

УДК 552.326.6:553.81

ВЕЩЕСТВЕННЫЕ КРИТЕРИИ АЛМАЗОНОСНОСТИ КИМБЕРЛИТОВ

Н. Зинчук

*Западно-Якутский научный центр Академии наук РС(Я),
ул. Ленина, 4/1, 678170 г. Мирный, РФ
E-mail: nnzinchuk@rambler.ru*

Большинство изученных кимберлитовых диатрем – это многофазовые трубки. Каждая магматическая фаза внедрения, сформированная внутри диатремы, сложена кимберлитом характерного петрографического и петрохимического типа, который имеет ряд устойчивых, слабо изменяющихся с глубиной типоморфных признаков. Кимберлиты разных фаз внедрения в одной и той же диатреме различаются между собой как соотношением порфировых и кластических структурных элементов, так и содержанием индикаторных минералов. Проведенные исследования дали возможность выявить существенные различия в алмазности разных фаз внедрения кимберлитов, что обусловлено разным уровнем заложения и длительности функционирования образующих их магматических очагов, физико-химическими свойствами исходных составляющих, а также скоростью подъема и характером продвижения кимберлитовой магмы в процессе разных этапов кимберлитообразования. Кимберлитовые брекчии завершающих этапов формирования трубок являются более продуктивными по сравнению с порфировыми кимберлитами ранних интрузивных фаз внедрения. Особенности происхождения и извержений кимберлитовых расплавов могли существенно влиять на преобразование первоначальной формы кристаллов алмаза, что приводило к их растворению (иногда до полного уничтожения) и коррозии. При оценке продуктивности кимберлитовых трубок необходимо учитывать реальные соотношения в диатремах интрузивных и взрывных процессов кимберлитообразования, которые обычно меняются во времени.

Ключевые слова: кимберлитовая трубка, алмаз, фазы внедрения, интрузивный процесс, эффузивный процесс, кимберлитообразование, типоморфизм минералов.

Неравномерное распределение алмазов в кимберлитовых диатремах [1, 3–9, 11, 18] существенно осложняет плановую отработку коренных месторождений. Выявление особенностей вертикальной изменчивости алмазности кимберлитовых пород до глубины их рентабельной отработки – одна из главнейших задач и проблем разработки таких месторождений. Несмотря на значительную в целом изученность кимберлитовых диатрем Сибирской платформы (СП), их алмазность во многих аспектах остаётся дискуссионной, что обусловлено такими причинами: данные опробования по многим месторождениям закрыты; данные по эксплуатационно-разведочным и эксплуатационным пробам несопоставимы; не всегда отдельно опробуют различные конкретные типы кимберлитов. Кроме того, существуют определенные элементы субъективизма при определении петрографических типов кимберлитов различными исследователями [2, 3, 10, 12–17, 19, 20].

Наиболее детально вопросы изменения алмазоносности различных типов кимберлитов изучено на примере *трубки Мир*. Исследователи выделяют в ней от трёх до шести и более петрографических типов кимберлитов, которые по-разному распространены и в плане, и на разведанную (до 1 200 м) глубину. Кимберлитовая трубка Мир на поверхности имеет форму овала; его размер по длинной оси составляет 490 м, по короткой – 320 м, в средней части фиксируют слабый пережим (рис. 1).

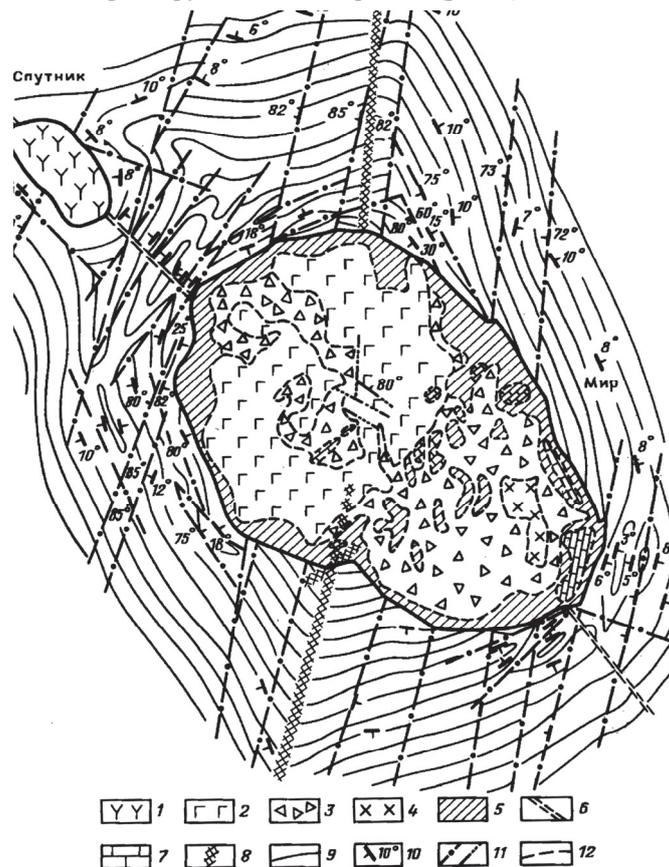


Рис. 1. Геолого-структурная схема кимберлитовых трубок Мир и Спутник:

1 – трубка Спутник; 2–4 – трубка Мир с кимберлитами, соответственно, первой–третьей фаз внедрения; 5 – зоны эндоконтакта; 6 – кимберлитовая дайка; 7 – ксенолиты осадочных пород; 8 – зона дробления с галенитовой и сфалеритовой минерализацией; 9 – вскрытые карьером пласты вмещающих карбонатных пород; 10 – элементы залегания осадочных пород и разрывных нарушений; 11 – разрывные нарушения; 12 – границы разновидностей кимберлитовых пород.

До глубины 200 м это типичная воронка, глубже (примерно до 900 м) – цилиндрическое тело с незначительным сужением книзу, а на глубине около 1 000 м от поверхности оно переходит в серию подводных даек. Верхние горизонты трубки Мир формировались вследствие трехфазового внедрения кимберлитового расплава [3, 5, 17]. Большая часть северо-западной половины трубки сложена кимберлитовыми брекчиями (КБ) первой фазы; КБ второй фазы на уровне современного эрозионного среза локализованы

в юго-восточной части трубки, они инъецируют брекчии северо-западной половины диатремы. Кимберлитовыми породами третьей фазы сложено вытянутое в северо-западном направлении дайковое тело размером 120×30 м на юго-востоке трубки. Контакты этого тела с вмещающими КБ секущие, в зоне контакта широко развита сульфидная минерализация. Трёхфазовое строение нижних горизонтов диатремы определено также по данным изучения керна глубоких скважин, пробуренных для оценки продуктивности этой части месторождения [4, 10, 12, 15]. Между кимберлитами первой и второй фаз внедрения (на глубину около 1 км) прослеживается зона сочленения (“шовная зона”) подводящих каналов, обогащённая ксенолитами вмещающих пород (“ксенолитовый пояс”).

