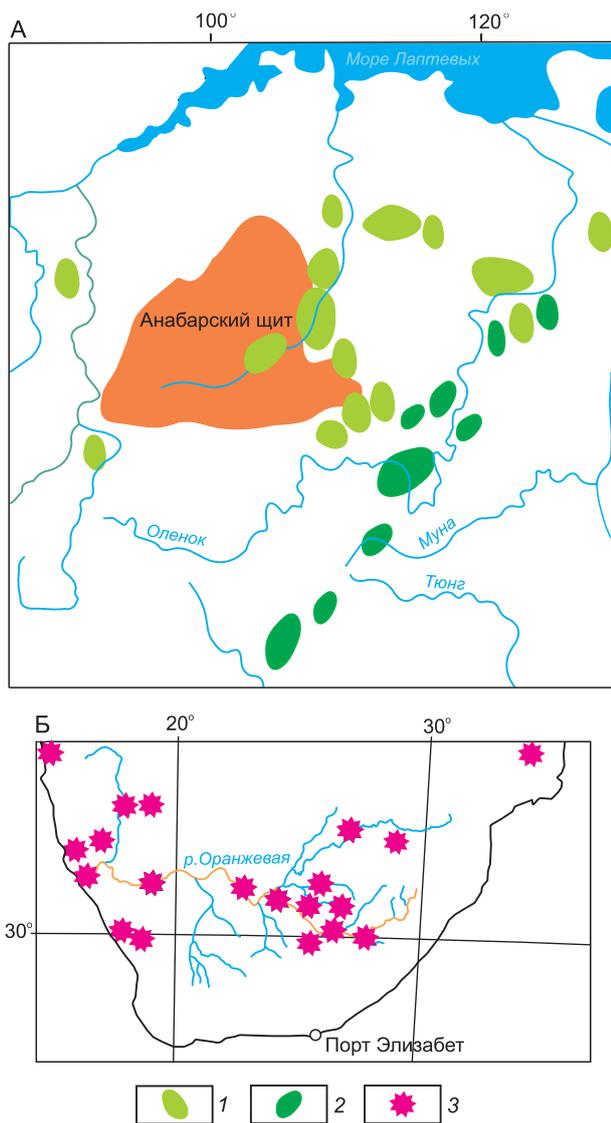


Рис. 3. Размещение кимберлитовых полей и трубок Сибири (А) и Южной Африки (Б) в соотношении с руслами рек:

поля: 1 – мезозойского и 2 – палеозойского возраста [23]; 3 – кимберлитовые трубки (данные сети интернета)

Раструбное расширение каналов осуществляется за счёт поступления новых порций магмы. Они вызывают новые импульсные взрывы, которые обеспечивают дальнейшее расширение раструба и продвижение трубки вверх. Всё это происходит до тех пор, пока поднимающаяся масса не приблизится к земной поверхности и не произойдёт открытый декомпрессионный взрыв, сопровождающийся снижением давления и обычно не образующий алмазы (см. рис. 4, А).

Образование алмазов совершается в области термогидравлического взрыва за счёт углерода, содер-

жащегося в водном флюиде. Под действием ударной волны, проходящей во флюидной среде, атомы углерода концентрируются в отдельных точках с образованием сначала зародышей (центров кристаллизации), а затем и самих кристаллов алмаза. Количество и размер их в основном зависят от содержания углерода во флюиде, которое, в свою очередь, определяется его растворимостью во флюидной среде. Рост кристаллов алмаза осуществляется практически мгновенно [12] и может продолжаться под действием последующих взрывов.

Во время взрыва, как говорилось выше, твёрдая составляющая среды подвержена механическому разрушению, продукты которого цементируются основной магматической массой кимберлитов наряду с цементацией порфировых выделений оливина и образованных кристаллов алмаза (см. рис. 4, Б).

На пути подъёма мантийным расплавом захватываются различные фрагменты вмещающих сред, представленные тугоплавкими реститами (в основном оливином) исходного материала и разнообразными

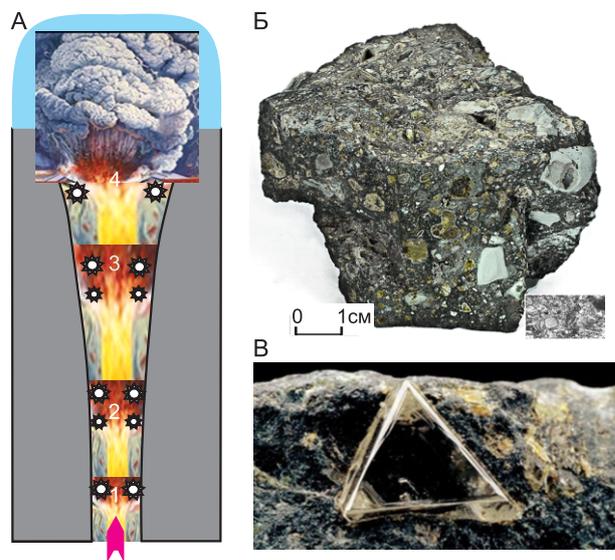


Рис. 4. Схема импульсивного внедрения кимберлитовой магмы с проявлением термогидравлических взрывов и образованием алмазов:

А – схема внедрения магмы; Б – продукты разрушения и цементации кимберлитовой магмой твёрдых веществ: порода насыщена ксенолитами аргиллитов (голубовато-серые), редкими обломками кимберлитов ранних фаз (коричневатые), единичными фрагментами глубинных ксенолитов (тёмно-коричневые) и ксенокристаллами оливина, серпентинизированная основная масса содержит порфировые вкрапленники оливина (данные Википедии); В – кристалл алмаза в кимберлите (данные Википедии)

ксенолитами, в том числе содержащими карбонаты, за счёт которых образуется некоторая часть алмазов.

Находящиеся в основной кимберлитовой массе включения обычно имеют беспорядочное распределение, свидетельствующее об отсутствии течений в магме, и «взвешенный» характер, выраженный в отсутствии соприкосновений между ними и указывающий на незначительное влияние гравитации (рис. 5). Всё это, как и мелкая зернистость основной массы породы, является признаком быстрой её кристаллизации в неуравновешенном состоянии, характерном для взрывных образований термогидравлического типа.

Условия для реализации перечисленных выше событий создавались на протяжении длительного времени эволюции Земли.

Общая дифференциация расплавленной массы планеты привела к образованию первичной мантии, которая в дальнейшем, испытывая частичное (парциальное) плавление, служила источником формирования земной коры и проявленных в ней магматических образований (рис. 6).

Кимберлитовые магмы относятся к продуктам частичного плавления наиболее магнезиальной и соответственно высокотемпературной части исходного вещества (см. рис. 6, А, ультрамафическая серия; и табл. 1), потерявшей мафическую и мезомафическую составляющие в более ранних процессах и представляющей собой реститовый материал.

