

О НЕКОТОРЫХ ВЕЩЕСТВЕННЫХ ОСОБЕННОСТЯХ ПРОДУКТИВНОСТИ КИМБЕРЛИТОВЫХ ПОРОД

Большинство изученных кимберлитовых диатрем представляют собой многофазные трубки. Каждая магматическая фаза внедрения, сформированная внутри диатрем, сложена кимберлитом с характерным петрографическим и петрохимическим типом, обладающим рядом устойчивых, слабо изменяющихся с глубиной типоморфных признаков. Проведенными исследованиями отмечено существенные различия в алмазоносности разных фаз внедрения кимберлитов, что обусловлено разным уровнем заложения и длительности функционирования образующих их магматических очагов, физико-химическими свойствами исходных составляющих, а также скоростью подъёма 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. При оценке продуктивности кимберлитовых трубок необходимо учитывать реальные соотношения в диатремах интрузивных и эксплозивных процессов кимберлитообразования, которые меняются обычно во времени.

Ключевые слова: кимберлитовые трубки, алмазы и алмазоносность, интрузивные и эксплозивные процессы, типоморфизм минералов.

DOI: 10.17072/chirvinsky.2025.49

Алмаз – полигенный минерал, образующийся не только в условиях земных недр, но и при скоростном соударении космических тел с землей [1–6]. На протяжении примерно полтора столетия лет в мире успешно эксплуатируется коренные месторождения алмазов, связанные с кимберлитовыми трубками взрыва (диатремами). Большинство исследователей считают, что алмаз кимберлитов кристаллизовался на большой глубине (порядка 150–200 км) в мантии Земли в области его стабильности ($P > 45$ ГПа, $t = 900$ – 1400°C) намного раньше образования кимберлитовых тел, а поэтому этот минерал здесь является ксеногенным образованием. По нашему мнению [7–12], его первоисточником являются дезинтегрированные мантийные породы (перидотиты и эклогиты), фрагменты которых вынесены кимберлитовой магмой в земную кору. Форма залегания алмазоносных кимберлитов – трубки и дайки, а силлы обычно не содержат алмазы. Специалисты,

занимающиеся оценкой коренных месторождений алмазов, разделяют их на два генетические типа: эксплозивный, включающий в основном трубки взрыва, и интрузивный (гипабисальный), объединяющий дайковые, жильные, штокоподобные тела и силлы. По содержанию алмазов среди коренных месторождений алмазов выделяются весьма высоко-, средне- и низкоалмазоносные. Кимберлитовые трубки (в том числе и промышленно алмазоносные) различаются между собой по многим параметрам: и располагаются в различной геотектонической обстановке, образовались в широком возрастном интервале, в различной степени эродированы, отличаются по минералого-петрохимическим особенностям. Индивидуальные особенности четко проявляются у кимберлитов, размещающихся в различных провинциях, полях, а иногда даже в рядом расположенным диатремам. Неравномерное распределение алмазов в кимберлитовых диатремах [7–11] существенно осложняет плановую отработку коренных месторождений. Выявление особенностей вертикальной изменчивости алмазоносности кимберлитовых пород до глубины их рентабельной отработки является одной из главнейших задач и проблем разработки таких месторождений. Несмотря на в целом значительную изученность кимберлитовых диатрем Сибирской платформы (СП), вопросы их алмазоносности во многом являются недостаточно изученными и дискуссионными по следующим причинам: а) закрытости данных опробования по многим месторождениям; б) несопоставимости данных опробования эксплоразведочных и эксплуатационных проб; в) не всегда опробуются строго раздельно различные типы кимберлитов. Кроме того, имеются определенные некоторые элементы субъективизма при определении петрографических типов кимберлитов различными исследователями [12–16]. Наиболее детально вопросы изменения алмазоносности различных типов кимберлитов изучались на примере трубки Мир, где многие исследователи получили данные об их различии. При этом выделяется различное количество петрографических типов (от 3-х до 6-и и более), которые по-разному распространены как в плане, так и на разведанную (до 1200 м) глубину. Кимберлитовая трубка Мир на поверхности имеет (рис.1) форму овала (размер по длинной оси – 490 м, по короткой – 320 м) со слабым пережимом в средней части. До глубины 200 м трубка представляет собой типичную воронку, глубже (примерно до 900 м) – цилиндрическое тело с незначительным сужением книзу, а затем на глубине около 1000 м от поверхности она переходит в серию подводящих даек. Верхние горизонты трубки Мир образовались в результате трехфазного внедрения кимберлитового расплава [17–21]. Кимберлитовые брекчии (КБ) первой фазы составляют большую часть северо-западной половины трубки. КБ второй фазы на уровне современного эрозионного среза локализованы в

юго-восточной части трубки и инъецируют брекчии северо-западной половины диатремы. Кимберлитовые породы третьей фазы формируют на юго-востоке трубки вытянутое в северо-западном направлении дайковое тело размером 30 x 120 м. Контакты этого тела с вмещающими кимберлитовыми брекчиями секущие, в зоне контакта широко развита сульфидная минерализация. Трехфазность строения нижних горизонтов диатремы установлена [22–27] также по изучению керна, вскрытого скважинами при глубоком бурении с целью оценки продуктивности этой части месторождения. Между кимберлитами первой и второй фаз внедрения (на глубину около 1 км) прослеживается зона сочленения («шовная зона») подводящих каналов, обогащенная ксенолитами вмещающих пород («ксенолитовый пояс»). Установлено [28–32], что алмазонасность пород, слагающих трубку, в плане и по вертикали зависит от закономерностей распределения кимберлитов разных фаз внедрения в объеме рудного тела. Отмечено, что атакситовая и крупнопорфировая разновидности характеризуются минимальной, а автолитовые кимберлитовые брекчии (АКБ) максимальной алмазонасностью. Существенное влияние на различие в алмазонасности оказывает присутствие кристаллов средних и крупных классов [33–37]. По гранулометрическому составу и морфологическим особенностям алмазов, окраске и степени дефектности кристаллов на глубоких горизонтах месторождения выделено [38–41] два участка на северо-западе и юго-востоке трубки. Здесь отмечено различие по алмазонасности магматических фаз внедрения, а также в содержании в них разных классов крупности и их оптическим свойствам. Кимберлиты раннего этапа консолидации отличаются снижением качества алмазов и уменьшением алмазонасности. КБ характеризуются и более высокими экономическими показателями. Кроме упомянутых трех фаз КБ, формирование которых происходило в результате последовательного внедрения самостоятельных порций кимберлитового расплава из эволюционирующего магматического очага [42–45], вдоль контакта с вмещающими породами повсеместно отмечаются своеобразные кимберлитовые брекчии (5–50 м), названные эндоконтактовыми. Последние не связаны с самостоятельной фазой формирования диатремы, а представляют собой своеобразные фациальные разновидности упомянутых КБ. Возникновение таких пород обусловлено повышенным содержанием ксеногенного материала вмещающих трубки терригенно-карбонатных пород и влиянием на кимберлиты пневматолитово-гидротермальных растворов [46–48]. Породы этой зоны в диатремах наиболее интенсивно карбонатизированы и насыщены (достигая до 60 % объема) ксенолитами терригенно-карбонатных пород. Довольно интересной является также зона кимберлитовых пород, разделяющая породы первой и второй фаз внедрения. Она имеет ширину до