Обнаружено [2, 3, 5, 17], что алмазосность пород трубки Мир в плане и по вертикали зависит от закономерностей распределения кимберлитов разных фаз внедрения в объёме рудного тела. Минимальная алмазосность присуща атакситовой и крупнопорфировой (ПК – порфиновый кимберлит) разновидностям пород, а автолитовые кимберлитовые брекчии (АКБ) максимально алмазосны. Важен размер кристаллов алмаза (рис. 2), в частности, наличие кристаллов средних и крупных классов [5].



Рис. 2. Алмазы из кимберлитов трубки Мир (Малоботуобинский алмазосный район).

По гранулометрическому составу и морфологическим особенностям алмаза, окраске и степени дефектности кристаллов на глубоких горизонтах месторождения выделено [8] два участка – на северо-западе и юго-востоке трубки. Тут зафиксировано различия в алмазосности магматических фаз внедрения, содержания в них разных классов крупности кристаллов и их оптических свойствах. В кимберлитах раннего этапа консолидации алмазосность снижается, как и качество самих алмазов; для КБ определены более высокие экономические показатели.

Кроме упомянутых трёх фаз КБ, формирование которых происходило вследствие последовательного внедрения самостоятельных порций кимберлитового расплава из эволюционирующего магматического очага [3, 5, 17, 19, 20], вдоль контакта с вмещаю-

щими породами повсеместно фиксируют своеобразные кимберлитовые брекчии (5–50 м), которые назвали эндоконтактовыми. Это своеобразные фациальные разновидности упомянутых КБ, не связанные с самостоятельной фазой формирования диатремы. Их появление обусловлено повышенным содержанием ксеногенного материала (вмещающих трубки терригенно-карбонатных пород) и влиянием на кимберлиты пневматолитово-гидротермальных растворов [5–7]. Породы этой зоны в диатремах наиболее интенсивно карбонатизированы и насыщены (до 60 % объёма) ксенолитами терригенно-карбонатных пород.

Довольно интересной является также зона кимберлитовых пород, которая разделяет породы первой и второй фаз внедрения и имеет ширину до нескольких десятков метров. В ней обнаружено высокие концентрации рифов вмещающих пород, размеры которых иногда достигают нескольких десятков метров; они совпадают с пережимом диатремы и пересекают её в почти меридиональном направлении на две части (см. рис. 1). Благодаря геологоразведочным работам с подсчётом полезного компонента выявлено продолжение “ксенолитового пояса” и на глубоких (до 1 км) горизонтах, где сформировалась своеобразная шовная зона, по которой сочленены два самостоятельных тела, имеющих на глубине изолированные подводящие каналы [5, 14, 20].

Слабоизмененные кимберлиты трубки Мир отличаются высокой магнезиальностью, иногда – повышенным содержанием K_2O . Слабо или практически не изменённые кимберлиты среди сильно переработанных вторичными процессами магматических образований имеют низкое содержание карбонатной составляющей и повышенное – флогопита. На глубоких горизонтах трубки выявлено небольшие участки, сложенные атакситовым кимберлитом. Это песчаникоподобные породы нередко слоистой текстуры. По внешнему виду они напоминают осадочно-вулканогенные образования, характерные для верхних горизонтов некоторых слабо эродированных диатрем, однако отличаются от них преобладанием кимберлитового материала.

В целом КБ описываемой диатремы содержат переменное количество обломочного материала терригенно-карбонатных пород чехла платформы, траппов и ксенолитов пород верхней мантии [20].

Внутритрубочные дайки вскрыты разведочными скважинами на глубине 1 004,7–1 005,2 и 1 258 м [8, 20]; ширина их достигает несколько десятков сантиметров. Дайки сложены в разной степени серпентинизированным мелкопорфировым кимберлитом тёмно-серого до чёрного цвета. Структура породы порфировая, текстура ориентированная, что обусловлено субпараллельным расположением порфировых выделений оливина. Основная масса породы состоит из агрегатов серпентина с примесью кальцита. Карбонат-серпентиновая основная масса обогащена чешуйками и пластинчатыми кристаллами флогопита светло-коричневого цвета. В кимберлитовых породах дайкового комплекса, в отличие от вмещающих их КБ, нет ксенолитов осадочных пород, конвергентных включений, а также крупных выделений первичных минералов.

Помимо внутритрубочных даек, при разведке вскрыты и другие дайковые тела кимберлитов, которые представлены тёмно-серыми плотными породами с афировой структурой, практически без порфировых выделений оливина или псевдоморфоз по нему.

В 131 м на северо-восток от трубки Мир расположена *кимберлитовая трубка Спутник* (см. рис. 1), имеющая в плане размер 140 × 90 м. Форма трубки овальная, длинная ось вытянута в северо-западном направлении. Вмещающими породами диатремы на уровне современного среза являются отложения O_1 мощностью до 280 м. Глубже трубку окружают кембрийские породы. В вертикальном разрезе трубка быстро выклини-

вается, переходя на глубине 330 м в подводящую дайку мощностью 15 м, а на глубине 375 м – в систему даек мощностью 2–3 м. Эти дайки под трапповым силлом объединены в более мощную дайку – подводящий канал северо-западной ориентировки. Для трубки характерно повышенное содержание ксенолитов вмещающих пород и траппов.

Среди магматических пород трубки по степени выветрелости и изменений выделено несколько разновидностей. Наиболее изменены кимберлитовые породы верхних горизонтов диатремы (до 25 м) и на контакте с вмещающими породами, где они превращены в буровато-желтоватую глинисто-карбонатную массу. Глубже (ниже зоны гипергенного преобразования пород) залегают КБ серого, грязно-серого цвета.