Причём расплав кимберлитового состава является небольшой и наиболее легкоплавкой частью этого рестита, не захватывающей металлы платиновой группы (МПГ). Они остаются в конечном ультрамафитовом концентрате [11].

При зарождении кимберлитового расплава и образовании им малообъёмных кимберлитовых трубок платиноносный материал мантии находится в неподвижном состоянии из-за малой степени его плавления. Но при большем плавлении он становится подвижным, что обеспечивает его диапировый подъём в земную кору с проявлением меймечитового маг-

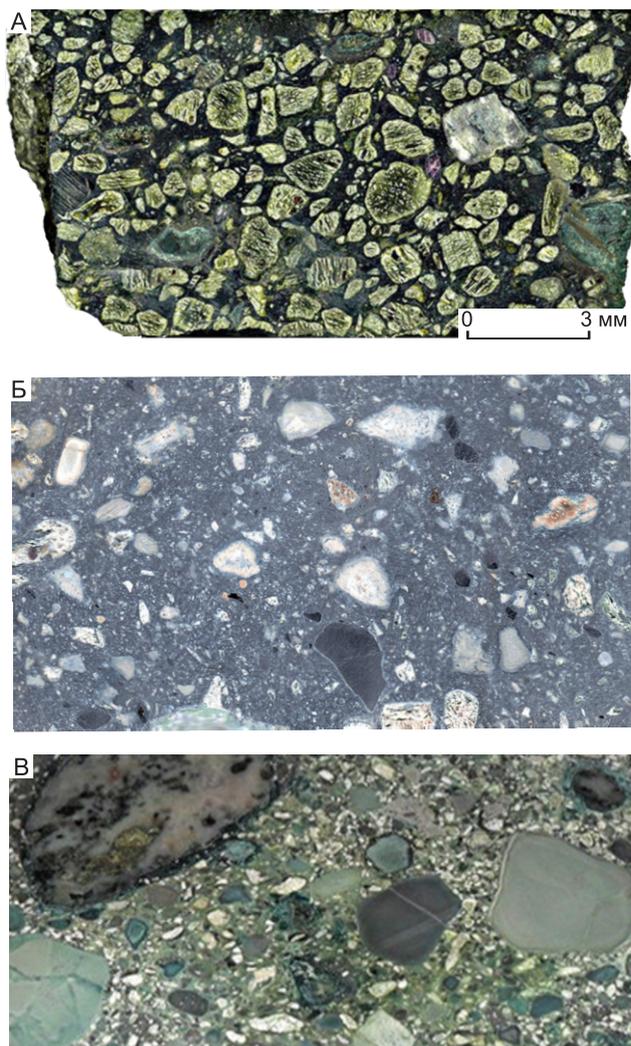


Рис. 5. Характер распределения включений в основной массе кимберлитов:

А – порфировый кимберлит трубки Интернациональная, на 60–70 % сложен мегакристаллами оливина; Б – кимберлит трубки Мир; В – кимберлитовая основная масса, цементирующая различные по составу фрагменты пород (данные сети интернет)

1. Сравнение составов кимберлита с перидотитом, дунитом и пироцитом по главным компонентам (в мас.%)

Компоненты	Перидотит	Дунит	Кимберлит	Пироцит
SiO ₂	44,44	43,81	40,4	49,4
FeO общ.	8,63	8,81	12,23	8,8
MgO	37,21	48,7	47,37	41,8

матизма и образованием платиноносных щелочно-ультраосновных комплексов [11, 16].

Платиноносность щелочно-ультраосновных комплексов является их неперемнным свойством [15]. Например, исходя из этой закономерности, автором в 1983–1984 гг. были обоснованы перспективность на МПГ щелочно-ультраосновных комплексов Маймече-Котуйской площади и постановка на ней поисковых работ. Выполнение их (с непосредственным участием автора) в 1984 г. и в последующие годы Полярной экспедицией ПГО «Красноярскгеология»