нескольких десятков метров и характеризуется высокими концентрациями рифов вмещающих пород, размеры которых достигают иногда нескольких десятков метров, совпадая с пережимом диатремы, рассекая её в почти меридиональном направлении на две части (рис. 1). В результате геолого-разведочных работ с подсчетом полезного компонента отмечено продолжение ксенолитового пояса и на глубоких (до 1000 м) горизонтах, образуя своеобразную шовную зону, по которой сочленяются два самостоятельных тела, имеющие на глубине изолированные подводящие каналы [49–51]. Слабоизмененные кимберлиты трубки отличаются высокой магнезиальностью, а иногда и повышенным содержанием K_2O . Слабо или практически неизмененные кимберлиты среди сильно переработанных вторичными процессами магматических образований отличаются низким содержанием карбонатной составляющей и повышенным – флогопита. На глубоких горизонтах трубки Мир отмечены также небольшие участки, сложенные атакситовым кимберлитом (АК), представляющим собой песчаникоподобную породу, нередко слоистой текстуры. По внешнему виду она напоминает осадочно-вулканогенные образования, характерные для верхних горизонтов некоторых слабо эродированных диатрем, однако от последних отличается преобладанием кимберлитового материала. В целом КБ описываемой диатремы содержат переменное количество обломочного материала терригенно-карбонатных пород чехла платформы, траппов и ксенолитов пород верхней мантии [52–55].

Внутритрубочные дайки сложены в различной степени серпентинизированным кимберлитом темно-серого до черного цвета с порфировой структурой и ориентированной текстурой, обусловленной субпараллельным расположением порфировых выделений оливина, а также обогащенной флогопитом карбонат-серпентиновой основной массы. В кимберлитовых породах даечного комплекса, в отличие от вмещающих их КБ, не отмечены ксенолиты осадочных пород, конвергентных включений, а также крупные выделения первичных минералов. Внутритрубочные дайки вскрыты разведочными скважинами на глубинах 1004,7–1005,2 и 1258 м [56–58]; ширина их достигает несколько десятков сантиметров. Дайковый кимберлит представляет собой мелкопорфировую породу темно-серого цвета, сложенную псевдоморфозами по оливину и многочисленными чешуйками и пластинчатыми кристаллами флогопита светло-коричневого цвета. Основная масса пород состоит из агрегатов серпентина с примесью кальцита. Помимо внутритрубочных даек, при разведке трубки были вскрыты и другие дайковые тела кимберлитов, которые представлены темно-серыми плотными породами с афировой структурой, практически без порфировых выделений оливина или псевдоморфоз по нему.

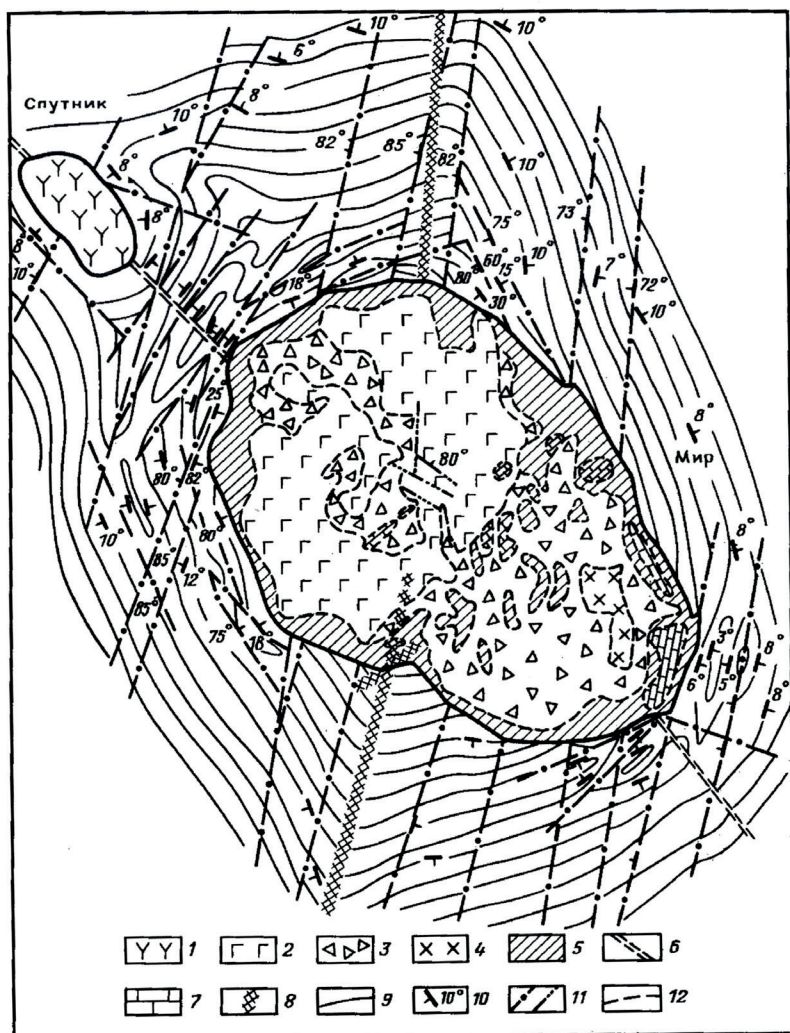


Рис.1. Геолого-структурная схема кимберлитовых трубок Мир и Спутник (МБАР). 1 – трубка Спутник; 2 – 4 – трубка Мир с кимберлитами соответственно первой – третьей фаз внедрения; 5 – зоны эндоконтактов; 6 – кимберлитовая дайка; 7 – ксенолиты осадочных пород; 8 – зона дробления с галенитовой и сфалеритовой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