Около трубок Мир и Спутник во вмещающих породах карьером вскрыто три *кимберлитовые дайки*. Одну из них, Южную, прослежено до 200 м на юго-восток от трубки Мир. Вторая, Центральная, вскрытая между обеими трубками, как бы соединяет их. К северо-западу от трубки Спутник на расстоянии 300 м от контакта простирается дайка Северная. Мощность этих даек колеблется от 10 до 30 см. Основное тело каждой дайки часто расщеплено на несколько более тонких прожилков мощностью от 1 до 10 см. Во вмещающих породах прожилки либо выклинивают, либо снова соединяются с главным телом. Характер взаимоотношения даек с трубками даёт основания считать их дотрубочными образованиями, сформировавшимися в начальную стадию развития диатрем [7, 19, 20]. Кимберлитовые породы даек отличаются от кимберлитов трубок Мир и Спутник высоким содержанием карбонатного материала, повышенным – пиропы и пикроильменита, а также титана и фосфора. Несколько дайковых тел кимберлитов сложной морфологии отмечено под пластовым телом долеритов на глубине около 500 м. Дайковые кимберлиты верхних и глубоких горизонтов существенно различаются, что выражено, прежде всего, в увеличении степени карбонатизации более нижних их частей.

Существенно отличается по составу от всех отмеченных выше структур пластовое кимберлитовое тело (*силл*), которое вскрыто карьером и буровыми скважинами около трубок Мир и Спутник. Силл прорывает дайку долеритов, а также корневую зону трубки Спутник и тянется на десятки метров севернее её.

Содержание алмазов в трубке Мир значительно выше, чем на многих высокоалмазных месторождениях Мира [1, 8]. Алмазы представлены октаэдрами (до 61 %), ромбододекаэдрами (до 10), комбинированными кристаллами (до 29) и кубами (< 1 %). Характерной особенностью алмазов из трубки Мир (см. рис. 2), как и из других промышленно алмазоносных кимберлитовых тел Малоботуобинского алмазоносного района (МБАР), является резкое преобладание кристаллов октаэдрического габитуса (рис. 3) при сравнительно невысоком содержании ламинарных кристаллов переходного от октаэдрического к ромбододекаэдрическому габитуса и ламинарных ромбододекаэдров. Преобладают бесцветные индивиды (до 75 %), но встречаются также дымчато-серые (до 14), буровато-красные (до 7), лиловые (2), голубовато-зелёные (до 1) и жёлтые (до 1 %). Общая доля сростков нередко достигает 18 %, а шпинелевых двойников – 10 %. Характерны в той или иной степени трещиноватые кристаллы, причем типоморфными для месторождения являются секущие трещины, не свойственные алмазам кимберлитовых диатрем других алмазоносных районов СП. Одна из причин этого – высокое содержание примесного азота в форме А-центра и неоднократное распределение центров фотолюминесценции, приводящее к дополнительным напряжениям в структуре алмаза при технологических процессах добычи и обогащения полезного компонента. А-центр является основным оптически-активным дефектом в алмазе, на его долю приходится около 75 % общего содержания А- и В1-дефектов (рис. 4).

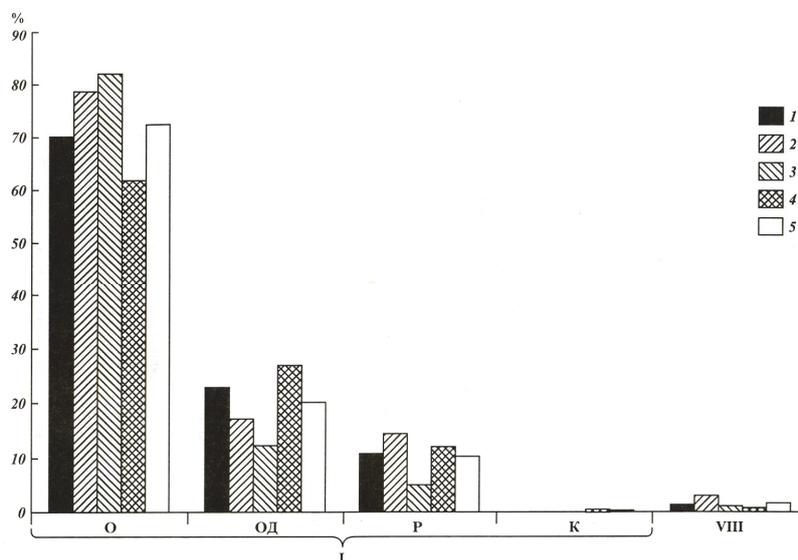


Рис. 3. Типоморфные особенности алмазов из кимберлитовых диатрем Мирнинского поля [8]:

1, VIII – разновидности алмазов по классификации Ю. Орлова (О – октаэдры, OD – переходные формы, P – ламинарные ромбододекаэдры, К – кубы); 1–4 – трубки: 1 – Интернациональная, 2 – Дачная, 3 – имени XXIII съезда КПСС, 4 – Мир; 5 – среднее по полю.

Поскольку трубки Мир и Спутник, дайки и силлоподобное тело – это единая взаимосвязанная рудная система, то мы предприняли первую попытку провести сравнительное изучение особенностей алмаза из различных типов пород на всю глубину пробуренных при разведке диатремы (нижние части) колонковых скважин и их производственной отработки (верхние горизонты) [1, 8]. Основное внимание уделяли морфологическим, оптическим и другим свойствам кристаллов; в первую очередь изучали кристаллы октаэдрического габитуса, их сростки, двойники и агрегаты, поскольку кубические и ромбододекаэдрические индивиды редки и не отражают специфики выделяемых разновидностей КБ. Учитывали также признаки алмазов, приобретённые ими в процессе транспортировки кимберлитовой магмой, её дифференциации и раскристаллизации, – так называемые дефектные: появление коричневой окраски, дымчатость, коррозионная скульптура, включения графита, жёлто-оранжевая фотолюминесценция и др.

На глубоких горизонтах трубки Мир КБ второй фазы внедрения составляют более 80 % объёма тела, тогда как аналогичные породы начальной фазы есть только на отдельных участках [20]. Различие в алмазоносности КБ двух фаз внедрения можно объяснить разубоживанием кимберлитов первой фазы вследствие насыщения их ксенолитами пород осадочного чехла и меньшей скоростью подъёма и глубиной зарождения первых порций кимберлитовой магмы.

Обычно алмазоносность каждого конкретного типа кимберлитовых пород колеблется в широких пределах [8, 20]. Распределение алмазов по классам крупности в целом почти равномерное, однако, если не учитывать конкретных разновидностей пород, в образованиях различных фаз есть определенные различия: КБ первой фазы содержат максимальное количество как мелких, так и крупных кристаллов; в КБ второй фазы возрастает содержание крупных кристаллов и уменьшается – мелких.