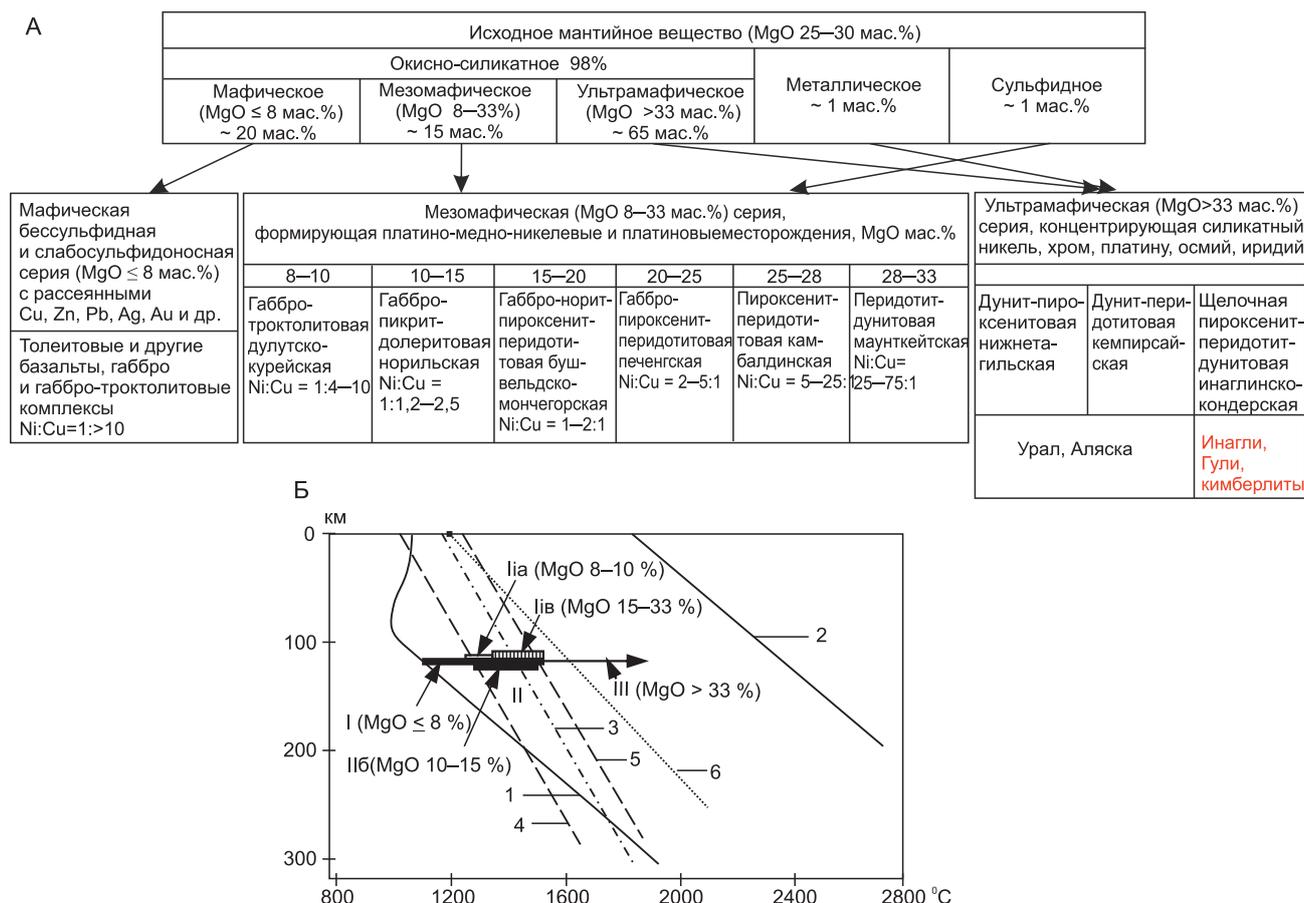


Рис. 6. Схемы генетической взаимосвязи магматических рудоносных формаций и месторождений [14, 15]:

А – общая взаимосвязь; Б – условия образования магматических продуктов: 1, 2 – линии солидуса и ликвидуса пиролита, содержащего 0,1% воды; 3 – линия солидуса пирротина; 4, 5 – предполагаемые линии солидуса и ликвидуса сульфидов мантии; 6 – сухой солидус перидотита; I – участок зарождения сравнительно низкотемпературных бессульфидных и слабосульфидоносных магм (MgO ≤ 8 %); участки зарождения сульфидоносных магм: IIa – относительно низкотемпературных (MgO 8–10 %), несущих богатые медью (по отношению к никелю) сульфиды (Ni:Cu = 1:2,5–10), IIб – среднетемпературных (Mg 10–15 %), включающих всю сульфидную фракцию исходного вещества (Ni:Cu = 1:1,2–2,5), IIв – высокотемпературных (MgO 15–33 %), содержащих бедные медью сульфиды (Ni:Cu = 1→10:1); III – участок образования бессульфидных высокотемпературных магм ультрамафического состава (MgO > 33 %)

дало положительные результаты (Акт о завершении внедрения рекомендации в производстве геолого-разведочных работ, первый этап, 1985 г.): 1) установлена платиноносность интрузивных массивов Гули, Кугда, Бор-Урях; 2) выявлены платиноносные участки аллювиальных и делювиальных отложений в пределах Гулинского интрузива, рекомендуемые для постановки поисково-оценочных работ; 3) оценены прогнозные ресурсы МПГ категорий P₁ и P₂ на перспективных участках Гулинского массива). В результате была открыта новая платиноносная Маймече-Котуйская провинция и находящиеся в ней конкретные платиноносные объекты [19, 29]. В дальнейшем к из-

учению платиновой минерализации Маймече-Котуйских массивов подключилось довольно большое количество сотрудников различных организаций, которые расширили сведения об их платиноносности [3, 9, 10, 20 и др.].

Необычной в рассматриваемых вопросах является сверхвысокая температура кимберлитовых магм. Она не согласуется с максимальной температурой (~ 1400 °C), устанавливаемой для глубинных ксенолитов, присутствующих в кимберлитах, и не находит объяснения в литературе [31]. Отмечается только то, что тугоплавкость кимберлитовых систем свидетельствует в пользу допущения неизвестного дополнительного

источника тепла в процессе образования кимберлитовых магм [24].

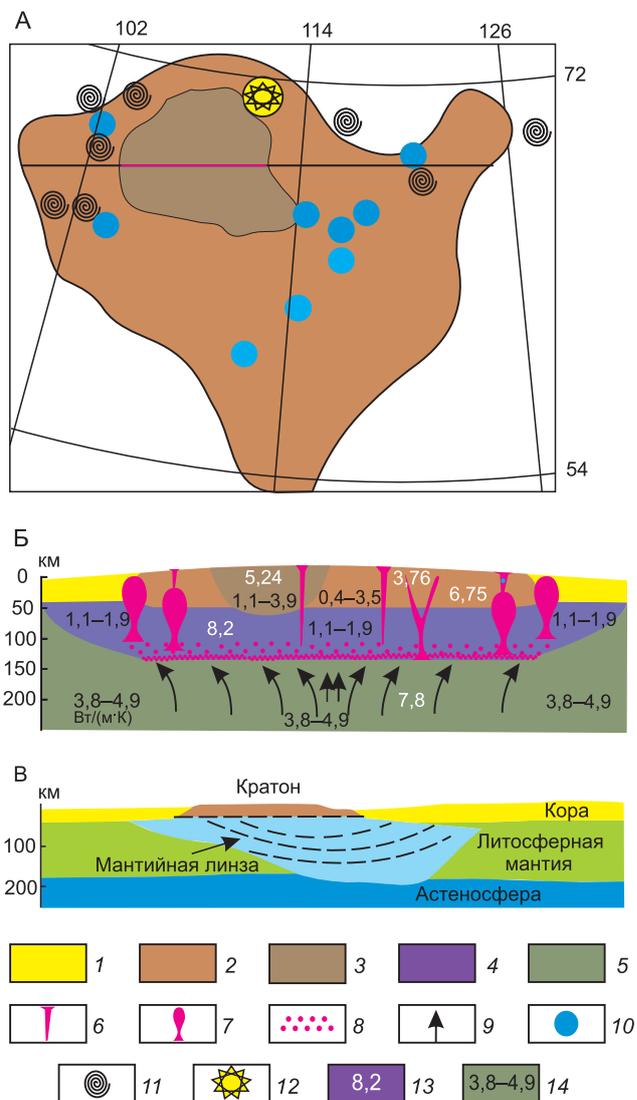
Подобные вопросы возникали у автора [11, 15] при выполнении исследований, касающихся классификации, причин образования и рудоносности магматических комплексов мафит-ультрамафитового ряда (см. рис. 6).

В них на примере Севера Сибирской платформы было показано, что аномальные температуры кимберлитовых, меймечитовых и щелочно-ультраосновных магм могли быть связаны с «перегревом» мантийного вещества из-за экранирования глубинного теплового потока (геотермического и, возможно, горячего плюма) мощной толщей кратона (рис. 7, А, Б), обладающей более низкой теплопроводностью, чем нижележащие уровни мантии (табл. 2). Этим объясняется и постоянная приуроченность данных магматических образований к щитам и кратонам.