В 131 м на северо-восток от трубки Мир расположена кимберлитовая трубка Спутник (рис. 1), имеющая в плане размеры 140 x 90 м. Форма трубки овальная с вытянутой в северо-западном направлении длинной осью. Вмещающими породами диатремы на уровне современного среза служат отложения нижнего ордовика мощностью до 280 м. Глубже трубку окружают породы кембрийского возраста. В вертикальном разрезе трубка быстро выклинивается, 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 объединяются в более мощную дайку – подводящий канал северо-западной ориентировки. Для трубки характерно повышенное содержание ксенолитов вмещающих пород и траппов. По степени выветрелости и постмагматической измененности среди магматических пород трубки выделяется 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 от серого до грязно-серого цвета. Карьером около трубок Мир и Спутник во вмещающих породах вскрыты три кимберлитовые дайки. Одна из них (Южная) прослежена на юго-восток от трубки Мир на расстоянии до 200 м. Вторая (Центральная), вскрытая между обеими трубками, как бы соединяет их. К северо-западу от трубки Спутник на расстояние 300 м от контакта простирается дайка Северная. Мощность этих даек колеблется от 10 до 30 см. Основное тело каждой дайки часто расщепляется на несколько более тонких прожилков мощностью от 1 до 10 см. Во вмещающих породах прожилки либо выклиниваются, либо снова соединяются с главным телом. Характер взаимоотношения даек с трубками позволяет относить их к дотрубочным образованиям, сформировавшимся в начальную стадию развития диатрем [6, 12]. Кимберлитовые породы даек отличаются от кимберлитов трубок Мир и Спутник высоким содержанием карбонатного материала, повышенной ролью пиропы и пикроильменита, а также титана и фосфата. Несколько дайковых тел кимберлитов сложной морфологии отмечено под пластовым телом долеритов на глубине около 500 м. Дайковый кимберлит верхних и глубоких горизонтов существенно различаются, что выражается, прежде всего, в увеличении степени карбонатизации более нижних их частей. Существенно отличается по составу от всех отмеченных выше структур и вскрытое карьером и буровыми скважинами около трубок Мир и Спутник пластовое кимберлитовое тело (силл), рвущее дайку долеритов, а также корневую зону трубки Спутник, протягиваясь на десятки метров севернее последней.

Содержание алмазов в трубке Мир значительно выше, чем во многих высоко-алмазоносных месторождениях Мира [1, 7]. Алмазы представлены октаэдрами (до 61 %), ромбододекаэдрами (до 10 %), комбинированными кристаллами (до 29 %) и кубами (меньше 1 %). Характерной особенностью алмазов трубки Мир, как и других кимберлитовых тел с промышленной алмазоносностью Малоботуобинского алмазоносного района (МБАР), является резкое преобладание кристаллов октаэдрического габитуса (рис. 2) при сравнительно невысоких содержаниях ламинарных кристаллов переходного от октаэдрического к ромбододекаэдрическому габитуса и ламинарных ромбододекаэдров. Преобладают бесцветные камни (до 75 %), но встречаются также дымчато-серые (до 14 %), буровато-красные (до 7 %), голубовато-зеленые (до 1 %), желтые (до 1 %) и лиловые (2 %). Общая доля сростков нередко достигает до 18 %, а шпинелевых двойников – до 10 %. Значительное количество алмазов трубки Мир в той или иной степени трещиноваты, причем типоморфными для месторождения являются секущие трещины, не характерные для кимберлитовых диатрем других алмазоносных районов СП. Одной из причин этого факта является 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 алмазах и на его долю приходится около 75 % общего содержания А– и В1–дефектов [33,48].

Поскольку трубки Мир и Спутник, дайки и силлоподобное тело представляют собой единую взаимосвязанную рудную систему, нами [11,37] предпринята первая попытка провести сравнительное изучение особенностей алмазов из различных типов пород на всю глубину пробуренных колонковых скважин при разведке диатремы (нижние части) и их производственной отработки (верхние горизонты). При исследовании алмазов основное внимание уделялось морфологическим, оптическим и другим свойствам кристаллов. При этом основное внимание было уделено кристаллам октаэдрического габитуса, их сросткам, двойникам и агрегатам, поскольку кубические и ромбододекаэдрические формы наблюдались редко и не отражали специфику выделяемых разновидностей КБ. Использовались также признаки алмазов, включающие особенности приобретенные кристаллами в процессе их транспортировки кимберлитовой магмой, её дифференциации и раскристаллизации, которые отнесены к дефектным (появление коричневой окраски, дымчатость, коррозионная скульптура, включения графита, желто-оранжевая фотолюминесценция и

другие). На глубоких горизонтах трубки Мир КБ второй фазы внедрения составляют более 80 % объема тела, тогда как аналогичные породы начальной фазы отмечаются только на отдельных участках [12]. Различие в алмазонасности КБ двух фаз внедрения можно объяснить разубоживанием кимберлитов первой фазы в результате насыщения их ксенолитами пород осадочного чехла и меньшей скоростью подъема и глубиной зарождения первых порций кимберлитовой магмы. Однако в целом алмазонасность каждого конкретного типа кимберлитовых пород колеблется в широких пределах [17]. Несмотря на в целом почти равномерное распределение алмазов по классам крупности, если не учитывать конкретных разновидностей пород, для образований различных фаз отмечаются определенные различия. Так, КБ первой фазы содержат максимальное количество мелких и максимальное число крупных кристаллов. В отличие от этого, в КБ второй фазы внедрения возрастает содержание крупных и уменьшается роль мелких кристаллов. Выявленная закономерность в соотношениях мелких и крупных кристаллов в брекчиях обеих фаз внедрения оказывает существенное влияние на колебания средней массы кристаллов, минимум и максимум которой зафиксированы для отдельных разновидностей первой и второй фаз формирования кимберлитовой трубки Мир. В приконтактных зонах кимберлитов с вмещающими трубку породами увеличивается количество мелких кристаллов, тогда как количество крупных становится больше по мере приближения к центру диатремы. При этом, 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 становления диатремы (автолитовой и микролитовой) количество таких алмазов намного ниже. Степень сохранности кристаллов алмаза, их средняя масса и алмазонасность пород второй разновидности глубоких горизонтов трубки Мир значительно выше, чем аналогичных параметров в этих же породах верхних горизонтов, что связано с динамикой заполнения диатремы и скоростью кристаллизации кимберлитового субстрата.

По минералогическим особенностям в кимберлитовых породах трубки Мир преобладают (рис.2) бесцветные, реже эпигенетически окрашенные в дымчато-коричневые цвета (из-за пластической деформации) алмазы 1 разновидности по Ю.Л.Орлову [Орлов,1984] при незначительном (до 2 %) содержании серых поликристаллических агрегатов УШ разновидности и единичных находках алмазов с оболочкой 1У разновидности (как желтовато-зеленого, так и молочно-серого цвета), октаэдрического габитуса, реже – комбинационного ряда октаэдр-ромбододекаэдр-куб.