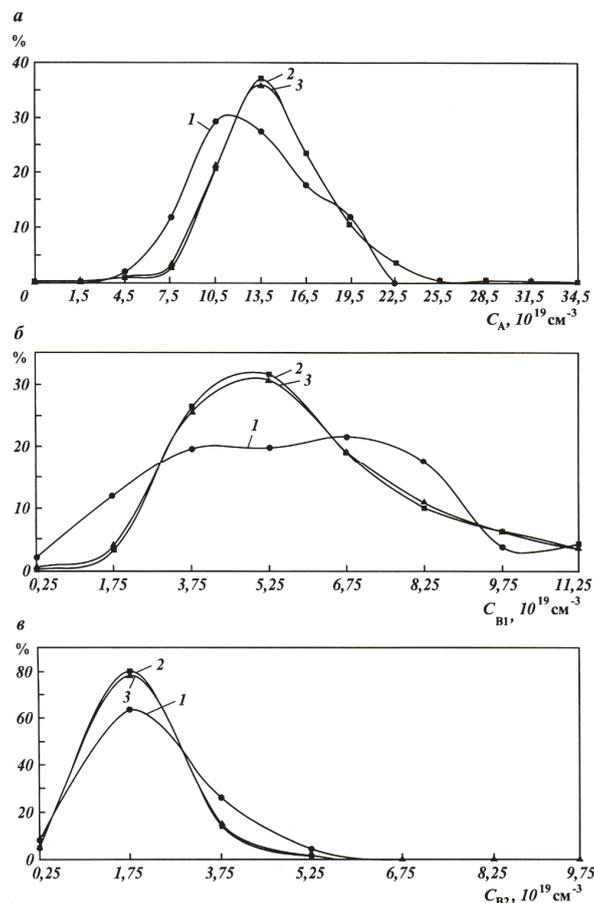


Рис. 4. Распределение алмазов трубки Мир по концентрации примесей, C [8]:
 а – А-центра; б – V1-дефекта; в – V2-дефекта; 1 – алмазы класса $-8+4$ мм; 2 – алмазы класса $-4+2$ мм; 3 – среднее.

Эта закономерность существенно влияет на колебания средней массы кристаллов, минимум и максимум которой зафиксированы для отдельных разновидностей первой и второй фаз формирования кимберлитовой трубки Мир. В приконтактных (с вмещающими породами) зонах кимберлитов увеличивается количество мелких кристаллов, а по мере приближения к центру диатремы – крупных. Причём содержание алмазов в КБ приконтактных зон зависит лишь от того, какой разновидностью – первой или второй – сложены эти участки. В КБ начальной фазы внедрения доминируют дымчатые и коричневые алмазы и их осколки; в КБ второй фазы (автолитовой и микролитовой) их намного меньше. Степень сохранности кристаллов алмаза, их средняя масса и алмазность пород второй разновидности глубоких горизонтов трубки Мир значительно выше, чем в этих же породах верхних горизонтов, что связано с динамикой заполнения диатремы и скоростью кристаллизации кимберлитового субстрата.

В кимберлитовых породах трубки Мир преобладают бесцветные, реже эпигенетически окрашенные в дымчато-коричневый цвет (из-за пластической деформации) алмазы

разновидности I, по Ю. Орлову [16] (см. рис. 2). До 2 % составляют серые поликристаллические агрегаты разновидности VIII; единичные находки – желтовато-зелёные и молочно-серые алмазы с оболочкой октаэдрического габитуса, реже – комбинационного ряда октаэдр–ромбододекаэдр–куб (разновидность IV). Характерная типоморфная особенность алмазов трубки Мир – это наличие бесцветных плоскогранных октаэдров с острыми, иногда слегка округленными ребрами (так называемых кристаллов мирнинского типа), количество которых одно из максимальных среди алмазных месторождений мира. Среди морфологических типов кристаллов преобладают [8] тонколаминарные октаэдры со сноповидной или занозистой штриховкой, гораздо меньше груболаминарных индивидов с полицентрически растущими гранями, сложенными тригональными и дитригональными слоями роста. Основная масса алмазов представлена монокристаллами; на долю двойников и сростков приходится не более 20 % от общего количества кристаллов. Много по-разному трещиноватых алмазов, причем типоморфными, как отмечено выше, являются секущие трещины, не характерные для кимберлитовых месторождений алмазоносных полей СП.

Алмазоносность кимберлитов трубки Спутник в четыре раза ниже, чем в трубке Мир. Тут преобладают (до 70 %) мелкие кристаллы, содержание индивидов средних размеров – до 7 %. В основном это алмазы октаэдрического габитуса и их осколки, есть также ромбододекаэдры и кристаллы переходной формы. Характерно повышенное (до 19 %) содержание твердых включений эклогитовой ассоциации, что обычно свойственно более ранней и менее глубинной фазе кимберлитового магматизма [8, 15, 20].

В кимберлитовых жилах района трубки Мир доля мелких алмазов достигает 80 %, а среднего класса – до 19 %. Преобладают индивиды ромбододекаэдрического габитуса [1, 8], обычно сложно деформированные, трещиноватые, коричневой окраски, с полосами пластической деформации. Наличие в кимберлитовых жилах мелких коричнево-дымчатых алмазов и их осколков, часто графитизированных и корродированных, свидетельствует о сложных термодинамических условиях их образования (перепады давления, температуры и газового режима).

На основании сравнения геологического строения территории и минералого-петрографического состава пород многие исследователи кимберлитового магматизма древних платформ пришли к выводу, что в каждом алмазоносном районе обычно есть одно крупное многофазовое месторождение и намного больше более простых по строению диатрем. В пределах Мирнинского кимберлитового поля, наряду с многофазовой трубкой Мир, выявлено более простые по строению диатремы (Интернациональная, имени XXIII съезда КПСС, Дачная, Таёжная, Амакинская) и ряд жил, наиболее изученной среди которых является самостоятельная кимберлитовая жила А-21. Наиболее промышленно ценная *кимберлитовая трубка Интернациональная*, расположенная в 16 км к юго-западу от диатремы Мир – на правом берегу р. Ирелях, в верхнем течении её правых притоков Маччоба-Салаа и Улаах-Юрях. Трубка тяготеет к зоне Западного разлома – находится на расстоянии 3 км от его осевой линии. Диатрему сопровождает система даек, ориентированных в северо-восточном, северо-западном или почти меридиональном направлении. На поверхности трубка имеет форму неправильного овала, вытянутого на северо-запад. В среднепалеозойское и мезозойское время около 470 м верхней части диатремы было уничтожено длительной эрозией [5–7, 13–15, 18]. От раструба сохранилась только нижняя 120-метровая часть. Далее на глубину остатки раструба переходят в цилиндрический канал с почти вертикальными контактами. До глубины примерно 1 000 м размер трубки существенно не уменьшается, однако тело её в целом