Сделанные выводы согласуются с результатами более поздних геофизических и других исследований глубинного строения кратонов. Как показано в [25], одним из главных достижений сейсмотомографии конца XX в. стало доказательство существования глубинных высокоскоростных корней архейских кратонов. Высокая скорость сейсмических волн в корнях кратонов связывается с высокими содержаниями в них MgO. А с повышением магнезиальности пород, как известно, уменьшается их теплопроводность наряду с увеличением скорости сейсмических волн (см. табл. 2).

Принципиальная модель строения подкратонной мантии предложена Д. В. Снайдером на примере североамериканского кратона Slave (рис. 7, В) и опи-

рается на результаты изучения архейских областей на базе глубинного сейсмического профилирования и сравнительного анализа геохимии ксенолитов [26, 29, 32].



2. Теплопроводность и сейсмическая скорость пород докембрийских щитов и кратонов: земной коры (желтое), подкоровой литосферы – деплетированной верхней мантии – рести́та (зеленое) и нижележащей неистощенной мантии (голубое)

Порода	Вт/(м·К)	vr, км/с
Гранит	1,1–3,9	5,24
Базальт	0,4–3,5	
Диабаз	1,7–3,3	3,76
Габбро	1,6–3,0	6,75
Дунит	1,1–1,9	8,2
Перидотит	3,8–4,9	7,8

Рис. 7. Схемы строения кратонов и подстилающей мантии: А, Б – Сибирская платформа; В – обобщенная модель кратонов, по [32]:

1 – верхняя часть земной коры; 2 – кратон; 3 – щит; 4 – рести́товая мантия; 5 – астеносфера; 6 – кимберлитовые трубки; 7 – щелочно-ультраосновные комплексы; 8 – расплав частичного плавления рести́товой мантии; 9 – направление течения теплового потока; 10–12 – места известных находждений: кимберлитовых трубок (10), щелочно-ультраосновных комплексов (11), Попигайской астроблемы (12); 13 – теплопроводность, Вт/(м·К); 14 – скорость продольных сейсмических волн (vr, км/с)

Подобная картина глубинной организации проявляется и для Сибирского кратона [25]. В его литосферной мантии по результатам сверхглубинного сейсмического зондирования с помощью мирных атомных взрывов выделено несколько скоростных аномалий, которые рассматриваются как сложный корень кратона [30].

В вопросах происхождения природных алмазов ключевым фактам и закономерностям можно отнести: 1) отсутствие алмазных включений в мантийных минералах (оливинах) кимберлитов при широком распространении в самих алмазах включений почти всех окружающих веществ; 2) сохранность идиоморфного габитуса хрупких кристаллов алмаза среди деструктивных материалов земной коры и мантии; 3) преимущественное нахождение алмазов в раструбной (взрывной) части кимберлитовых трубок; 4) отсутствие в трубках следов и признаков течения магмы, как и влияния гравитации на распределение минеральных включений, находящихся в основной массе породы; 5) преимущественное размещение алмазоносных кимберлитов в немагнитных и слабوماгнитных полях земной коры.

Вывод о практическом отсутствии включений кристаллов алмаза в протооливинах и других первичных минералах кимберлитов основывается на том, что в доступных публикациях не обнаруживаются конкретные описания и наглядные демонстрации подобных проявлений. Имеются два снимка одного и того же зерна оливина в окружении двух кристаллов алмаза (рис. 8, А, Б). В объяснениях снимка допускается, что оливин включает меньший кристалл алмаза, а сам включён в больший алмаз, и что причиной тому является их совместная кристаллизация. Однако ксеноморфный габитус оливина свидетельствует о более раннем (доалмазном) его выделении и последующем преобразовании. Таким образом, факт отсутствия (или, по крайней мере, незначительной распространённости) включений алмазов в мантийных минералах кимберлитов может указывать на то, что в большинстве случаев алмазов не было там, где кристаллизовались протоминералы этих пород.

Включения в протооливинах в основном представлены магматическими расплавами и их минералами. Многие из них могут являться продуктами распада оливинового твёрдого раствора. Большинство включений свойственно наиболее поздним порфировым выделениям оливина с преимущественным расположением в их краевых частях (см. рис. 8, В).

Расплавные включения во вкрапленниках оливина неизменённых кимберлитов трубки Удачная-Восточная захватывались, как предполагается авторами [5], на позднемагматическом этапе формирования ким-

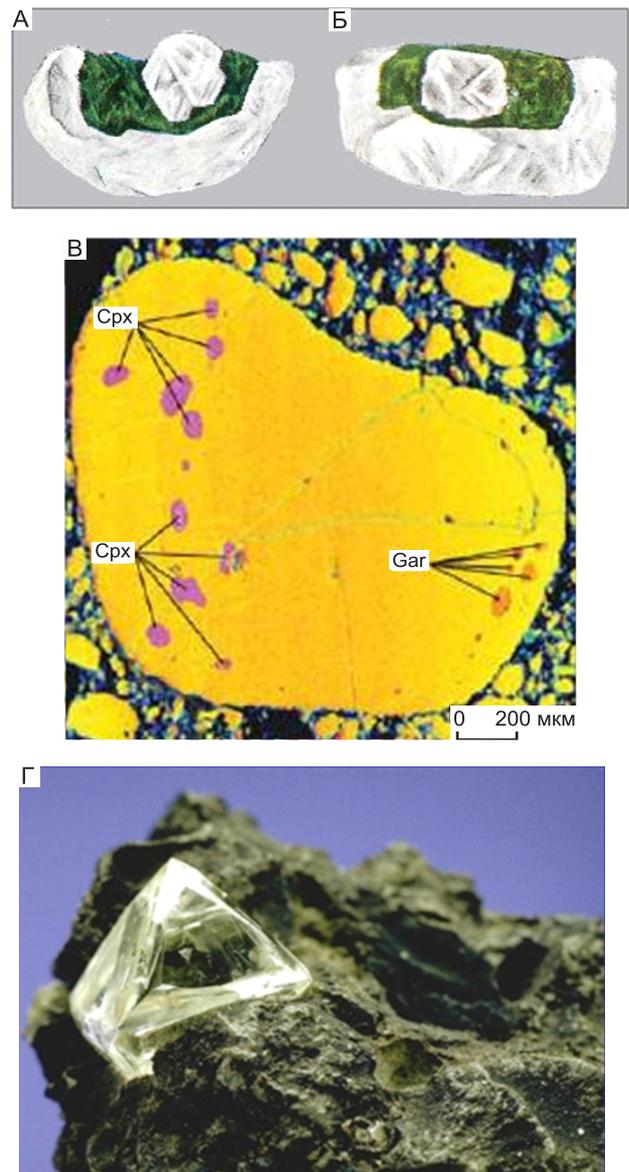


Рис. 8. Соотношения и включения минералов кимберлитов: А, Б – соотношения зёрен протооливина и алмаза [34]; В – включения клинопироксена и граната в оливине [23]; Г – кристалл алмаза в основной массе кимберлита (данные сети интернет)

берлитов, возможно, при давлении < 1 кбар и температуре 800–1000 °С.