Характерной типоморфной особенностью алмазов трубки Мир является одно из максимальных среди месторождений мира содержание бесцветных плоскогранных октаэдров с острыми, иногда слегка округленными ребрами, названными кристаллами мирнинского типа. Из морфологических типов кристаллов преобладают [47] тонколаминарные октаэдры со сноповидной и занозистой штриховками, превалирующие над груболаминарными камнями с полицентрически растущими гранями, сложенными как тригональными, так и дитригональными слоями роста. Основная масса алмазов представлена монокристаллами; на долю двойников и сростков приходится не более 20 % общего количества кристаллов. Значительное количество алмазов трубки Мир в той или иной степени трещиноваты, причем типоморфными являются секущие трещины, не характерные для кимберлитовых месторождений алмазоносных полей СП. В кимберлитовой трубке Спутник алмазоносность кимберлитов в 4 раза ниже, чем в трубке Мир. Для алмазов из кимберлитов трубки Спутник характерно преобладание (до 70 %) мелких кристаллов и небольшое количество (до 7 %) средних размеров. Обнаружены ромбодекаэдры и кристаллы переходной формы, однако основная масса – алмазы октаэдрического габитуса и их осколки. Для алмазов этой небольшой



Рис.2. Фото алмазов из кимберлитов трубки Мир (МБАР).

трубки характерно повышенное (до 19 %) содержание твердых включений эклогитовой ассоциации, что обычно свойственно более ранней и менее глубинной фазе кимберлитового магматизма [17, 20, 32]. В кимберлитовых жилах, откартированных в районе куста трубки Мир, доля мелких алмазов достигает до 80 %, а среднего класса – до 19 %. Преобладающее количество алмазов в жилах имеют ромбододекаэдрический габитус [33]. Обычно они сложно деформированные, трещиноватые, с коричневой окраской с полосами пластической деформации. Развитые в кимберлитовых жилах мелкие алмазы и их осколки, коричнево-дымчатые, графитизированные, корродированные кристаллы указывают на сложные термодинамические условия их образования (перепады давления, температуры и газового режима).

Многие исследователи кимберлитового магматизма различных древних платформ, на основании сравнения геологического строения и минералого-петрографического состава, считают, что в каждом алмазоносном районе обычно находится крупное многофазное месторождение и намного больше более простых по строению диатрем. В пределах Мирнинского кимберлитового поля (МКП) МБАР, наряду с многофазной трубкой Мир, отмечены более простые по строению диатремы (Интернациональная, имени XXIII съезда КПСС, Дачная, Таёжная и Амакинская) и ряд жил, наиболее изученной среди которых является самостоятельная кимберлитовая жила А-21. Наиболее ценной в промышленном отношении является 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 Интернациональная тяготеет к зоне Западного разлома, размещающаяся на расстоянии 3 км от его осевой линии. Трубка сопровождается системой даек, ориентированных в северо-восточном, северо-западном или почти меридиональном направлениях. На поверхности трубка имеет форму неправильного овала (рис. 3), вытянутого на северо-запад. В среднепалеозойское и мезозойское время около 470 м верхней части диатремы было уничтожено в результате длительной эрозии [5–7, 20–24]. От раструба сохранилась нижняя 120-метровая его часть. Далее на глубину остатки раструба переходят в цилиндрический канал с почти вертикальными контактами. До глубины примерно 1000 м размеры трубки существенно не уменьшаются, однако тело её в целом склоняется в северо-восточном направлении. Трубка прорывает горизонтально залегающие терригенно-карбонатные породы нижнего палеозоя и перекрывается нижнеюрскими отложениями мощностью от 2,1 до 9,2 м. В раннетриасовое время диатрема была перекрыта пластовым телом долеритов. В её верхней части

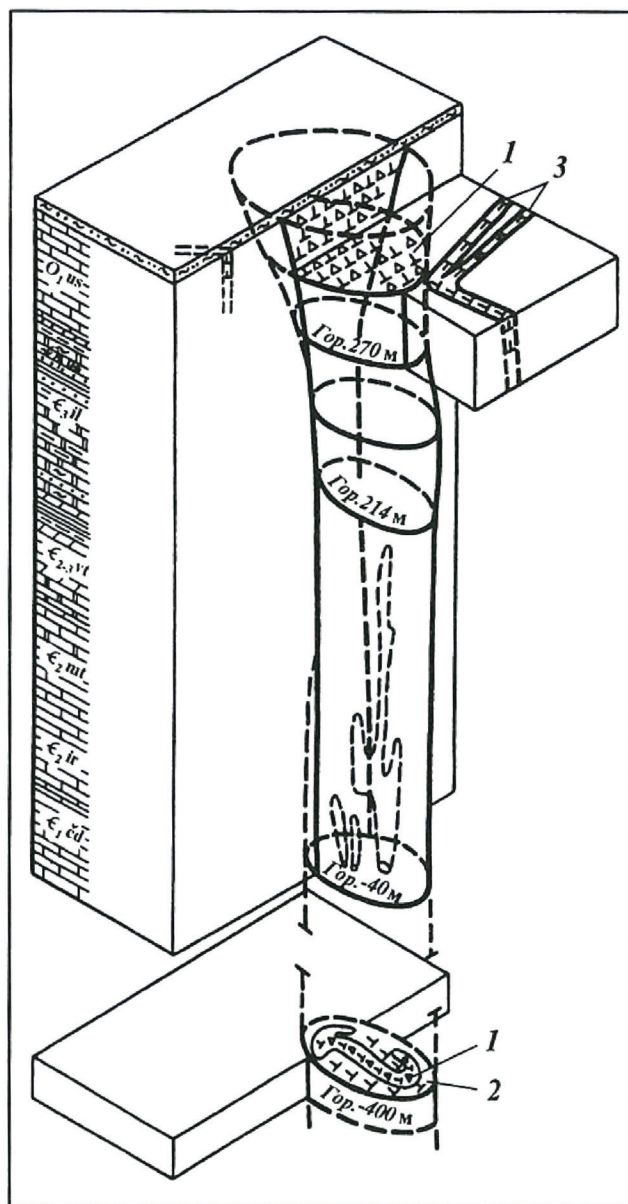


Рис.3. Блок-диаграмма кимберлитовой трубки Интернациональная (МБАР).
1 – кимберлитовая брекчия, 2 – порфировый кимберлит, 3 – кимберлитовые дайки