наклонено в северо-восточном направлении. Трубка прорывает горизонтально залегающие терригенно-карбонатные породы PZ_1 , а перекрывают её отложения J_1 мощностью от 2,1 до 9,2 м. В раннетриасовое время диатрема была перекрыта пластовым телом долеритов. В верхней части трубки слабо выражена элювиальная кора выветривания (КВ), в глинистой массе которой содержатся обломки обохренных пород, что свидетельствует об избирательном характере гипергенных изменений элювиальных образований диатремы [5–7]. В таких профилях псевдоморфозы серпентина и кальцита по оливину, редкие зерна индикаторных минералов кимберлитов сцементированы карбонат-серпентиновым агрегатом. Из ксенолитов наиболее распространены (5–30 %) обломки терригенно-карбонатных пород PZ_1 . В небольшом количестве встречаются включения траппов, есть единичные обломки кристаллических сланцев фундамента платформы. Повышенное (40–60 %) количество ксенолитов карбонатных пород зафиксировано в приконтактной зоне, особенно на участках пологого залегания контактов.

Характерной особенностью верхних горизонтов диатремы (до глубины примерно 370 м) является относительно высокое содержание примеси терригенного материала вмещающих пород. Этот материал представлен песчанистой, алевритовой и глинистой фракциями, в которых доминируют тонкозернистые выделения кварца, полевых шпатов, турмалина, титанита, ставролита и глинистых минералов. Ниже количество этих минералов постепенно уменьшается, и на глубине ниже 500 м их нет совсем.

С глубиной строение кимберлитового тела усложняется, тут уже можно выделить кимберлиты трёх фаз внедрения, которые, правда, слабо различаются между собой по строению, составу и алмазонасности [8, 20]. Преобладают КБ, сложенные округлыми и овальными обособлениями пород ранней генерации. Автолиты обычно имеют более мелкопорфировую структуру, чем выполняющие кимберлиты.

По содержанию и составу индикаторных минералов кимберлитов породы трубки Интернациональная отличаются от подавляющего большинства кимберлитовых тел не только Мирнинского поля, но и всей СП. Характерным является низкое содержание минералов титанистой ассоциации (пикроильменит и оранжевый пироп) и повышенное – хромистой (хромшпинелид, хромдиопсид и хромистый пироп). Интенсивно серпентинизированные ксенолиты мантийных пород очень редки.

Трубку Интернациональная сопровождает десяток дайковых тел мощностью от нескольких сантиметров до 1 м; некоторые из них алмазонасны.

Типоморфные особенности алмазов трубки Интернациональная (рис. 5) дают возможность сделать вывод, что в целом они характерны для группы коренных месторождений с промышленной алмазонасностью Малоботубинского алмазонасного района и близки к алмазам трубки Мир (см. рис. 2). Среди них резко преобладают (до 71 %) кристаллы октаэдрического габитуса разновидности I, по Ю. Орлову [16]; реже отмечают индивиды переходного от октаэдрического габитуса к ромбододекаэдрическому (23 %), а содержание ламинарных ромбододекаэдров ничтожно (< 1 %), однако оно увеличивается по мере уменьшения крупности кристаллов и в классе $-1,0+0,5$ мм достигает 10 % от их общего количества, что сопоставимо с трубкой Мир [8]. Типичные округлые алмазы уральского (бразильского) типа (отрицательный фактор алмазонасности кимберлитов) обнаружено в небольшом количестве только в мелких классах ($-2,0+0,5$ мм).

Типоморфной особенностью алмазов трубки Интернациональная является сравнительно высокое (до 16 %) содержание плоскогранных октаэдров с острыми ребрами (так называемых кристаллов мирнинского типа), а это лучшая часть алмазного сырья. Среди морфологических типов преобладают тонколаминарные кристаллы преимущественно

октаэдрического габитуса со сноповидной и занозистой штриховкой, встречаются также грубослоистые индивиды с полицентрически растущими гранями и плоскогранные. Общее содержание алмазов с твердыми включениями сравнительно невысокое – до 21 %. Резко преобладают эпигенетические включения графита, часто в ассоциации с сульфидами. На долю сингенетических включений приходится около 5 % от общего количества алмазов, причем среди них резко доминируют (99 %) включения ультраосновной ассоциации, что сближает эти кристаллы с кристаллами большинства эксплуатируемых месторождений СП [8, 20].



Рис. 5. Алмазы из кимберлитов трубки Интернациональная (Малоботуобинский алмазоносный район).

Концентрация в алмазах примесного азота в форме А-центра высокая (78 % от общей концентрации А- и В₁-дефектов), его распределение характеризует (рис. 6) одномодальная кривая с максимумом в области $(15-18) \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Содержание “пластинчатых” дефектов (Р и В₂) низкое – $3,4 \text{ см}^{-1}$. Зафиксировано связь между концентрацией азота и крупностью кристаллов.

В целом типоморфные особенности алмазов трубки Интернациональная таковы: резкое преобладание кристаллов октаэдрического габитуса разновидности I при высоком содержании плоскогранных острорёберных октаэдров; невысокая ламинарность; низкое содержание двойников (в основном по шпинелевому закону) и сростков; низкое содержание алмазов с признаками природного травления. Характерны также повышенная степень прозрачности, невысокое содержание окрашенных индивидов и кристаллов с твёрдыми включениями, высокое содержание примесного азота в форме А-центра. Постоянно встречаются октаэдры грязно-фиолетовой окраски. Преобладает розово-сиреневая фотолюминесценция кристаллов.

Мы сопоставили имеющиеся материалы относительно алмазоносности и её связи со структурно-текстурными особенностями кимберлитов по трубкам Ботуобинская Среднемархинского алмазоносного района, Удачная и Айхал Далдыно-Алакитского алмазоносного района (ДААР), а также по керну разведочного материала с привязкой к петрографическим типам пород.