Фазовый состав включений представлен тонкораскристаллизованным агрегатом, содержащим карбонаты, сульфаты, хлориды, газ [7]. Среди прозрачных дочерних минералов включений определены силикаты (тетраферрифлогопит, оливин, клиногумит, диопсид, монтичеллит), карбонаты (кальцит, доломит, сидерит, нортапит и Na-Ca карбонаты), хлориды Na и Ca, щелочные сульфаты.

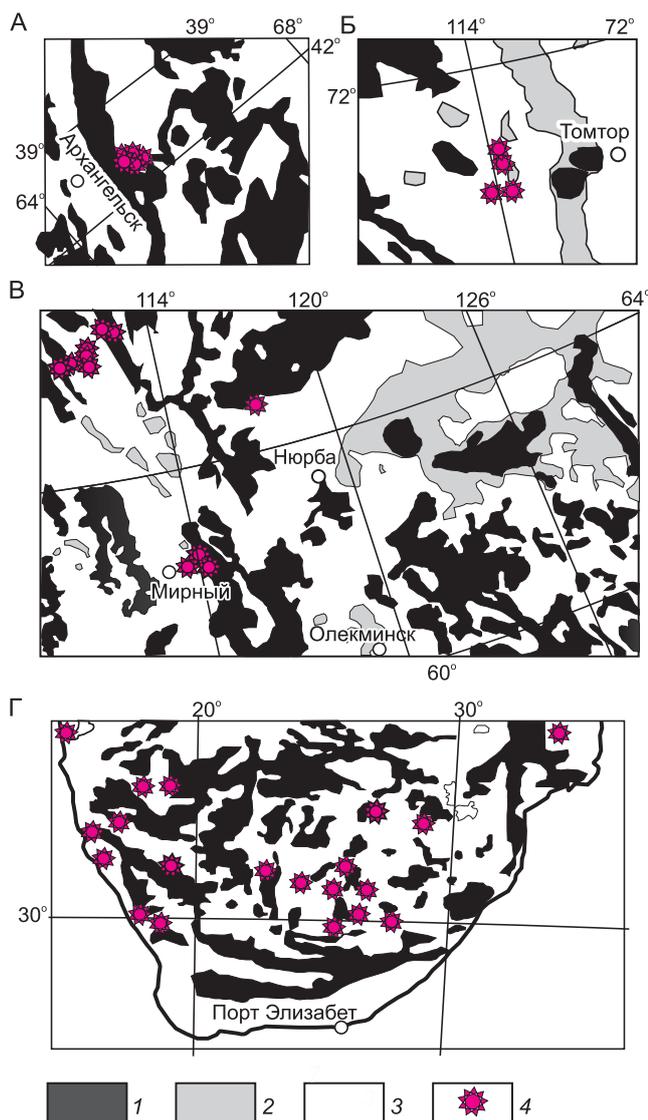


Рис. 9. Размещение месторождений алмазов России и Южной Африки в соотношении с магнитными полями [16]:

регионы: А – Архангельский, Б, В – Якутский, Г – Южноафриканский; значения магнитного поля (ΔT , нТл): 1 – положительные аномалии 50–2000, 2 – слабомагнитные (50–100), 3 – нулевые и отрицательные – немагнитные (50–более -1000); 4 – месторождения алмазов

Во включениях в алмазах находятся следующие материалы, обычно относящиеся к образованиям земной коры: сидерит (Гвинея, Канкан), доломит (Бразилия – трубка Коллиер 4, Гвинея – Мачадо), кальцит (Бразилия – Джуин, Якутия – трубки Мир, Спутник, Африка – Лесото), кальцит + доломит (Бразилия – Сорисо), магнезит (Якутия – трубка Мир, Намибия), карбонаты Са, Na, Mg, Fe, гидрокарбонаты (Ботсвана – Джваненг, Заир, Бразилия, Яку-

тия – трубка Юбилейная, Конго), биотит [33], флогопит [21], SiO_2 .

Изотопный состав кислорода изученных включений SiO_2 в алмазах достигает величины $\delta^{18}\text{O} = 12,9\text{‰}$, что считается указанием на коровое происхождение их протолитов. А изотопный состав углерода алмазов варьирует в широких пределах: от $-26,5$ до $-6,7\text{‰}$ $\delta^{13}\text{C}$, лёгкая часть которого соответствует органическому материалу [6].

Среди включений в алмазах находятся также хлоридно-карбонатный флюид [7], вода, водород, диоксид углерода, аргон, этилен, этиловый спирт, бутан, кислород.

Нахождение идиоморфных кристаллов алмаза среди преобразованных взрывом ксеноморфных веществ земной коры и мантии (см. рис. 4, В) свидетельствует о том, что алмазов не было до взрыва. Они могли образоваться во время взрыва, то есть в основном на месте нахождения кимберлитовых трубок.

Преимущественное размещение алмазов в раструбной (взрывной) части кимберлитовых трубок также указывает на их образование на месте нахождения и в основном позднее ассоциирующих с ними первичных минералов (главным образом оливинов), но до завершения кристаллизации кимберлитового расплава (рис. 8, Г).

Отсутствие в трубках следов и признаков течения магмы, как и влияния гравитации на распределение минеральных включений, находящихся в породе (см. рис. 5), может быть связано со взрывным внедрением магматической массы и кратковременной её кристаллизацией.

Наличие общей закономерности в размещении месторождений алмазов, состоящей в их предпочтительной приуроченности к немагнитным и слабомагнитным полям земной коры (рис. 9), объясняется присущей таким полям восстановительной обстановкой, благоприятной для образования месторождений алмазов, золота и других полезных ископаемых [17], но неподходящей для выделения магнетита, образующегося за счёт свободного кислорода и являющегося основной причиной существования региональных и локальных магнитных аномалий земной коры [17].

Сами же алмазоносные кимберлитовые трубки могут быть магнитными из-за содержания в них вторичного магнетита, выделяющегося при гидратации (в основном серпентинизации) оливина и других пороодообразующих минералов.

Благоприятная для образования алмазов восстановительная обстановка создаётся в тех случаях, когда в водной среде практически отсутствует свободный кислород. Наличие его препятствует выделению алмазов и приводит к образованию магнетита, генерирующего магнитные аномалии в земной коре [18].

