

## ДВА ГЕНЕТИЧЕСКИХ ТИПА АЛМАЗОВ – НИЖНЕЛИТОСФЕРНЫЕ КИМБЕРЛИТОВЫЕ И ПЛЮМОВЫЕ ЛАМПРОИТОВЫЕ

В.С.Шкодзинский

Институт геологии алмазов и благородных металлов СО РАН,  
г. Якутск

*Алмазы широко распространены в кимберлитах и россыпях с неизвестными коренными источниками. Показано, что алмазы кимберлитов кристаллизовались при фракционировании перидотитового слоя магматического океана в основании литосферы древних платформ, алмазы россыпей – в очагах щелочно-основных магм в мантийных плюмах. Выносившие их щелочные остаточные расплавы взрывались в приповерхностных условиях и формировали преимущественно покровы туфов и россыпи. Это объясняет отсутствие высокоалмазоносных трубок в их окрестностях.*

*Ключевые слова: кимберлиты, россыпи, алмазы, плюмы, мантия, щелочные магмы.*

После открытия алмазоносных кимберлитов в Африке господствующими стали представления о том, что данные породы – главный источник алмазов. На основании обычно большего изотопного возраста минеральных включений в алмазах (до 3,5 млрд лет) по сравнению с возрастом алмазоносных кимберлитовых трубок (сотни миллионов лет) чаще всего предполагается, что кристаллы этого минерала возникали в твердой мантии на ранней стадии ее эволюции. Кимберлитовые магмы механически захватывали их при движении через мантию и не имели никакого отношения к процессам алмазообразования. Однако такому ксеногенному происхождению алмазов противоречит существование многочисленных зависимостей морфологии, количества и крупности кристаллов алмаза от состава и особенностей размещения содержащих их кимберлитов [10]. Это свидетельствует о значительной общности процессов формирования алмазов и кимберлитов.

Природа общности стала понятной после установления признаков горячего образования

Земли и наличия в ее недрах в большей части геологической истории расслоенного по составу глобального океана магмы с первоначальной глубиной около 240 км [10]. Остывание и затвердевание океана сверху вниз сопровождалось кристаллизацией алмазов и формированием кимберлитовых остаточных расплавов в его нижнем перидотитовом слое (рис. 1). Кимберлитовый состав остаточный расплав приобрел в основном в последние полмиллиарда лет вследствие накопления в нем расплавофильных химических компонентов – углекислоты, воды, кальция, легких редких земель. Алмазы начали формироваться намного раньше кимберлитов из-за увеличения в остаточном расплаве концентрации углерода, так как он почти не входил в состав кристаллизовавшихся породообразующих минералов. Это объясняет чаще всего более древний изотопный возраст включений в алмазах по сравнению с кимберлитами. Позднее образование кимберлитовых расплавов является причиной внедрения их магм преимущественно в фанерозое. Оно объясняет отсутствие кимбер-



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

О – октаэдрических, Д – ромбододекаэдрических, К – кубических, А – агрегатов

литов в океанических областях, где продукты затвердевания расслоенного магматического океана были раздвинуты при формировании этих областей под влиянием растекания всплывавших горячих мантийных струй, подогретых изначально более горячим железным ядром.

По этой модели возрастание в остаточном расплаве кристаллизовавшейся перидотитовой магмы содержания кремнекислоты способствовало росту его вязкости, снижению скорости диффузии углерода и увеличению степени пересыщения расплава данным компонентом. Это привело к снижению площади образующихся слоев роста на гранях октаэдров, постепенной смене тангенциального роста нормальным, появлению на гранях кристаллов различных скульптур, эволюции октаэдров в додекаэдриды, затем в кубы и агрегаты (рис. 2). Накопление расплавофильных компонентов в остаточных расплавах обусловило повышение содержания легкого изотопа углерода, азота и других примесей в поздних алмазах по сравнению с ранними и уменьшение в них удельной интенсивности рентгенолюминесценции  $I/m$  [1]. Последняя снизилась в связи с возрастанием степени дефектности кристаллической решетки в поздних алмазах. Все это свидетельствует о том, что модель образования кимберлитовых магм и вы-

носимых ими алмазов в результате фракционирования в основании литосферы платформ остатков перидотитового слоя магматического океана полностью соответствует природным данным.