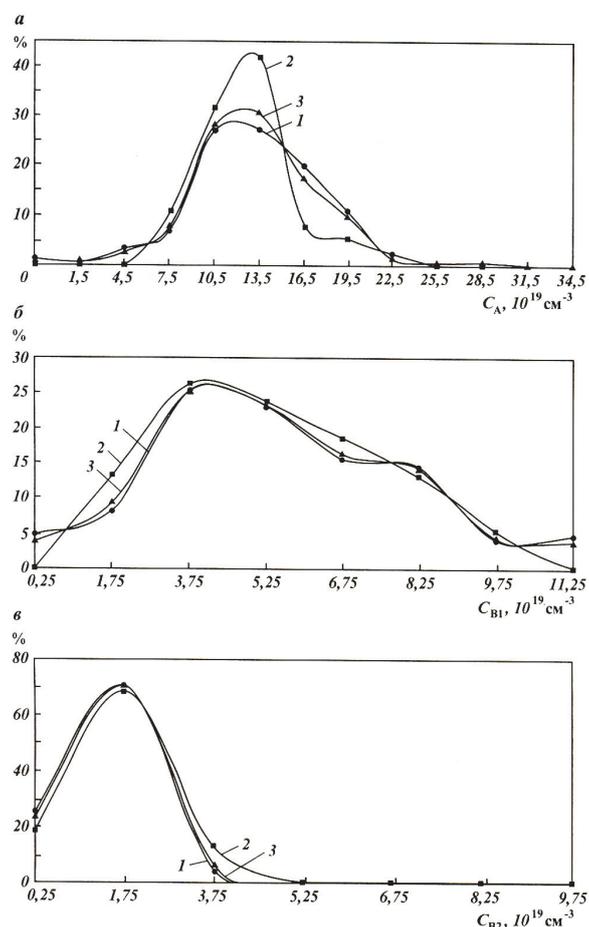


Рис. 6. Распределение алмазов трубки Интернациональная по концентрации примесей C [8]:
 a – А-центра; b – В1-дефекта; v – В2-дефекта; 1 – алмазы класса $-4+2$ мм; 2 – алмазы класса $-8+4$ мм; 3 – среднее.

Эти трубки сформированы [8, 20] вследствие нескольких (не менее двух) фаз внедрения кимберлитового расплава, каждой из которых соответствует собственный петрографический тип породы. Последовательность магматических фаз внедрения определена по резким геологическим контактам и включениям ксеноавтолитов, которые отражают временные границы этапов консолидации разных петрографических типов. Автолитовым КБ завершающих эксплозивных фаз внедрения в целом присуща повышенная алмазность, по сравнению с предшествующими интрузивными ПК. Это соотношение для восточного тела трубки Удачная составляет 1,3:1,0, для западного – 1,5:1,0, трубок Айхал и Ботуобинская – 1,0:1,5. Примерно такое же соотношение зафиксировано и для трубки Нюрбинская.

Превалирует мнение, что последние фазы внедрения кимберлитов в многофазовых трубках более алмазны. С использованием методов математической статистики определено [10, 12, 13], что участки с различной алмазностью располагаются в

трубках соответственно распространению кимберлитов разных фаз внедрения, причём породы завершающих этапов формирования отличаются повышенной продуктивностью. Границы кимберлитовых пород разных фаз внедрения обычно нечёткие, картировать их трудно, а критерии определения фаз и последовательности их формирования в ряде случаев весьма условны.

В трубках сложного внутреннего строения алмазы имеют различные крупность, габитус и свойства [17, 18]. В частности, ранние фазы внедрения кимберлитов трубки Мир обычно менее алмазоносны, количество октаэдров в них, по сравнению с более поздними фазами внедрения, минимально. Большинство алмазов из кимберлитовых жил имеет ромбододекаэдрический габитус; кристаллы сильно деформированы, трещиноваты, с дефектной окраской, часто содержат включения эпигенетического графита. Поверхность граней ромбододекаэдра имеет шагреневый рельеф, что свидетельствует о пластической деформации алмаза.

При исследовании типоморфных особенностей алмазов из промышленно алмазоносных трубок (Удачная, Сытыканская, Юбилейная, Комсомольская и др.) выявлено [8, 9, 18, 20], что наиболее высокопродуктивными являются рудные столбы, сложенные автолитовыми КБ. В них повышено содержание кристаллов октаэдрического габитуса в крупных классах, одновременно снижается количество ромбододекаэдров. Менее алмазоносными считают рудные столбы, выполненные ПК, в которых количество октаэдрических кристаллов уменьшается, а ромбододекаэдров – возрастает; одновременно возрастает роль округлых алмазов. Образование додекаэдрических поверхностей исследователи связывают с условиями растворения индивидов при повышенной температуре. Результаты экспериментов по искусственному получению алмаза [8] свидетельствуют о том, что габитус кристалла варьирует в зависимости от температуры. По мере повышения температуры появляются куб–октаэдр–додекаэдры, что даёт основания предполагать более высокое содержание крупных фенокристов оливина в ПК. В этих разновидностях пород из всех изученных трубок зафиксировано более мощные келифитовые каймы на гранатах ультраосновной ассоциации. Это свидетельствует о более длительной их реакции с кимберлитовым расплавом, то есть меньшей скорости внедрения транспортируемого флюида, что могло приводить и к растворению алмазов. Завершающим вулканическим фазам внедрения кимберлитовой магмы присуща значительная скорость подъёма, что могло положительно отразиться на сохранности алмазов и их соотношениях в настоящее время. Однако такая закономерность характерна не для всех диатрем. Например, в трубке Дальняя (ДААР) более алмазоносными оказались ПК. Обнаружены также различия [18] в распространении кристаллов с разным типом внутреннего строения в кимберлитах разных фаз внедрения Накынского поля (трубки Ботубинская и Нюрбинская). Определено, что среди алмазов из АКБ повышено содержание кристаллов с жёлтым и жёлто-зелёным свечением и низкое – с розовым, розово-сиреневым и оранжевым, что существенно отличается от аналогичных свойств минерала из ПК. Обнаружено различия в интенсивности образования продуктивных зародышей кристаллов алмаза из разных типов кимберлитов.

Изучено также взаимосвязь между химическим составом кимберлитов и их алмазоносностью [3, 20]. Исследования базировались на результатах химического анализа более 3 000 образцов кимберлитов различных структурно-петрографических разновидностей из всех изученных коренных месторождений алмазов Якутии. С помощью линейного корреляционного анализа выяснено, что между содержанием алмазов и доминирующих оксидов кимберлитов из трубок Мир и Интернациональная (МБАР), Сыты-

канская, Юбилейная и Удачная (ДААР) нет надёжных, устойчивых зависимостей. Вероятно, это обусловлено тем, что имеющиеся данные по алмазности десятиметровых разведочных интервалов охватывают несколько структурно-текстурных разновидностей пород.