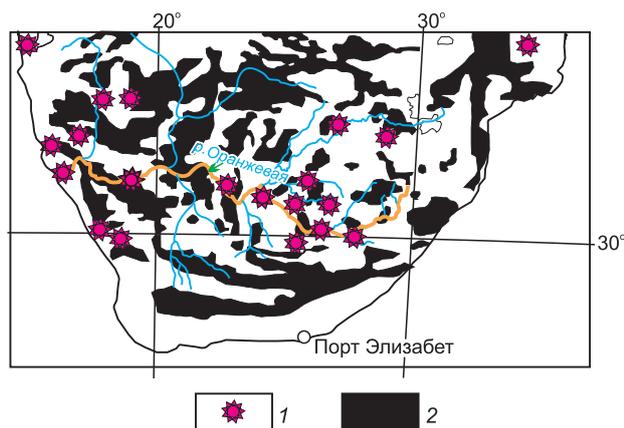


Рис. 10. Размещение месторождений алмазов Южной Африки в соотношении с руслами рек и магнитными полями, по материалам сети интернет:

1 – месторождения алмазов; 2 – магнитные поля

Проникновение вод в глубины земной коры сопровождается потерей ими растворённого (свободного) кислорода. Основной причиной тому является повышение температуры среды под влиянием геотермического тепла и магматических воздействий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аскарьян Г. А., Прохоров А. М., Чантурия Г. Ф., Шипуло Г. П. Луч оптического квантового генератора в жидкости // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1963. – Т. 44, вып. 6. – С. 2180–2182.
2. Аскарьян Г. А., Прохоров А. М., Шипуло Г. П. Светогидравлический эффект. Авт. свид. № 65 // Бюл. Изобретений. – 1969. – № 19. – С. 3.
3. Балмасова Е. А., Смольская Я. С., Лопатина Л. А. и др. Самородный осмий и иридоосмин Гулинского массива // Доклады Академии наук. – 1992. – Т. 323, № 4. – С. 748–751.
4. Годлевский М. Н., Лихачёв А. П. Условия образования и эволюции рудоносных ультраосновных магм // ЗВМО. – 1981. – Вып. 6. – С. 646–655.
5. Головин А. В., Шарыгин В. В., Похиленко Н. П. Расплавные включения во вкрапленниках оливина из неизмененных кимберлитов трубки Удачная-Восточная (Якутия): некоторые аспекты эволюции кимберлитовых магм на поздних стадиях кристаллизации // Петрология. – 2007. – Т. 15, № 2. – С. 178–195.
6. Зедгенизов Д. А., Рагозин А. Л., Шацкий В. С. Хлоридно-карбонатный флюид в алмазах из ксенолита эклогита // Докл. РАН. – 2007. – Т. 415, № 6. – С. 800–803.
7. Зедгенизов Д. А., Рагозин А. Л., Каги Х. и др. Включения SiO₂ в сублитосферных алмазах // Геохимия. – 2019. – Т. 64, № 9. – С. 948–957.
8. Зинчук Н. Н. Особенности алмазоносности разных фаз внедрения кимберлитов // Отечественная геология. – 2017. – № 1. – С. 105–114.
9. Лазаренков В. Г., Малич К. Н., Лопатин Г. Г. Геохимия ультрамафитов платиноносного Гулинского массива Маймеча-Котуйской провинции // Геохимия. – 1993. – № 11. – С. 1523–1531.
10. Лазаренков В. Г. Средние содержания элементов платиновой группы в ультрамафитах // Записки ВМО. – 1999. – Ч. 128. – Вып. 1. – С. 15–24.
11. Лихачёв А. П. Генетические модели сульфидно-никеленосных формаций в связи с другими эндогенными формациями // Рудообразование и генетические модели эндогенных рудных формаций. – Новосибирск: Наука, 1988а. – С. 158–166.
12. Лихачёв А. П. К вопросам образования, поведения и фракционирования химических элементов, их изотопов и минералов в природных процессах // Отечественная геология. – 2017. – № 6. – С. 80–93.
13. Лихачёв А. П. Лазерный способ исследования веществ при сверхвысоких температурах и давлениях // Геохимия. – 1978. – № 10. – С. 1554–1557.
14. Лихачёв А. П. О природе магматических месторождений // Советская геология. – 1973. – № 5. – С. 33–47.
15. Лихачёв А. П. Об условиях образования рудоносных и безрудных магм базит-гипербазитового состава // Докл. АН СССР. – 1978. – Т. 238, № 2. – С. 447–450.
16. Лихачёв А. П. Платино-медно-никелевые и платиновые месторождения. – М.: Эслан, 2006. – 496 с.

На рис. 10 видно, что речные русла, не содержащие проявлений алмазоносных трубок, обычно находятся в полях расположения магнитных аномалий. Это указывает на отсутствие на данных участках внедрений кимберлитовых и иных магм, которые могли бы своим разогревом понизить содержание свободного кислорода в окружающей среде и создать условия для образования алмазов.

Основные выводы состоят в следующем.

1. Причиной образования эндогенных алмазов может быть термогидравлический эффект, представляющий собой взрывную реакцию воды на импульсивное воздействие сверхвысоких температур, при котором достигаются сверхвысокие давления.

2. Благоприятные условия для осуществления термогидравлического эффекта имеются в пределах земной коры, главным образом там, где «перегретые» магмы кимберлитового состава проникают в водонасыщенные горизонты коры. Сочетание таких факторов характерно для щитов и кратонов в ходе проявления кимберлитового магматизма.

3. Перспективными для обнаружения алмазоносных трубок являются немагнитные и слабомагнитные площади в пределах щитов и кратонов, нередко содержащие локальные магнитные аномалии, связанные с гидратацией кимберлитовых тел и образованием вторичного магнетита.