Помимо кимберлитовых трубок, значительное количество алмазов добывается из россыпей. Россыпи бывают очень крупными (рис. 3) и часто содержат исключительно большие и высококачественные алмазы. Поэтому во всем мире прилагалось много усилий, чтобы найти кимберлитовые трубки, бывшие источниками алмазов россыпей. Но попытки обычно оказывались безуспешными. Примером служат россыпи Юго-Западной Африки, где на 1500 км протягиваются прибрежно-морские россыпи. Они содержат 1–3 млрд карат очень крупных (в некоторых участках в среднем до 2 карат) преимущественно ювелирных алмазов со средней ценой до 1000 долл/карат. Ближние к ним трубки изредка содержат незначительное количество мелких дефектных алмазов [6]. Иногда предполагаемому привносу их в россыпи из удаленных на 1500 км промышленных трубок Южно-Африканской кимберлитовой провинции противоречат небольшой средний размер алмазов в них (0,12–0,15 карат в трубках Кимберли, Премьер, Као [4]), меньшая способность к переносу крупных алмазов по сравнению с мелкими, отсутствие следов механического износа на большинстве алмазов россыпей и редкость в них индикаторных минералов кимберлитов [6].

Другой пример – россыпи Северной Якутии. Здесь в бассейне р. Эбелях находится 52,3% россыпных алмазов России [7]. Ближние к ним кимберлитовые трубки почти не содержат алмазов. Возможности их привноса из удаленных на сотни километров гипотетических трубок в районе устья р. Лены или из Приверхоанского прогиба противоречат преимущественно местный состав гальки в россыпях и широкое распространение в них (до 57%) механически непрочных высокодефектных алмазов V и VII разновидностей, по Ю.Л.Орлову. Они разрушились бы при длительном переносе. Кроме того, реки обычно текут к краям континентов, поэтому предполагаемый перенос алмазов навстречу их течению выглядит невероятным.

