

ВКЛЮЧЕНИЯ В АЛМАЗАХ ИЗ КИМБЕРЛИТОВОЙ ТРУБКИ БОТУОБИНСКАЯ (Накынское поле, Якутия)

С.И. Митюхин, З.В. Специус

Акционерная компания „АЛРОСА“, 678170, Мирный, ул. Ленина, 6, Россия

Приведены результаты исследований особенностей и состава минералов-включений в алмазах из тр. Ботуобинская. Исходная коллекция алмазов (91 образец), отобранная при просмотре 3000 алмазов, была представлена бесцветными и прозрачными кристаллами преимущественно октаэдрической формы размером 3—4 мм. Минералы-узники были выведены на поверхность при шлифовке алмазов и инструментально исследованы *in situ*.

Спектр выявленных минералов-включений объединяет группу силикатов и оксидов, которые были установлены в 28 кристаллах и сульфидах, которые присутствовали в 65 % кристаллов из исследованной партии алмазов. Среди силикатных минералов доминируют хромшпинелиды с содержанием Cr_2O_3 более 61,0 мас.%, далее следуют гранаты и оливины. В виде единичных включений присутствуют рутил, флогопит и санидин. Сульфиды представлены пирротином, пентландитом и моносульфидными твердыми растворами с редкими блоками и тонкими каймами халькопирита.

Анализ составов минеральных включений в алмазах тр. Ботуобинская с учетом присутствующих сульфидных фаз свидетельствует о том, что эколгитовый парагенезис составляет более 50 % от всей совокупности включений в алмазах данного кимберлитового тела. На долю ультраосновного парагенезиса приходится 45 % и около 3,5 % кристаллов принадлежит пироксенитовой ассоциации. Отмеченное высокое содержание эколгитового парагенезиса среди включений в алмазах является аномальным в общем спектре популяций алмазов кимберлитовых трубок Якутской алмазоносной провинции. Это свидетельствует о специфичном составе среды алмазообразования и, соответственно, верхней мантии в районе нового Накынского кимберлитового поля.

Алмазы, включения, сульфиды, кимберлиты, Якутия

PARAGENESIS OF INCLUSIONS IN DIAMONDS FROM THE BOTUOBINSKAYA PIPE (Nakyn field, Yakutia)

S.I. Mityukhin and Z.V. Spetsius

This study was given to specific features and compositions of mineral inclusions in diamonds from the Botuobinskaya pipe. The initial collection of diamonds (91 specimens taken of the 3000 diamonds inspected) was represented by colorless and transparent crystals, chiefly of octahedral shape, 3—4 mm in size. The imprisoned minerals were exposed to the day by polishing of diamonds and were instrumentally studied *in situ*.

The suite of revealed mineral inclusions combines a group of silicates and oxides, which were established in 28 crystals, and sulfides present in 65% of the crystals from the studied lot of diamonds. The silicate minerals are dominated by Cr-spinels with more than 61.0 wt.% Cr_2O_3 , with subordinate amounts of garnet and olivine. Rutile, phlogopite, and sanidine are present as solitary inclusions. Sulfides are represented by pyrrhotite, pentlandite, and monosulfide solid solutions with scarce blocks and thin rims of chalcopyrite.

Analysis of compositions of mineral inclusions in diamonds of the Botuobinskaya pipe, with the present sulfide phases taken into account, shows that the eclogite paragenesis makes up more than 50% of the bulk of inclusions in diamonds of this kimberlite body. The ultrabasic paragenesis makes up 45%, and about 3.5% of the crystals belong to the pyroxenite assemblage. The indicated high percentage of eclogite paragenesis among inclusions in diamonds is anomalous among the diamond populations in kimberlite pipes of the Yakutian diamond province. This suggests a specific composition of the medium of diamond formation and, correspondingly, the upper mantle in the region of the new Nakyn kimberlite field.

Diamonds, inclusions, sulfides, kimberlites, Yakutia

ВВЕДЕНИЕ

Включения в алмазах из кимберлитовых трубок всегда привлекали пристальное внимание исследователей, поскольку они содержат не только наиболее корректные и детальные сведения об условиях образования алмазов, но и закапсулированную информацию об особенностях состава среды алмазообразования, т.е. петрологических особенностях верхней мантии данного района. Кроме того, изучение состава сингенетических минеральных ассоциаций определяет технологию ведения поисковых работ с целью обнаружения новых месторождений в границах кимберлитового поля.