установлена слабо выраженная элювиальная кора выветривания (КВ) с содержанием в глинистой массе обломков обохренных пород, что подчеркивает избирательный характер гипергенного изменения элювиальных образований диатремы [15–17]. В таких профилях псевдоморфозы серпентина и кальцита по оливину, редкие зерна индикаторных минералов кимберлитов (ИМК) сцементированы карбонат-серпентиновым агрегатом. Из ксенолитов наиболее распространены (5-30 %) обломки терригенно-карбонатных пород нижнего палеозоя. В небольших количествах встречаются включения траппов. Обнаружены также единичные обломки кристаллических сланцев фундамента СП. 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. Последний представлен песчанистой, алевритовой и глинистой фракциями, в которых доминируют тонкозернистые выделения кварца, полевых шпатов, турмалина, сфена, ставролита и глинистых минералов. Ниже указанной глубины количество перечисленных минералов постепенно уменьшается и на глубинах ниже 500 м они полностью исчезают. С глубиной строение кимберлитового тела усложняется и в этих частях выделяются кимберлиты трех фаз внедрения, слабо различающихся между собой по строению, составу и алмазонасности [27, 36]. Значительный объем кимберлитовых пород на глубоких горизонтах приходится на КБ, сложенные округлыми и овальными обособлениями пород ранней генерации. Автолиты имеют обычно более мелкопорфировую структуру, чем выполняющие кимберлиты. По содержанию и составу ИМК породы трубки Интернациональная отличаются от подавляющего большинства кимберлитовых тел не только МКП, но и всей СП. Характерным для описываемой диатремы является низкое содержание минералов титанистой ассоциации (пикроильменит и оранжевый пироп) и повышенное – хромистой (хромшпинелид, хромдиопсид и хромистый пироп). Сильно серпентинизированные ксенолиты мантийных пород в описываемой диатреме очень редки. Трубку Интернациональная сопровождают десяток дайковых тел (мощностью от нескольких сантиметров до 1 м), некоторые из которых алмазоносны.

По своим типоморфным особенностям алмазы трубки Интернациональная (рис. 4) являются характерными для группы коренных месторождений с промышленной алмазонасностью МБАР и в целом близки к алмазам трубки Мир (рис. 2). Среди них резко (до 71 %) преобладают кристаллы октаэдрического габитуса 1 разновидности,

реже переходного от октаэдрического к ромбододекаэдрического габитуса (23%) при ничтожном (меньше 1 %) содержании ламинарных ромбододекаэдров. Типичные округлые алмазы уральского (бразильского) типа, являющиеся отрицательным фактором алмазности кимберлитов, встречаются в небольшом количестве только в мелких классах (-2+0,5 мм). Содержание ламинарных ромбододекаэдров увеличивается по мере уменьшения крупности кристаллов и в классе -1+0,5 мм достигает 10 % их общего количества, что сопоставимо с таковым в трубке Мир [37]. Типоморфной особенностью алмазов трубки Интернациональная является сравнительно высокое (до 16 %) содержание плоскогранных октаэдров с острыми ребрами мирнинского типа, являющихся лучшей частью алмазного сырья. По морфологическим типам преобладают тонколаминарные кристаллы преимущественно октаэдрического габитуса со сноповидной и занозистой штриховкой, преобладание над грубослоистыми индивидами с полицентрически растущими гранями и плоскогранными. Общее содержание алмазов с твердыми включениями является сравнительно невысоким и не превышает 21 % общего количества кристаллов. Среди них резко преобладают эпигенетически включения графита, часто в ассоциации с сульфидами. На долю сингенетических включений приходится примерно 5 % общего количества алмазов, причем среди них доминируют (99 %) включения ультраосновной ассоциации, что сближает их с кристаллами большинства эксплуатируемых месторождений СП [27, 32]. Концентрация в алмазах примесного азота в форме А-центра является высокой и распределение его характеризуется одномодальной кривой с максимумом в области $(15-18) \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Содержание А-центра составляет 626 at ppm, причем А-центр составляет 78% общей концентрации А- и В1-дефектов. Содержание «пластинчатых» дефектов (Р и В₂) также низкое – $3,4 \text{ см}^{-1}$. Отмечена связь концентрации азота с крупностью кристаллов. В целом типоморфными особенностями алмазов трубки Интернациональная являются: резкое преобладание кристаллов октаэдрического габитуса 1 разновидности при высоком содержании плоскогранных остросеберных октаэдров, невысокая ламинарность, низкое содержание двойников и сростков, представленных преимущественно двойниками по шпинелевому закону и низкое содержание алмазов с признаками природного травления. Также для них характерна повышенная степень прозрачности, невысокое содержание окрашенных камней и кристаллов с твердыми включениями. Преобладает розово-сиреневая фотолюминесценция кристаллов и высокое содержание в них примесного азота в форме А-центра. Постоянно присутствуют грязно-фиолетовые октаэдры.



Рис.4. Фото алмазов из кимберлитов трубки Интернациональная (МБАР).

Для получения более обширной информации по рассматриваемой тематике, проведено сопоставление имеющихся материалов по алмазности и их связи со структурно-текстурными особенностями кимберлитов трубок Ботуобинская (Средне-Мархинский алмазоносный район – СМАР), Удачная и Айхал (Далдыно-Алакитский алмазоносный район – ДААР), а также по керну разведочного материала с привязкой к петрографическим типам. Эти трубки сформированы [7, 12] в результате нескольких (не менее двух) фаз внедрения кимберлитового расплава, каждой из которых соответствует собственный петрографический тип породы. Последовательность магматических фаз внедрения установлена по резким геологическим контактам и включениям ксеноавтолитов, отражающим временные границы этапов консолидации разных петрографических типов. АКБ завершающих эксплозивных фаз внедрения характеризуются в целом повышенной алмазностью, по сравнению с предшествующими по образованию интрузивными ПК. Это соотношение (в условных единицах) для восточного тела трубки Удачная составляет $1,3 : 1$, западного – $1,5 : 1$, трубок Айхал и Ботуобинская – $1 : 1,5$. Примерно такое же соотношение отмечено и для трубки Нюрбинская. Превалирует мнение, что последние фазы внедрения кимберлитов у многофазных трубках более алмазоносны. Используя методы математической статистики,

определено [7], что участки с различной алмазоносностью в трубках располагаются соответственно распространению кимберлитов разных фаз внедрения, причем породы завершающих этапов формирования характеризуются повышенной продуктивностью. Сами границы кимберлитовых пород разных фаз внедрения обычно нечеткие, трудно картируемые, а критерии определения фаз и последовательности их формирования в ряде случаев весьма условны.