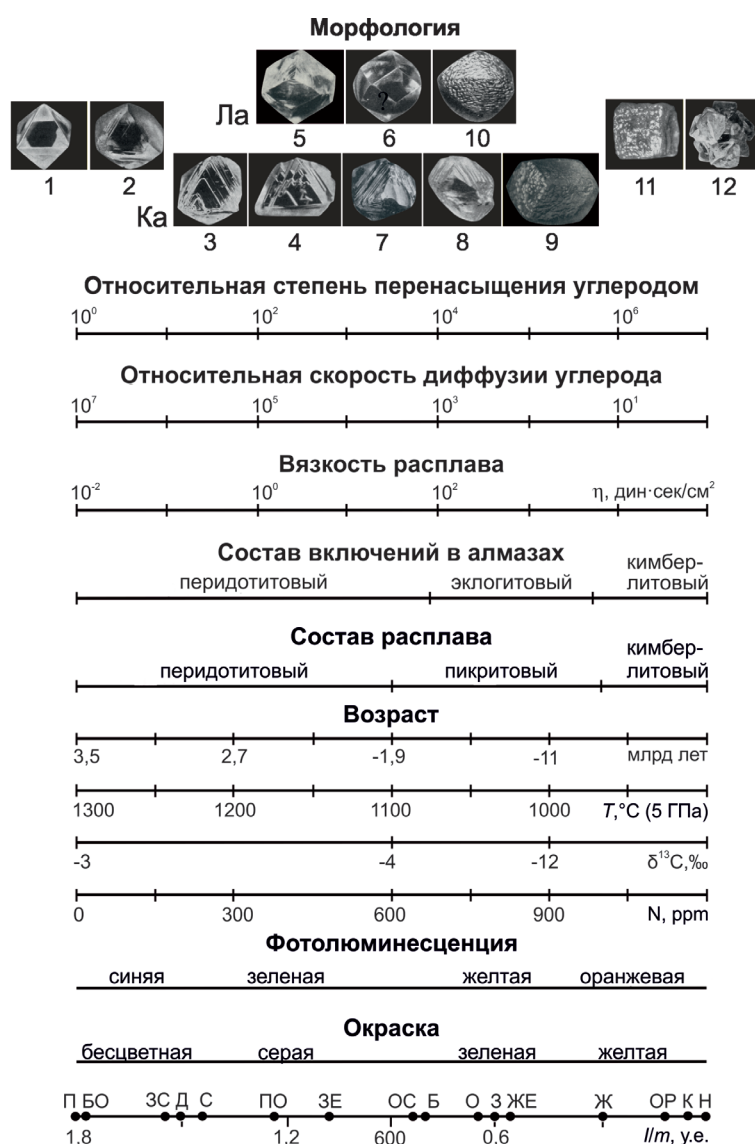


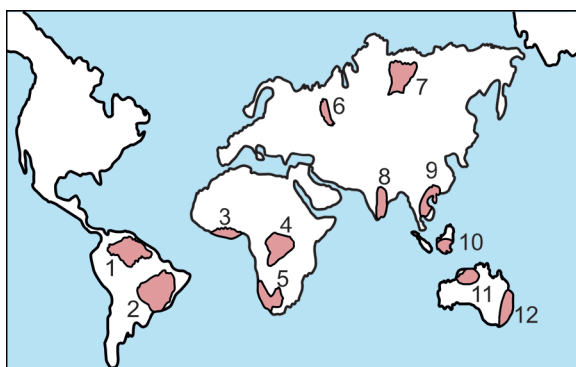
Рис. 2. Соотношение удельной интенсивности рентгенолюминесценции с морфологией кристаллов алмаза, цветом их и фотолюминесценции, содержанием азота, изотопным составом углерода, температурой образования, их возрастом и составом расплава при кристаллизации:

точками показаны средние значения  $I/m$  при образовании плоскогранных (П), занозисто-слоистых (ЗС), полицентрических (ПО), округло-ступенчатых (ОС), блоковых (Б) октаэдров; ромбододекаэдров (Д), округлых додекаэдров (О); бесцветных (БО), зеленых (З), желтых (Ж), коричневых (К) алмазов; с синей (С), зеленой (ЗЕ), желтой (ЖЕ), оранжевой (ОР) фотолюминесценцией, нелюминесцирующих кристаллов (Н); ряды Ка и Ла – кристаллы в кимберлитах соответственно с карбонатитовой и лампроитовой тенденцией дифференциации, промежуточный – кристаллы, встречающиеся в различных кимберлитах; 1 – гладкогранный, 2 – слабослоистый, 3 – грубослоистый, 4 – полицентрический октаэдр; 5 – плоскогранный додекаэдр; 6 – округлый додекаэдр; 7, 8 – округло-ступенчатые октаэдры; додекаэдровиды с бугорчатой (9), черепитчатой (10) скульптурой; 11 – куб; 12 – агрегат [10]

Эти и другие данные указывают на то, что кимберлитовые трубки не являются источником алмазов рассматриваемых россыпей. Минерал мог формироваться только при глубинной кристаллизации магм, поскольку лишь в процессе ее происходило необходимое для алмазообразования накопление углерода в остаточном расплаве. Кроме основания континентальной литосферы, где при затвердевании перидотитового слоя магматического океана возникали кимберлитовые остаточные расплавы и выносимые ими алмазы, они могли кристаллизоваться и в наиболее глубоких очагах основных магм в мантийных плюмах (рис. 4). Такие магмы образовались в результате декомпрессионно-

го переплавления эклогитов в поднимающихся плюмах. Высокобарическая кристаллизация и фракционирование очагов под толстой литосферой должны были приводить к формированию в них лампроитовых и других щелочных остаточных расплавов и алмазов.