17. Лихачёв А. П. Причины и условия существования магнитных и немагнитных полей земной коры, определяющих формирование и размещение месторождений золота, алмазов, нефти, газа и других полезных ископаемых // Отечественная геология. – 2013. – № 6. – С. 40–50.
18. Лихачёв А. П. Условия образования магнетита и его рудных скоплений // Отечественная геология. – 2017. – № 4. – С. 44–53.
19. Лихачёв А. П., Кириченко В. Т., Лопатин Г. Г. и др. Особенности платиноносности массивов щелочно-ультраосновой формации // ЗВМО. – 1987. – Вып. 1. – С. 122–125.
20. Сазонов А. М., Звягина Е. А., Леонтьев С. И. и др. Платиноносные щелочно-ультраосновые интрузии Полярной Сибири. – Томск: Изд-во ЦНТИ, 2001. – 510 с.
21. Соболев Н. В., Логвинова А. М., Ефимова Э. С. Сингенетические включения флогопита в алмазах кимберлитов: свидетельство роли летучих в образовании алмазов // Геология и геофизика. – 2009. – Т. 50, № 12. – С. 1588–1606.
22. Соболев А. В., Соболев С. В., Кузьмин Д. В. и др. Механизм образования сибирских меймечитов и природа их связи с траппами и кимберлитами // Геология и геофизика. – 2009. – Т. 50, № 12. – С. 1293–1334.
23. Соболев Н. В., Соболев А. В., Томиленко А. А. и др. Парагенезис и сложная зональность вкрапленников оливина из неизмененного кимберлита трубки Удачная-Восточная (Якутия): связь с условиями образования и эволюцией кимберлита // Геология и геофизика. – 2015. – Т. 56, № 1–2. – С. 337–360.
24. Сокол А. Г., Крук А. Н. Алмазы и кимберлитовый магматизм: обзор экспериментальных данных // Геология и геофизика. – 2015. – Т. 56, № 1–2. – С. 316–336.
25. Степашко А. А. Структура литосферной мантии Сибирского кратона и сейсмодинамика деформационных волн в Байкальской сейсмической зоне // Геодинамика и тектонофизика. – 2013. – № 4. – С. 387–415.
26. Chen C. W., Rondenay S., Evans R. L., Snyder D. B. Geophysical detection Geophysical detection of relict metasomatism from anarachean (~ 3,5 Ga) subduction zone // Science. – 2009. 326 (5956). – P. 1089–1091.
27. Field M., Robey J., Kurszlaukis S. Kimberlite-hosted diamond deposits of southern Africa: A review // Ore Geology Reviews. – 2008. – № 34. – P. 33–75.
28. Likhachev A. P. The discovery of a new Maimecha-Kotuyskaya platinum bearing province in the north of the Siberian platform: prognosis and its practical corroboration // 8th International platinum symposium Abstract. – Rustenburg, 1998. – P. 203–205.
29. O'Reilly S. Y., Griffin W. L. Imaging global chemical and thermal heterogeneity in the subcontinental lithospheric mantle with garnets and xenoliths: Geophysical implications // Tectonophysics. – 2006. 416 (1–4). – P. 289–309.
30. Pavlenkova G. A., Pavlenkova N. I. Upper mantle structure of the Northern Eurasia from peaceful nuclear explosion data. Tectonophysics. – 2006. – № 416 (1–4). – P. 33–52.
31. Pearson D. G., Canil D., Shirey S. B. Mantle samples included in volcanic rocks: xenoliths and diamonds // Treatise on geochemistry / Eds. H. D. Holland, K. K. Turekian. – 2003. Elsevier. – P. 171–275.
32. Snyder D. V. Lithospheric growth at margins of cratons // Tectonophysics. – 2002. – № 355 (1–4). – P. 7–22.
33. Walmsley J. C., Lang A. R. Oriented biotite inclusions in diamond coat // Miner. Mag. – 1992. – V. 56. – P. 108–111.
34. Williams A. F. The genesis of the diamond. Two vols. Ernest Benn Ltd. – London, 1932.

REFERENCES

1. Askaryan G. A., Prokhorov A. M., Chanturiya G. F., Shipulo G. P. Luch opticheskogo kvantovogo generatora v zhidkosti [Beam of an optical quantum generator in a liquid]. Zhurnal eksperimentalnoy i teoreticheskoy fiziki, 1963, V. 44, Is. 6, P. 2180–2182. (In Russ.)
2. Askaryan G. A., Prokhorov A. M., Shipulo G. P. Svetogidravlicheskiy effekt. Avt. svid. № 65 [Svetohydraulic effect. Auth. wit. No. 65]. Byul. Izobreteniy, 1969, No. 19, P. 3. (In Russ.)
3. Balmasova Ye. A., Smolskaya Ya. S., Lopatina L. A. et al. Samorodnyy osmiy i iridosmin Gulinskogo massiva [Native osmium and iridosmin of the Gulinsky massif]. Doklady Akademii nauk, 1992, V. 323, No. 4, P. 748–751. (In Russ.)
4. Godlevskiy M. N., Likhachev A. P. Usloviya obrazovaniya i evolyutsii rudosnosnykh ultrasnosnykh magm [Conditions of formation and evolution of ore-bearing ultrabasic magmas]. ZVMO, 1981, Is. 6, P. 646–655. (In Russ.)
5. Golovin A. V., Sharygin V. V., Pokhilenko N. P. Rasplavnyye vklyucheniya vo vkraplennikakh olivina iz neizmenennykh kимберлитов trubki Udachnaya-Vostochnaya (Yakutiya): nekotoryye aspekty evolyutsii kimberlitovykh magm na pozdnykh stadiyakh kristallizatsii [Melt inclusions in olivine phenocrysts from unaltered kimberlites of the Udachnaya-Vostochnaya pipe (Yakutia): some aspects of the evolution of kimberlite magmas at late stages of crystallization]. Petrologiya, 2007, V. 15, No. 2, P. 178–195. (In Russ.)
6. Zedgenizov D. A., Ragozin A. L., Shatskiy V. S. Khloridno-karbonatnyy flyuid v amazakh iz ksenolita eklogita [Chloride-carbonate fluid in diamonds from eclogite xenolith]. Dokl. RAN, 2007, V. 415, No. 6, P. 800–803. (In Russ.)
7. Zedgenizov D. A., Ragozin A. L., Kagi Kh. et al. Vklyucheniya SiO₂ v sublitosfernykh amazakh [SiO₂ inclusions in sublithospheric diamonds]. Geokhimiya, 2019, V. 64, No. 9, P. 948–957. (In Russ.)
8. Zinchuk N. N. Osobennosti almazonosnosti raznykh faz vnedreniya kimberlitov [Peculiarities of diamond content of different phases of kimberlite intrusion]. Otechestvennaya geologiya, 2017, No. 1, P. 105–114. (In Russ.)
9. Lazarenkov V. G., Malich K. N., Lopatin G. G. Geokhimiya ultramafitov platinonosnogo Gulinskogo massiva Maimecha-Kotuyskoy provintsii [Geochemistry of ultramafic rocks from the platinum-bearing Guli massif of the Maimecha-Kotuy province]. Geokhimiya, 1993, No. 11, P. 1523–1531. (In Russ.)