В трубках сложного внутреннего строения присутствуют алмазы различной крупности, габитуса и свойств [3, 7]. Обычно ранние фазы внедрения кимберлитов трубки Мир менее алмазоносны, содержат минимальное количество октаэдров по сравнению с более поздними фазами внедрения. Большинство алмазов из кимберлитовых жил имеют ромбододекаэдрический габитус; кристаллы сильно деформированы, трещиноваты, имеют дефектную окраску. Значительная их часть содержит включения эпигенетического графита, а поверхности ромбододекаэдров (с шагреневым рельефом) свидетельствуют о пластической деформации алмаза. Исследуя типоморфные особенности алмазов трубок с промышленной алмазоносностью (Удачная, Сытыканская, Юбилейная, Комсомольская и др.), установлено [12, 16], что наиболее высокопродуктивными являются рудные столбы, сложенные АКБ. Для этого петрографического типа характерно повышенное содержание в них кристаллов алмаза октаэдрического габитуса в крупных классах, с одновременным снижением количества ромбододекаэдров. Менее алмазоносными считаются рудные столбы, выполненные ПК, для которых характерно увеличение количества кристаллов ромбододекаэдров, с уменьшением числа октаэдров, а также повышенная роль округлых алмазов. Образование додекаэдрических поверхностей исследователи связывают с условиями растворения при повышенных температурах. Результаты экспериментов по искусственному получению алмаза [7] свидетельствуют о том, что габитус кристалла варьирует в зависимости от температуры. По мере повышения температуры появляются куб-октаэдр-додекаэдры, что позволяет предполагать более высокое содержание крупных фенокристов оливина в ПК. Последние во всех изученных трубках характеризуются более мощными келифитовыми каймами 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. Завершающие вулканические фазы внедрения кимберлитовой магмы характеризовались высокими скоростями подъема, что могло положительно отразиться на сохранности алмазов и их соотношении в настоящее время. Однако,

такая закономерность характерна не всем диатремам. Например, в трубке Дальняя (ДААР) более алмазоносными оказались ПК. Обнаружены также различия [12] в распространении кристаллов с разным типом их внутреннего строения в кимберлитах разных фаз внедрения Накынского поля (НКП) СМАР (трубки Ботуобинская и Нюрбинская). Установлено, что среди алмазов из АКБ повышено содержание кристаллов с желтым и желто-зеленым свечением и снижено с розовым, розово-сиреневым и оранжевым, что существенно отличается от аналогичных свойств минерала из ПК. Были обнаружены различия по интенсивности образования продуктивных зародышей кристаллов алмаза из разных типов кимберлитов.

Рассматривались также [4, 12] вопросы взаимосвязи химического состава кимберлитов и алмазоносности, которые базировались на результатах химического анализа более 3 тысяч образцов кимберлитов различных структурно-петрографических разновидностей по всем изученным коренным месторождениям алмазов Якутии. Линейный корреляционный анализ содержаний алмазов и доминирующих оксидов из кимберлитов трубок Мир и Интернациональная (МБАР), Сытыканская, Юбилейная и Удачная (ДААР) надежных, устойчивых зависимостей не обнаружил, что связано вероятно с тем, что имеющиеся в распоряжении данные по алмазоносности 10-метровых разведочных интервалов включали несколько структурно-текстурных разновидностей пород. Однако, применение множественного регрессионного анализа подтвердило [4] гипотезу о наличии связи между химизмом кимберлитов разрабатываемых месторождений СП и их алмазоносностью. Имеющиеся базы данных химических анализов были разделены по уровням алмазоносности для отдельных диатрем на 50 групп, для каждой из которых были вычислены средние значения, которые затем были использованы в уравнениях множественной регрессии. В результате в каждой кимберлитовой трубке было установлено по две основные популяции (подгруппы), различающиеся по содержаниям отдельных петрогенных компонентов. Отмечено, что ПК ранних фаз внедрения, характеризующиеся повышенной магнизиальностью, титанистостью и железистостью, менее продуктивны по сравнению с кимберлитовыми брекчиями завершающих стадий формирования диатрем; чем меньше в популяциях TiO_2 , Fe_2O_3 , больше K_2O и Al_2O_3 , тем выше алмазоносность популяций.

Таким образом, на основании изучения геологического строения и вещественного состава трубок и жил, исследования алмазоносности кимберлитов, морфологии, гранулометрии и окраски алмазов проведена детализация модели пространственного размещения жильных

тел, трубок Мир, Спутник, Интернациональная и др. Установлено, что жильные тела, трубки Мир и Спутник отличаются по алмазонасности, гранулометрическому составу и качеству алмазов. Наиболее обогащены мелкими и низкосортными алмазами жильные тела и рудные столбы, отвечающие первым фазам (этапам) внедрения. Обилие мелких, окрашенных и низкосортных алмазов в жилах и трубках раннего этапа внедрения (трубка Спутник) вызвано тем, что кимберлитовый расплав при их становлении прошел достаточно длинную историю развития. Это создало неблагоприятные для сохранности алмазов термодинамические условия, что привело к появлению дефектных алмазов. Различия алмазонасности, гранулометрического состава, количества окрашенных алмазов, кристаллов с включениями графита, трещиноватых и поврежденных камней их жил, трубок Мир, Спутник, Интернациональная и др. являются индикаторами различных термодинамических условий формирования этой природной рудной системы (вариации вещественного и газового составов, перепады РТ-условий). Подводя итоги исследованиям по сопоставлению текстурно-структурных типов кимберлитовых пород сложнопостроенных трубок СП по алмазонасности, морфологическим и оптическим характеристикам алмазов, можно отметить о существовании различий в алмазонасности разных фаз внедрения кимберлитов, что обусловлено различным уровнем заложения и длительности функционирования образующих их магматических очагов, физико-химическими свойствами исходных составляющих, а также скоростью подъёма и характером продвижения кимберлитовой магмы в процессе разных этапов кимберлитообразования. Все основные разновидности кимберлитов и включения в них, обнаруженные в верхних частях диатрем, найдены и на глубине, причем не отмечено зональности в распределении ксенолитов. Интенсивность замещения последних вторичными минералами зависит от степени измененности кимберлитов, вмещающих эти ксенолиты. Отмеченная нередко повышенная степень переработки ксенолитов на глубине, по сравнению с верхними горизонтами, связана с воздействием на кимберлиты и содержащиеся в них ксенолиты высокоминерализованных вод, локализованных в пределах мощных залежей соленосных толщ во вмещающих кимберлиты СП кембрийских отложений. Сравнительное исследование крупности, морфологии, оптических свойств кристаллов и алмазонасности пород диатрем подтверждает различие между выделенными разновидностями КБ различных фаз внедрения. Особенности происхождения и извержений кимберлитовых расплавов могли влиять на преобразование первоначальной формы кристаллов алмаза, что вызвано их растворением (иногда до полного

уничтожения) и коррозией. При оценке продуктивности кимберлитовых трубок необходимо учитывать реальные соотношения в диатремах интрузивных и эксплозивных процессов кимберлитообразования, которые меняются во времени. Изложенные материалы позволяют предполагать, чем большие объёмы трубок будут сложены ПК интрузивных фаз внедрения, тем ниже будет их алмазоносность, что подтверждено результатами опробования многих диатрем на СП. Для всех разрабатываемых кимберлитовых трубок этого региона с глубиной увеличивается объём КБ, что подчеркивает их рентабельную оценку. Различная продуктивность выделенных типов кимберлитовых пород имеет большое практическое значение для выбора оптимального режима обогащения пород. Для повышения эффективности процесса обогащения отдельных разновидностей КБ следует учитывать их различия в соотношениях ксенолитов, петрофизических свойств, распределения пороодообразующих минералов, характер вторичной минерализации и насыщенности алмазами.