Все особенности россыпей алмазов с неизвестными коренными источниками подтверждают их образование в этих очагах. В хорошо изученных алмазах россыпей Северной Якутии и Вишерского Урала преобладают включения минералов эклогитового парагенезиса [7], что свидетельствует об основном составе их родоначальных магм. Кажется бы, парадоксальной особенностью алмазов россыпей является ино-



**Рис. 3. Распределение алмазоносных россыпей в провинциях:**

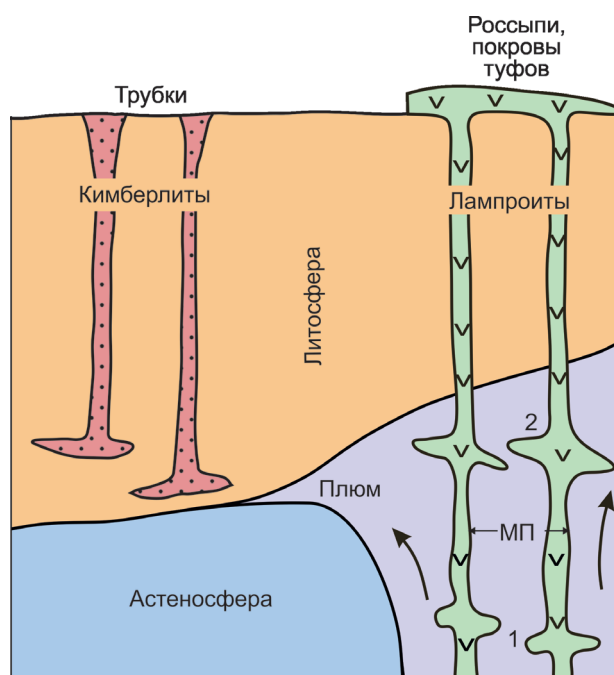
1 – Гвианской, 2 – Бразильской, 3 – Западно-Африканской, 4 – Центрально-Африканской, 5 – Южно-Африканской, 6 – Уральской, 7 – Якутской, 8 – Индийской, 9 – Китайской, 10 – Индонезийской, 11 – Западно-Австралийской, 12 – Восточно-Австралийской [5]

гда присутствие в них одновременно включений минералов как нижней (ферропериклаз, MgSi-перовскит, стишовит), так и верхней (пироп, пироксен) мантии. Такое сонахождение установлено в Бразилии, Гвинее, Австралии [5]. Оно хорошо объясняется кристаллизацией алмазов в поднимавшихся плюмах сначала в условиях нижней, затем верхней мантии (см. рис. 4).

Кристаллизация алмазов в благоприятных для роста условиях очень больших давления и температуры – причина их чаще всего крупного размера и высокого качества. Объемы тел щелочно-основных пород в среднем во многие десятки раз превосходят объемы кимберлитовых трубок, что обуславливает большие размеры россыпей с алмазами и часто огромные запасы последних. В самых крупных плюмах, вызывавших образование наиболее грандиозных расколов литосферы и появление океанов, очаги основных магм вследствие огромных запасов тепла в плюмах кристаллизовались очень медленно, что должно было приводить к кристаллизации особенно крупных алмазов. Это объясняет уникальную крупность алмазов в россыпях Юго-Западной Африки. Они, по-видимому, кристаллизовались в плюме, вызвавшем раскол Гондваны и формирование Атлантического океана. Предположение подтверждает приуроченность

россыпей к приатлантическим частям Африки и Южной Америки (см. рис. 3).

Крупные (в среднем 75–90 мг) преимущественно ювелирные алмазы Вишерского Урала, вероятно, кристаллизовались в плюме, вызвавшем образование Уральского палеоокеана. Формирование алмазов в плюмах, обусловивших расколы древних платформ, объясняет отмечавшуюся некоторыми исследователями приуроченность россыпей с неизвестным коренным источником к окраинам континентов [5] (см. рис. 3). Алмазы россыпей Северной Якутии, видимо, кристаллизовались в магматических очагах плюма, вызвавшего формирование траппов Тунгусской синеклизы. Об этом свидетельствует соответствие возраста цирконов в россыпях (219–234 млн лет [7]) времени траппового магматизма (210–250 млн лет). Плюм был относительно маломощным (не привел к возникновению океана), что согласуется с относительно небольшой (до 60 мг [7]) средней массой алмазов в россыпях. Тем не менее, алмазы в среднем зна-



**Рис. 4. Схема образования нижнелитосферных кимберлитовых и плюмовых лампроитовых магм:**

места кристаллизации нижнемантийных (1) и верхнемантийных (2) алмазов; МП – магматические потоки

чительно крупнее, чем в промышленных трубках Якутии (обычно первые миллиграммы).