Однако множественный регрессионный анализ подтвердил гипотезу о наличии связи между химизмом кимберлитов разрабатываемых месторождений СП и их алмазностью [3]. Имеющиеся в базе данных химические анализы разделили по уровням алмазности для отдельных диатрем на 50 групп; для каждой группы подсчитывали средние значения, которые затем использовали в уравнениях множественной регрессии. Как результат – в каждой кимберлитовой трубке обнаружено по две основные популяции (подгруппы), которые различаются содержанием отдельных петрогенных компонентов. В частности, ПК ранних фаз внедрения, которым присуща повышенная магниальность, титанистость и железистость, менее продуктивны по сравнению с КБ завершающих стадий формирования диатрем. Чем меньше в популяции TiO_2 , Fe_2O_3 , больше K_2O и Al_2O_3 , тем выше её алмазность.

Изложенное позволяет сделать такие выводы. На основании изучения геологического строения и вещественного состава трубок и жил, исследования алмазности кимберлитов, морфологии, гранулометрии и окраски алмазов детализировано модель пространственного размещения жильных тел, трубок Мир, Спутник, Интернациональная и др. Эти тела и трубки отличаются по алмазности, гранулометрическому составу и качеству алмазов. Наиболее обогащены мелкими и низкосортными алмазами жильные тела и рудные столбы, отвечающие первым фазам внедрения. Обилие мелких, окрашенных и низкосортных алмазов, например, в трубке Спутник, обусловлено тем, что кимберлитовый расплав при её становлении прошёл достаточно длинную историю развития. Поэтому термодинамические условия для сохранности алмазов были неблагоприятными; как следствие – появились дефектные алмазы. Различия в алмазности, гранулометрическом составе, количестве окрашенных алмазов, кристаллов с включениями графита, трещиноватых и поврежденных камней – это индикаторы различных термодинамических условий формирования описываемой природной рудной системы (вариации вещественного и газового состава, перепады *PT*-условий и т. д.).

Выявленные различия в алмазности отдельных конкретных фаз внедрения кимберлитов обусловлены, во-первых, разным уровнем заложения и разной длительностью функционирования образующих их магматических очагов, во-вторых, физико-химическими свойствами исходных составляющих, в-третьих, скоростью подъёма и характером продвижения кимберлитовой магмы на разных этапах кимберлитообразования.

Все основные разновидности кимберлитов и включения в них, обнаруженные в верхних частях диатрем, встречаются и на глубине, причём в распределении ксенолитов не выявлено никакой зональности. Интенсивность замещения ксенолитов вторичными минералами зависит от степени изменения содержащих их кимберлитов. Нередко бывает, что ксенолиты на глубине переработаны интенсивнее, чем в верхних горизонтах. Это связано с тем, что на кимберлиты и содержащиеся в них ксенолиты воздействуют высокоминерализованные воды, которые локализованы в мощных залежах соленосных толщ среди вмещающих кимберлиты СП кембрийских отложений.

Сравнительные исследования размера, морфологии, оптических свойств кристаллов и алмазности пород диатрем подтверждают различия между выделенными разновидностями КБ различных фаз внедрения. Особенности происхождения и извержений кимберлитовых расплавов могли влиять на преобразование первоначальной формы

кристаллов алмаза, что приводило к их растворению (иногда до полного уничтожения) и коррозии.

При оценке продуктивности кимберлитовых трубок необходимо учитывать реальные соотношения в диатремах интрузивных и эксплозивных процессов кимберлитобразования, которые меняются во времени. На основании изложенных материалов можно с уверенностью предположить: чем больший объем в трубке занимают ПК интрузивных фаз внедрения, тем ниже будет алмазность. Это подтверждено результатами опробования многих диатрем на СП. Во всех разрабатываемых кимберлитовых трубках региона с глубиной увеличивается объем КБ, что подтверждает их рентабельность.

Различная продуктивность выделенных типов кимберлитовых пород имеет важное практическое значение для выбора оптимального режима обогащения пород. Для повышения эффективности процесса обогащения отдельных разновидностей КБ нужно учитывать различия в соотношениях ксенолитов, в петрофизических свойствах, распределении породообразующих минералов, характере вторичной минерализации и насыщенности алмазами.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасьев В. П. Поисковая минералогия алмаза / В. П. Афанасьев, Н. Н. Зинчук, Н. П. Похиленко. – Новосибирск : Гео, 2010. – 650 с.
2. Бартошинский З. В. Сравнительная характеристика алмазов из различных алмазных районов Западной Якутии / З. В. Бартошинский // Геология и геофизика. – 1961. – № 6. – С. 40–50.
3. Василенко В. Б. Петрохимические модели алмазных месторождений Якутии / В. Б. Василенко, Н. Н. Зинчук, Л. Г. Кузнецова. – Новосибирск : Наука, 1997. – 557 с.
4. Вторичные минералы кимберлитов / Н. Н. Зинчук, А. Д. Харьков, Ю. М. Мельник, Н. П. Мовчан. – Киев : Наук. думка, 1987. – 282 с.
5. Зинчук Н. Н. Сравнительная характеристика вещественного состава коры выветривания кимберлитовых пород Сибирской и Восточно-Европейской платформ / Н. Н. Зинчук // Геология и геофизика. – 1992. – № 7. – С. 99–109.
6. Зинчук Н. Н. Коры выветривания и вторичные изменения кимберлитов Сибирской платформы (в связи с проблемой поисков и отработки алмазных месторождений) / Н. Н. Зинчук. – Новосибирск : НГУ, 1994. – 240 с.
7. Зинчук Н. Н. Постмагматические минералы кимберлитов / Н. Н. Зинчук. – М. : Недра, 2000. – 538 с.
8. Зинчук Н. Н. Типоморфизм алмазов Сибирской платформы / Н. Н. Зинчук, В. И. Коптиль. – М. : Недра, 2003. – 607 с.
9. Зинчук Н. Н. Кимберлиты в истории Земли / Н. Н. Зинчук, А. Д. Савко, А. В. Крайнов // Тр. НИИ геологии Воронеж. ун-та. – 2013. – Вып. 68. – 100 с.
10. Каминский Ф. В. Закономерности размещения кимберлитовых (разнофациальных) и родственных им пород на Сибирской платформе / Ф. В. Каминский // Докл. АН СССР. – 1972. – Т. 204, № 5. – С. 1187–1190.
11. Кимберлитовая трубка Удачная (вещественный состав и условия формирования) / Н. Н. Зинчук, З. В. Специус, В. В. Зуенко, В. М. Зувев. – Новосибирск : НГУ, 1993. – 147 с.