Библиографический список

1. Афанасьев В.П., Зинчук Н.Н. Минералогия древних россыпей алмазов восточного борта Тунгусской синеклизы // Геология и геофизика. 1987. №-1. С.90-96.
2. Афанасьев В.П., Зинчук Н.Н., Коптиль В.И. Полигенез алмазов в связи с проблемой коренных россыпей северо-востока Сибирской платформы // Доклады Академии наук. 1998.Т.361. №-3. С.366-369.
3. Афанасьев В.П., Зинчук Н.Н., Логвинова А.Н. Особенности распределения россыпных алмазов, связанных с докембрийскими источниками // Записки Российского минералогического общества. 2009. Т.138. №-2. С.1-13.
4. Афанасьев В.П., Похиленко Н.П., Логвинова А.М., Зинчук Н.Н., Ефимова Э.С., Сафьянников В.И., Красавчиков В.О., Подгорных М.М., Пругов В.П. Особенности морфологии и состава некоторых хромшпинелидов алмазоносных площадей в связи с проблемой «ложных» индикаторов кимберлитов // Геология и геофизика. 2000. Т.41. №-12. С.1729-1741.
5. Василенко В.Б., Зинчук Н.Н., Кузнецова Л.Г. Геодинамический контроль размещения кимберлитовых полей центральной и северной частей Якутской кимберлитовой провинции (петрохимический аспект) // Вестник Воронежского государственного университета. Геология. 2000. №-3.(9). С.37-55.
6. Горшков А.И., Зинчук Н.Н., Котельников Д.Д., Шлыков В.Г., Жухлистов А.П., Мохов А.В., Сивцов А.В. Новый упорядоченный смешанослойный минерал лизардит-сапонит из кимберлитов Южной Африки // Доклады РАН. 2002. Т.382. №-3. С.374-378.
7. Егоров К.Н., Зинчук Н.Н., Мишенин С.Г., Серов В.П., Секерин А.П., Галенко В.П., Денисенко Е.П., Барышев А.С., Меньшагин Ю.В., Кошкарев Д.А. Перспективы коренной и россыпной алмазоносности Юго-Западной части Сибирской платформы // Сб.: Геологические аспекты минерально-сырьевой базы Акционерной компании «АЛРОСА»: современное состояние, перспективы, решения. Дополнительные материалы по итогам региональной научно-практической конференции «Актуальные проблемы геологической отрасли АК «АЛРОСА» и научно-методическое обеспечение их решений», посвященной 35-летию ЯНИГП ЦНИГРИ АК «АЛРОСА». Мирный: МГТ. 2003. С.50-84.

8. Зинчук Н.Н. Особенности состава и распределения слюдястых образований в кимберлитовых породах Якутии // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 1991. №-7. С.58-66.
9. Зинчук Н.Н. Влияние вторичных минералов на облик и состав кимберлитовых пород // Геология и геофизика. 1998. Т.39. №-12. С.1704-1715.
10. Зинчук Н.Н. О зональности распространения коренных месторождений алмазов // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П.Н. Чирвинского. Вып.16. Пермь: ПГНУ.2013. С.209-223.
11. Зинчук Н.Н. Опыт литолого-минералогических исследований древних осадочных толщ в связи с алмазопроисковыми работами (на примере Сибирской платформы) // Вестник Воронежского государственного университета. Геология. 2014. №-1. С.13-19.
12. Зинчук Н.Н. Особенности строения и состава коры выветривания на туфо-генных образованиях в алмазоносных регионах Сибирской платформы // Бюллетень МОИП. Отдел геологический. 2015. Т.90. №-4. С.42-52.
13. Зинчук Н.Н. Об основных геолого-поисковых обстановках при прогнозировании кимберлитовых трубок // Наука и образование.2016. №-4 (84). С.7-15.
14. Зинчук Н.Н. Об особенностях и значении геолого-генетической типизации кимберлитового сырья // Геммология. Материалы 8-й геммологической конференции.-Томск: Томский НЦТИ. 2017. С.48-60.
15. Зинчук Н.Н. Особенности алмазоносности разных фаз внедрения кимберлитов // Отечественная геология. 2017. №-1. С.105-111.
16. Зинчук Н.Н. Особенности минералов слюд в кимберлитах // Вестник Воронежского университета. Геология.2018. №-2. С.29-39.
17. Зинчук Н.Н. Алмазы из кимберлитов Накынского поля Сибирской платформы // Геммология. Материалы 9-й геммологической конференции.-Томск: Томский НЦТИ. 2019. С.69-78.
18. Зинчук Н.Н. Особенности алмазоносности разных типов кимберлитов // Геммология. Материалы 9-й геммологической конференции.-Томск: Томский НЦТИ. 2019. С.78-93.
19. Зинчук Н.Н. Типоморфные свойства индикаторных минералов кимберлитов и их использование при прогнозировании месторождений алмаза на Сибирской платформе // Отечественная геология. 2021. №-2. С.41-56.
20. Зинчук Н.Н. Докембрийские источники алмазов в россыпях фанерозоя // Вестник Воронежского ун-та. Геология. 2021. №-3. С.50-61.
21. Зинчук Н.Н. Геологические исследования при поисках алмазных месторождений // Вестник Воронежского университета. Геология. 2021. №-4. С.35-52.
22. Зинчук Н.Н. Роль петролого-минералогических и геохимических исследований в оценке потенциальной алмазоносности кимберлитов // Отечественная геология.2022. №-1. С.36-47.
23. Зинчук Н.Н. Коры выветривания и их роль в формировании посткимберлитовых осадочных толщ // Руды и металлы. 2022. №-2. С.100-120.
24. Зинчук Н.Н. Кремнистые минералы в кимберлитах // Вестник Воронежского университета. Геология. 2022. №-4. С.38-52.
25. Зинчук Н.Н. Особенности петрографического изучения кимберлитовых пород // Отечественная геология. 2022. №-4. С.34-49.
26. Зинчук Н.Н. Об особенностях флюидных и гидротермальных включений в некоторых минералах кимберлитов // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П.Н. Чирвинского. Вып.26.-Пермь: ПГНУ. 2023. С.45-64.
27. Зинчук Н.Н. О геохимических особенностях разновозрастных образований алмазоперспективных территорий // Отечественная геология. 2023. №-1. С.46-69.