В россыпях с неизвестным коренным источником преобладают округлые алмазы, что связано с повышенным содержанием кремнекислоты в основных магмах по сравнению с кимберлитовыми. Увеличение ее количества в остаточных расплавах при кристаллизации приводило к повышению их вязкости и уменьшению скорости диффузии углерода. Поэтому на гранях кристаллов возникали все меньшие слои роста. Грани становились выпуклыми и формировались округлые кристаллы алмазов (см. рис. 2). Такое происхождение округлых алмазов подтверждают возрастание их доли с увеличением содержания кремнекислоты в кимберлитах и лампроитах (рис. 5) и в среднем их больший размер по сравнению с плоскогранными в одних и тех же породах [7, 10]. На ранних стадиях кристаллизации, когда вязкость расплавов была еще низкой, кристаллизовалось также небольшое количество плоскогранных алмазов. Они обычно отмечаются в россыпях наряду с преобладающими округлыми.

В процессе кристаллизации магматических очагов в остаточных расплавах интенсивно накапливались летучие компоненты. Это иногда приводило к кристаллизации в них богатых флюидными включениями поздних алмазов разновидностей V и VII, а также борта. Последний широко распространен в россыпях Бразилии (до 60%) [6]. Наличие таких алмазов указывает на их вынос поздними богатыми щелочами и летучими компонентами остаточными магмами. Высокое содержание летучих способствует интенсивному постмагматическому замещению формировавшихся пород низкотемпературными минералами.

Ответ на вопрос, почему в районе рассматриваемых россыпей не удастся найти высокоалмазоносные трубки, дают результаты расчетов количественных моделей эволюции магм при подъеме [10]. Из них следует, что кимберлитовые и другие относительно низкотемпературные магмы после вскипания при подъеме начинали интенсивно затвердевать. Это связано с тем, что летучие компоненты являются сильными плавнями. Уменьшение их концентрации

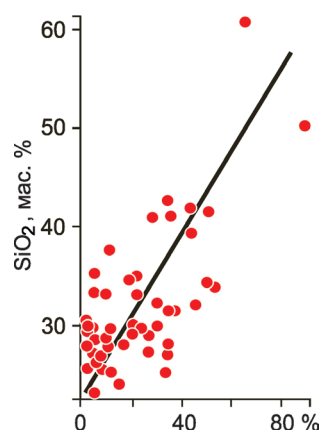
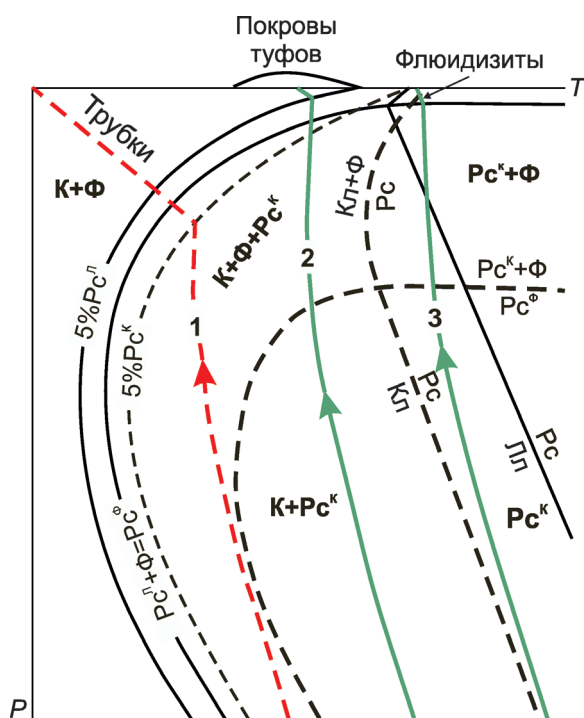