12. Крючков А. И. Идентификация кимберлитовых тел, подвергнутых динамическому воздействию траппов (на примере системы тел в районе трубки Юбилейная, Якутия) / А. И. Крючков, А. Д. Харьков, Н. П. Похиленко // Геология и геофизика. – 1994. – № 3. – С. 12–15.
13. Малич Н. С. Сибирская платформа / Н. С. Малич, В. Л. Масайтис, В. С. Сурков. – Л. : Недра, 1987. – 431 с.
14. Милашев В. А. Кимберлитовые провинции / В. А. Милашев. – Л. : Недра, 1974. – 224 с.
15. Милашев В. А. Кимберлиты и глубинная геология / В. А. Милашев. – Л. : Недра, 1990. – 167 с.
16. Орлов Ю. Л. Минералогия алмаза / Ю. Л. Орлов. – М. : Наука, 1984. – 264 с.
17. Петрография и минералогия кимберлитовых пород Якутии / [А. П. Бобриевич, И. П. Илупин, И. Т. Козлов и др.]. – М. : Недра, 1964. – 190 с.
18. Стратегия ведения и результаты алмазопроисковых работ / Н. Н. Зинчук, В. М. Зуев, В. И. Коптиль, С. Д. Черный // Горный вестник. – 1997. – № 3. – С. 53–57.
19. Харьков А. Д. Геолого-генетические основы шлихоминералогического метода поисков алмазных месторождений / А. Д. Харьков, Н. Н. Зинчук, А. И. Крючков. – М. : Недра, 1995. – 348 с.
20. Харьков А. Д. Коренные месторождения алмазов Мира / А. Д. Харьков, Н. Н. Зинчук, А. И. Крючков. – М. : Недра, 1998. – 555 с.

*Стаття: надійшла до редакції 05.01.2017
прийнята до друку 26.04.2017*

РЕЧОВИННІ КРИТЕРІЇ АЛМАЗОНОСНОСТІ КІМБЕРЛІТІВ

М. Зінчук

*Західноякутський науковий центр Академії наук РС(Я),
вул. Леніна, 4/1, 678170 м. Мирний, РФ
E-mail: nnzinchuk@rambler.ru*

Більшість вивчених кимберлітових діатрем – це багатофазові трубки. Кожна магматична фаза вкорінення, сформована всередині діатреми, складена кимберлітом характерного петрографічного й петрохімічного типу, який має низку стійких, слабо змінних з глибиною типоморфних ознак. Кимберліти різних фаз укорінення в одній діатремі відрізняються між собою за співвідношенням порфірових і кластичних структурних елементів та за вмістом індикаторних мінералів. Виконані дослідження дали змогу виявити суттєві відмінності в алмазонасності різних фаз укорінення кимберлітів. Це зумовлено різним рівнем формування магматичних джерел, неоднаковою тривалістю їхнього функціонування, фізико-хімічними особливостями вихідних складових, швидкістю піднімання й характером просування кимберлітової магми на різних етапах кимберлітоутворення. Кимберлітові брекчії завершальних етапів формування трубок продуктивніші порівняно з порфіровими кимберлітами ранніх інтрузивних фаз укорінення.

Особливості походження й виверження кимберлітових розплавів могли суттєво впливати на перетворення первинної форми кристалів алмазу, що приводило до їхнього розчинення (іноді до цілковитого руйнування) та корозії. У разі оцінювання продуктивності

кімберлітових трубок треба брати до уваги реальні співвідношення в діатремах інтрузивних і експлозивних процесів кімберлітоутворення, які, зазвичай, змінюються з часом.

Ключові слова: кімберлітова трубка, алмаз, фази вкорінення, інтрузивний процес, ефузивний процес, кімберлітоутворення, типоморфізм мінералів.

MATTER CRITERIA OF DIAMOND-BEARING KIMBERLITES

N. Zinchuk

*West-Yakut Scientific Centre of the Sakha (Yakutia) Republic Academy of Sciences,
4/1, Lenin St., 678170 Mirnyi, Russia
E-mail: nnzinchuk@rambler.ru*

Based on the study of the geological structure and material composition of kimberlite pipes and veins, diamond potential of kimberlites, morphology, grain sizing and colour of diamonds, we have detailed the model of the spatial distribution of veined bodies, pipes Mir, Sputnik, Internationalnaya, etc. They differ in the number of diamonds, their grading and quality. The most enriched in small and low-grade diamonds the veined bodies and ore columns, corresponding to the first phase of injection. The plenty of small, painted and low-grade diamonds, for example, in Sputnik-pipe, is due to the fact that the kimberlite melt during the pipe formation developed enough. Therefore, thermodynamic conditions for the preservation of diamonds were severe; as a consequence defective diamonds appeared. The differences in the diamond content, granulometric composition, quantity of coloured diamonds, of crystals with graphite inclusions and fractured or damaged individuals are the indicators of different thermodynamic conditions for the formation of the described natural ore system (variations of material and gas composition, changes in *PT*-conditions, etc.).

The differences in the diamond content of individual phases of kimberlite injection have been caused by (1) varying level of initial stage and different duration of magma hearths functioning, (2) physical and chemical properties of the initial components, (3) the rate of rise and the character of kimberlite magma moving at different stages of kimberlites formation.

All the main varieties of kimberlites and inclusions in them, found in the upper parts of the diatremes, are found also at depth, at that there is no zoning in the distribution of xenoliths. The intensity of replacement of xenoliths by secondary minerals depends on the degree of change of kimberlites which contain these xenoliths. It often happens that the xenoliths at depths are changed more intensively than in the upper horizons. This is due to the fact that kimberlites and xenoliths in them have been affected by highly mineralized waters, which are localized in the thick deposits of the salt strata among the Cambrian rocks containing kimberlites on the Siberian platform.

A comparative study of the size, morphology, optical properties of crystals and diamond potential of the kimberlite diatremes confirm the differences between distinguished varieties of kimberlite breccias of the different phases of injection. Features of the origin and injection of kimberlite melts could affect the transformation of diamond crystals original shape, resulting in dissolution of the crystals (sometimes up to complete destruction) and their corrosion.

Different productivity of distinguished kimberlite rock types is of great practical importance for choice of optimal mode of rocks enrichment. To improve the efficiency of the enrichment of separate kimberlite breccia varieties it is necessary to consider the differences in the ratio of xenoliths, petrophysical properties, distribution of rock-forming minerals, nature of secondary mineralization and saturation of the diamonds.

Key words: kimberlite pipe, diamond, phases of injection, intrusive process, effusive process, formation of kimberlite, typomorphism of minerals.