10. *Lazarenkov V. G.* Sredniye sodержaniya elementov platinovoy gruppy v ultramafitakh [Average contents of platinum group elements in ultramafic rocks]. *Zapiski VMO*, 1999, Ch. 128, Is. 1, P. 15–24. (In Russ.)
11. *Likhachev A. P.* Geneticheskiye modeli sulfidno-nikeleunosnykh formatsiy v svyazi s drugimi endogennymi formatsiyami [Genetic models of sulfide-nickel formations in connection with other endogenous formations]. *Rudobrazovaniye i geneticheskiye modeli endogennykh rudnykh formatsiy*, Novosibirsk, Nauka, 1988, P. 158–166. (In Russ.)
12. *Likhachev A. P.* K voprosam obrazovaniya, povedeniya i fraktsionirovaniya khimicheskikh elementov, ikh izotopov i mineralov v prirodnykh protsessakh [On the formation, behavior and fractionation of chemical elements, their isotopes and minerals in natural processes]. *Otechestvennaya geologiya*, 2017, No. 6, P. 80–93. (In Russ.)
13. *Likhachev A. P.* Lazernyy sposob issledovaniya veshchestv pri sverkhvysokikh temperaturakh i davleniyakh [Laser method for studying substances at ultrahigh temperatures and pressures]. *Geokhimiya*, 1978, No. 10, P. 1554–1557. (In Russ.)
14. *Likhachev A. P.* O prirode magmaticheskikh mestorozhdeniy [On the nature of magmatic deposits]. *Sovetskaya geologiya*, 1973, No. 5, P. 33–47. (In Russ.)
15. *Likhachev A. P.* Ob usloviyakh obrazovaniya rudonosnykh i bezrudnykh magm bazit-giperbazitovogo sostava [On the conditions of formation of ore-bearing and barren magmas of basic-hyperbasite composition]. *Dokl. AN SSSR*, 1978, V. 238, No. 2, P. 447–450. (In Russ.)
16. *Likhachev A. P.* Platino-medno-nikelevyye i platinovyye mestorozhdeniya [Platinum-copper-nickel and platinum deposits]. Moscow, Eslan publ., 2006, 496 p. (In Russ.)
17. *Likhachev A. P.* Prichiny i usloviya sushchestvovaniya magnitnykh i nemagnitnykh poley zemnoy kory, opredelyayushchikh formirovaniye i razmeshcheniye mestorozhdeniy zolota, almazov, nefti, gaza i drugikh poleznykh iskopyemykh [The reasons and conditions for the existence of magnetic and non-magnetic fields of the earth's crust, which determine the formation and placement of deposits of gold, diamonds, oil, gas and other minerals]. *Otechestvennaya geologiya*, 2013, No. 6, P. 40–50. (In Russ.)
18. *Likhachev A. P.* Usloviya obrazovaniya magnetita i yego rudnykh skopleniy [Conditions of formation of magnetite and its ore accumulations]. *Otechestvennaya geologiya*, 2017, No. 4, P. 44–53. (In Russ.)
19. *Likhachev A. P., Kirichenko V. T., Lopatin G. G.* et al. K osobennostyam platinonosnosti massivov shchelochno-ultraosnovnoy formatsii [To the peculiarities of platinum-bearing massifs of the alkaline-ultrabasic formation]. *ZVMO*, 1987, Is. 1, P. 122–125. (In Russ.)
20. *Sazonov A. M., Zvyagina Ye. A., Leontyev S. I.* et al. Platino-nosnyye shchelochno-ultraosnovnyye intruzii Polyarnoy Sibiri [Platinum-bearing alkaline-ultrabasic intrusions of Polar Siberia]. Tomsk, TSNTI publ., 2001, 510 p. (In Russ.)
21. *Sobolev N. V., Logvinova A. M., Yefimova E. S.* Singeneticheskiye vklyucheniya flogopita v almazakh kimberlitov: svidetelstvo roli letuchikh v obrazovanii almazov [Syngenetic inclusions of phlogopite in kimberlite diamonds: evidence of the role of volatiles in the formation of diamonds]. *Geologiya i geofizika*, 2009, V. 50, No. 12, P. 1588–1606. (In Russ.)
22. *Sobolev A. V., Sobolev S. V., Kuzmin D. V.* et al. Mekhanizm obrazovaniya sibirskikh meymechitov i priroda ikh svyazi s trappami i kimberlitami [The mechanism of formation of Siberian meimechites and the nature of their connection with traps and kimberlites]. *Geologiya i geofizika*, 2009, V. 50, No. 12, P. 1293–1334. (In Russ.)
23. *Sobolev N. V., Sobolev A. V., Tomilenko A. A.* et al. Paragenезis i slozhnaya zonalnost vkraplennikov olivina iz neizmenennogo kimberlita trubki Udachnaya-Vostochnaya (Yakutiya): svyaz s usloviyami obrazovaniya i evolyutsiyey kimberlita [Paragenesis and complex zoning of olivine phenocrysts from unaltered kimberlite from the Udachnaya-Vostochnaya pipe (Yakutia): relationship with the formation conditions and evolution of kimberlite]. *Geologiya i geofizika*, 2015, V. 56, No. 1–2, P. 337–360. (In Russ.)
24. *Sokol A. G., Kruk A. N.* Almazy i kimberlitovyy magmatizm: obzor eksperimentalnykh dannykh [Diamonds and kimberlite magmatism: a review of experimental data]. *Geologiya i geofizika*, 2015, V. 56, No. 1–2, P. 316–336.
25. *Stepashko A. A.* Struktura litosfernoy mantii Sibirskogo kratona i seysmodinamika deformatsionnykh voln v Baykalskoy seysmicheskoy zone [The structure of the lithospheric mantle of the Siberian craton and the seismodynamics of deformation waves in the Baikal seismic zone]. *Geodinamika i tektonofizika*, 2013, No. 4, P. 387–415.
26. *Chen C. W., Rondenay S., Evans R. L., Snyder D. B.* Geophysical detection Geophysical detection of relict metasomatism from anarchean (~ 3,5 Ga) subduction zone. *Science*, 2009, 326 (5956), P. 1089–1091.
27. *Field M., Robey J., Kurszlauskis S.* Kimberlite-hosted diamond deposits of southern Africa: A review. *Ore Geology Reviews*, 2008, No. 34, P. 33–75.
28. *Likhachev A. P.* The discovery of a new Maimecha-Kotuyskaya platinum bearing province in the north of the Siberian platform: prognosis and its practical corroboration. 8th International platinum symposium Abstract, Rustenburg, 1998, P. 203–205.
29. *O'Reilly S. Y., Griffin W. L.* Imaging global chemical and thermal heterogeneity in the subcontinental lithospheric mantle with garnets and xenoliths: Geophysical implications. *Tectonophysics*, 2006, 416 (1–4), P. 289–309.
30. *Pavlenkova G. A., Pavlenkova N. I.* Upper mantle structure of the Northern Eurasia from peaceful nuclear explosion data. *Tectonophysics*, 2006, No. 416 (1–4), P. 33–52.
31. *Pearson D. G., Canil D., Shirey S. B.* Mantle samples included in volcanic rocks: xenoliths and diamonds. Treatise on geochemistry. Eds. H. D. Holland, K. K. Turekian. 2003, Elsevier, P. 171–275.
32. *Snyder D. V.* Lithospheric growth at margins of cratons. *Tectonophysics*, 2002, № 355 (1–4), P. 7–22.
33. *Walmsley J. C., Lang A. R.* Oriented biotite inclusions in diamond coat. *Miner. Mag*, 1992, V. 56, P. 108–111.
34. *Williams A. F.* The genesis of the diamond. Two vols. London, Ernest Benn Ltd, 1932.