Рис. 5. Зависимость доли округлых кристаллов алмазов от содержания кремнекислоты во вмещающих кимберлитах и лампроитах [8]

в расплаве под воздействием выкипания при декомпрессии приводило к его кристаллизации или остеклованию. Они заканчивались взрывом затвердевших верхних частей поднимающихся магматических колонн под влиянием законсервированного затвердеванием высокого внутреннего давления газовой фазы. В результате формировались взрывные диатремы и различные брекчии (рис. 6, кривая 1).

Протяженность диатрем в основном определялась температурой и содержанием летучих компонентов в магмах, особенно труднорастворимой в расплаве углекислоты. Вследствие зарождения в астеносфере магмы плюмов имели более высокую первичную температуру, чем кимберлитовые, образовавшиеся в относительно низкотемпературной литосфере. Содержание углекислоты в лампроитах в среднем составляет ~1%, в кимберлитах ~18%. Следовательно, протяженность лампроитовых диатрем должна быть во много раз меньше, чем кимберлитовых. Первоначальная протяженность кимберлитовых трубок порядка 1–2 км. Образованные лампроитовыми и щелочными магмами диатремы должны иметь глубину десятки, реже первые сотни метров (см. рис. 6, кривая 2). При такой протяженности они чаще всего должны относительно быстро полностью уничтожаться эрозией, поскольку срез промышленных трубок в Якутии составляет сотни метров, а в Африке достигает 1,5 км. Поэтому диатремы в районе рос-



**Рис. 6. Схематические  $P$ - $T$  диаграммы фазового состава и эволюции кимберлитовых (пунктир) и лампроитовых (сплошные линии) магм:**

линии со стрелками – эволюция поднимающихся магм при образовании трубок (1), покровов туфов (2) и штокверков флюидизитов (3). К – твердые фазы кимберлита; Кл, Лл – то же, кимберлита и лампроита в условиях ликвидуса;  $Pc^k$ ,  $Pc^l$ ,  $Pc^s$  – расплав соответственно кимберлита, лампроита и более богатый летучими компонентами; Ф – флюидная фаза

сыпей, по-видимому, в основном не сохранились. Подобные диатремы частично остались в Бразилии, где щелочной магматизм относительно молодой (92–95 млн лет) [5].

Важной особенностью взрывов щелочно-основных магм было то, что из-за небольших протяженности и объема образованных ими диатрем главная масса раздробленного взрывом алмазоносного материала выбрасывалась на земную поверхность и формировала покровы туфов. Большая часть покровов, особенно на возвышенностях и склонах, вследствие их рыхлости и небольшой мощности размывалась с перемещением алмазов в понижения и образованием алмазоносных россыпей. Площадь распространения продуктов взрыва крупного

вулкана может достигать многих сотен тысяч квадратных километров. Это объясняет присутствие россыпей с неустановленными источниками на огромных площадях. В Северной Якутии они занимают площади ~400 тыс. км<sup>2</sup> [7], Южной Америке – несколько миллионов квадратных километров [6]. Остатки алмазоносных вулканических покровов могли сохраняться в том случае, если их материал падал в водоемы и перекрывался более молодыми осадками. Сформированный таким материалом слой богатых алмазами туффизитов мощностью в десятки сантиметров обнаружен в породах триаса в приустьевой части р. Лены [3]. Их алмазы полностью идентичны таковым в россыпях. Слой алмазоносных туфов установлен компанией Diagem в местности Джуина в Бразилии (<http://www.mineral.ru/News/26883/html>), где широко распространены россыпи с неизвестными коренными источниками. Данные породы, а не гипотетические кимберлитовые трубки – главный источник алмазов в рассматриваемых россыпях.