28. Зинчук Н.Н. Литолого-стратиграфические исследования при алмазопроиско-вых работах // Вестник СВФУ. Науки о Земле. 2023. №-1 (29). С.5-28.
29. Зинчук Н.Н. Особенности гидротермального и гипергенного изменения слю-дистых кимберлитов // Вестник Пермского университета. Геология. 2023. Т.22. №-1. С.32-50.
30. Зинчук Н.Н., Бардухинов Л.Д. О специфике изучения алмаза при прогноз-но-поисковых работах (на примере Сибирской платформы) // Руды и металлы. 2021. №-3. С.59-75.
31. Зинчук Н.Н., Борис Е.И., Яныгин Ю.Б. Особенности минерации алмаза в древних осадочных толщах (на примере верхнепалеозойских отложений Сибир-ской платформы). М.: МГТ. 2004. 172 с.
32. Зинчук Н.Н., Зинчук М.Н. О специфике термобарических факторов орудене-ния // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П.Н. Чирвинского. Вып.26. Пермь: ПГНУ.2023. С.65-86.
33. Зинчук Н.Н., Зуев В.М., Коптиль В.И., Чёрный С.Д. Стратегия ведения и ре-зультаты алмазопроисковых работ // Горный вестник. 1997. №-3. С.53-57.
34. Зинчук Н.Н., Коптиль В.И. Сравнительные особенности алмазов из корен-ных источников с высокой плотностью расположения кимберлитовых тел // Из-вестия ВУЗов. Геология и разведка. 2023. №-1 (65). С.28-42.
35. Зинчук Н.Н., Мельник Ю.М., Серенко В.П. Апокимберлитовые породы // Гео-логия и геофизика. 1987. №-10. С.66-72.
36. Котельников Д.Д., Зинчук Н.Н. Типоморфные особенности и палеогеографи-ческое значение слюдистых минералов // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 1996. №-1. С.53-61.
37. Котельников Д.Д., Зинчук Н.Н. Особенности глинистых минералов в отложе-ниях различных осадочных формаций // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 1997. №-2. С.53-63.
38. Котельников Д.Д., Зинчук Н.Н. Условия накопления и постседиментацион-ного преобразования глинистых минералов в отложениях терригенной форма-ции // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологи-ческий. 2001. Т.76. №-1. С.45-53.
39. Котельников Д.Д., Зинчук Н.Н. Кристаллохимические и структурные осо-бенности глинистых минералов в корях выветривания в зависимости от типа ис-ходных пород // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологический. 2001. Т.76. №-3. С.69-79.
40. Котельников Д.Д., Зинчук Н.Н. Об аномалии общей схемы преобразования разбухающих глинистых минералов при погружении содержащих их отложений в стратиферу // Вестник Воронежского госуниверситета. Серия геология. 2003. №-2. С.57-68.
41. Котельников Д.Д., Зинчук Н.Н., Кузьмин В.А. Морфогенетические разновид-ности каолинита в корях выветривания и осадочном чехле земной коры. Статья 1. Механизм образования каолинита в корях выветривания различных петро-химических типов пород // Известия ВУЗов. Геология и разведка. 2006. №-5. С.19-25.
42. Мацюк С.С., Зинчук Н.Н. Оптическая спектроскопия минералов верхней мантии.-М.: Недра. 2001. 428 с.
43. Савко А.Д., Шевырев Л.Т., Зинчук Н.Н. Эпохи мощного корообразования в истории Земли.-Воронеж: ВГУ. 1999. 102 с.
44. Орлов Ю.Л. Минералогия алмаза. 2-е изд. М.: Наука. 1984. 264 с.
45. Харьков А.Д., Зинчук Н.Н., Крючков А.И. Коренные месторождения алмазов Мира.-М:Недра.1998. 555 с.
46. Харьков А.Д., Зуенко В.В., Зинчук Н.Н., Крючков А.И., Уханов А.В., Богатых М.М. Петрохимия кимберлитов.-М. Недра. 1991. 304 с.

47. Хитров В.Г., Зинчук Н.Н., Котельников Д.Д. Применение кластер-анализа для выяснения закономерностей выветривания пород различного состава // Доклады АН СССР. 1987. Т.296. №-5. С.1228-1233.
48. Afanas'ev V.P., Zinchuk N.N., Griffin V.L. in el. Diamond prospects in the Southwestern plankt of the Tungusk Sineklise // *Geology of ore Deposits*. 2005. Т.47. №-1. pp.45-62.
49. Grachanov S.A., Zinchuk N.N., Sobolev N.V. The age of Predictable primary diamond sources in the Northeastern Sibirian platform // *Doklady Eart Sciences*. 2015. Т.465. №-2. pp.1297-1301.
50. Kotelnikov D.D., Zinchuk N.N. Comparative analysis of clay Mineral evolution under the Conditions of humid and arid Lithogenesis // *Russian Geology and Geophysics*. 2008. N.-10. pp.121-144.
51. Serov I.V., Garanin V.K., Zinchuk N.N., Rotman A.Ya. Mantle Sources of the kimberlite Vorcanism of the Sibirian Platform // *Petrology*. 2001. Т.9. №-6. pp.576-588.

MATERIAL ASPECTS OF KIMBERLITE ROCKS PRODUCTIVITY

N.N. Zinchuk, M.N. Zinchuk

Most of investigated kimberlite diatremes of the represent multiphase pipes. Each magmatic phase of intrusion, formed inside diatremes, is composed by kimberlites with specific petrographic and petrochemical type possessing a number of stable, weakly changing with depth typomorphic features. Carried out investigations indicated sufficient distinctions in diamondiferousness of different intrusion phases of kimberlites, which is stipulated by different level of emplacement and duration of functioning of forming them magmatic hotbeds, physical-chemical properties of initial components, as well as by velocity of ascent and character of kimberlite magma advance in the process of different kimberlite-formation stages. Kimberlite breccias of completion stages of pipes formation are most productive in comparison with porphyritic kimberlites of early intrusive penetration phases. When assessing productivity of kimberlite pipes it is necessary to consider real correlations of intrusive and explosive processes of kimberlite-formation in diatremes, which usually change in time.

Keywords: Kimberlite pipes, diamonds and diamondiferousness, intrusive and explosive processes, typomorphism of minerals.