Очевидно, что самые высокотемпературные магмы, завершившие эволюцию при подъеме в поле расплав+флюид (см. рис. 6, кривая 3), не должны взрываться в связи с отсутствием процессов декомпрессионного затвердевания. Выделение и расширение в них флюидной фазы при декомпрессии должно было приводить к вспениванию магмы. Ввиду большой подвижности возникающая преимущественно расплавно-газовая смесь могла прорываться сквозь трещины перекрывающих пород и формировать в них штокверки флюидизитов, содержащие алмазоносный магматический материал, измененный под влиянием летучих компонентов. Такие породы описаны в Вишерском Урале [8]. Диаграмма на рис. 6 объясняет их происхождение.

Алмазы должны были формироваться и в плюмах, вызывавших образование палеокеанов. Поэтому в областях их бывшего присутствия могут находиться захороненные туфы и россыпи, содержащие высококачественные алмазы. Это расширяет перспективы открытия новых месторождений.

Разведанные запасы алмазов зарубежных кимберлитовых трубок оцениваются в >2 млрд

карат [2], что близко к запасам только одной россыпи Юго-Западной Африки (1–3 млрд карат). Подобных россыпей известно более десятка (см. рис. 3). Из этого следует, что запасы плюмовых алмазов намного превосходят запасы нижнелитосферных алмазов кимберлитовых трубок. Учитывая часто уникально высокое их качество, крупные россыпи с плюмовыми алмазами – более ценный и перспективный объект, чем кимберлитовые трубки. Они, по-видимому, будут главным объектом разработки и поисков в недалеком будущем.

Таким образом, полученные данные свидетельствуют о том, что, кроме нижнелитосферных кимберлитовых, в земной коре широко распространены алмазы, кристаллизовавшиеся в очагах щелочно-основных магм в мантийных плюмах. Они, как правило, имеют высокое качество, поэтому перспективны для поисков и добычи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аргунов К.П. Алмазы Якутии. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004.
2. Белов С.В., Лапин А.В., Толстов А.В., Фролов А.А. Минерагения платформенного магматизма (траппы, карбонатиты, кимберлиты). – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008.
3. Граханов С.А., Смелов А.П. Возраст прогнозируемых коренных источников алмаза на севере Сибирской платформы // Отечественная геология. 2011. № 5. С. 56–63.
4. Зинчук Н.Н., Коптиль В.И. Типоморфизм алмазов Сибирской платформы. – М.: Недра, 2003.
5. Каминский Ф.В. Минералогия и геохимия нижней мантии. Чтения им. В.И.Вернадского. Л. – М.: ГЕОХИ РАН, 2011.
6. Россыпи алмазов мира / В.М.Подчасов, М.Н.Евсеев, В.Е.Минорин и др. – М.: Геоинформмарк, 2005.
7. Россыпи алмазов России / С.А.Граханов, В.И.Шаталов, В.А.Штыров и др. – Новосибирск: ГЕО, 2007.
8. Чайковский И.И. Петрология и минералогия интрузивных алмазоносных пирокластов Вишерского Урала. – Пермь: Изд-во ПГУ, 2001.
9. Шкодзинский В.С. Величина удельной интенсивности рентгенолюминесценции алмазов как показатель последовательности их кристаллизации в мантии // Отечественная геология. 2014. № 5. С. 69–73.
10. Шкодзинский В.С. Петрология литосферы и кимберлитов (модель горячей гетерогенной аккреции Земли). – Якутск: СВФУ, 2014.

Шкодзинский Владимир Степанович,  
доктор геолого-минералогических наук  
shkodzinskiy@diamond.ysn.ru

## TWO GENETIC TYPES OF DIAMONDS – LITHOSPHERE KIMBERLITIC AND PLUME LAMPROITIC

V.S.Shkodzinskiy

*Diamonds occur in kimberlites and in placers, but their origin usually remains unknown. As demonstrated, the kimberlite diamonds were crystallized during fractionation of the lithospheric peridotite layer, whereas the placer diamonds originate from the plume chambers containing alkaline mafic magmas. Alkaline residual melts that transported diamonds exploded under near-surface conditions to produce tuff covers and, further, placers. The fact explains absence of highly diamondiferous kimberlite pipes in such environments.*

*Key words: kimberlite, placer, diamond, plume, mantle, alkaline magma.*