Первое месторождение алмазов Накынского кимберлитового поля было выявлено в 1994 г. За прошедший десятилетний период исследованию геологического строения, минералогии кимберлитов и другим особенностям вещественного состава кимберлитов Накына уделялось большое внимание, что

нашло свое отражение в ряде публикаций [1—11]. В этих работах продемонстрирована неординарность кимберлитов нового поля как по изотопным характеристикам кимберлитовых пород, которые сближают их с кимберлитами II группы [4], так и по особенностям состава минералов-спутников, в первую очередь гранатов и хромшпинелидов. Выявлены также и существенные различия в составе пород, слагающих литосферную мантию и низы коры в пределах Накынского поля, от соседних Малоботуобинского и Далдын-Алакитского полей, что свидетельствует об отличии литосферы нового поля как по набору петрографических типов пород, так и ее тектономагматической эволюции [6, 8].

Уже первые сведения по изучению внешней морфологии алмазов из кимберлитов тр. Ботуобинская показали, что они занимают промежуточное положение по спектру и соотношению морфологических групп между алмазами из кимберлитов Малоботуобинского и Далдын-Алакитского полей [1, 5, 6]. В популяции алмазов из кимберлитов Накынского поля было зафиксировано повышенное количество округлых алмазов, оболочечных алмазов или кристаллов „в рубашке“ и алмазов с кавернами, каналами травления и другими признаками природного растворения и резорбции [5, 6]. При визуальном изучении минеральных включений в алмазах из кимберлитов данного поля было отмечено также повышенное содержание среди них оранжевых гранатов и других минералов предположительно эклогитовой ассоциации, что указывало на возможность более высокой распространенности минеральных включений эклогитового состава среди алмазов данных трубок по сравнению с алмазами из других кимберлитовых полей [1, 5]. Подобные данные показали актуальность более детального исследования внутреннего строения кристаллов алмазов и особенностей их парагенетического состава, что и явилось основанием для выполнения этой работы.

Из вышесказанного достаточно очевидно необходимость и актуальность исследования качественного и количественного составов минеральных включений в алмазах из кимберлитов этих трубок. Естественно, что первое сообщение об исследовании включений в алмазах из недавно открытой тр. Ботуобинская, которая ознаменовала собой также и открытие нового кимберлитового поля, представляет несомненный интерес. Важность этих данных подчеркивается и тем, что первые публикации как по особенностям кимберлитов и мантийных ксенолитов, так и по алмазам в них свидетельствуют о специфичности нового района [5, 6, 9].

КРАТКИЙ ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ОЧЕРК РАЙОНА И ОСОБЕННОСТИ КИМБЕРЛИТОВ И АЛМАЗОВ ТРУБОК НАКЫНСКОГО ПОЛЯ

Накынское кимберлитовое поле представляет собой в целом тектонический блок в центральной части Вилюйско-Мархинской зоны площадью около 380 км², который ограничен разломами I—III порядка северо-восточного простирания, по которым внедрялись дайки траппов, предшествующие внедрению кимберлитов [1—4]. Кимберлитоконтролирующие дислокации, к которым приурочены трубки, являются разломами IV порядка, которые слабо выражены в физических полях и в объеме разрывных нарушений составляют не более 10 % [1—4].

К настоящему времени в пределах Накынского поля обнаружены две кимберлитовые трубки (Ботуобинская и Нюрбинская), имеющие цилиндрически-овальные формы, вытянутые в северо-восточном направлении, геологическая характеристика которых дана в [1, 2] а также дайкообразное тело кимберлитов, прослеженное по простиранию на 1 км. Обе трубки были сформированы в две фазы внедрения: субвулканическую (первая фаза) и вулканическую. В тр. Ботуобинская субвулканическая фаза представлена дайкообразным телом и дайками северо-восточного простирания, выполненными порфиоровыми кимберлитами, вулканическая — автолитовыми кимберлитовыми брекчиями и кимберлитовыми туфобрекчиями, формирующими соответственно диатрему и кратерную часть мульдообразной формы, залегающую с поверхности трубки до глубины 230—250 м.

Кимберлитовые трубки очень близки как по вещественному составу, так и по алмазоносности, выполнены они порфиоровыми кимберлитами и автолитовыми кимберлитовыми брекчиями с резким преобладанием последних. Трубка Ботуобинская сложена кимберлитовыми туфобрекчиями, автолитовыми кимберлитовыми брекчиями и порфиоровым кимберлитом. В тр. Нюрбинская выделены две разновидности кимберлитовых пород — автолитовая кимберлитовая брекчия и порфиоровый кимберлит. По ряду вещественно-индикационных признаков они попадают в разряд уникальных среди ранее обнаруженных в Якутской алмазоносной провинции [3]. Прежде всего, это относится к их высочайшей продуктивности, особенностям и качеству алмазов, петрографическим и минералогическим характеристикам кимберлитов, а также к составу минералов-индикаторов алмаза. Необходимо подчеркнуть, что в обеих трубках порфиоровые кимберлиты встречаются в виде отдельных блоков мощностью до 15 м и более, а также мелких ксенолитов в автолитовой кимберлитовой брекчии, что свидетельствует об их более раннем внедрении при формировании кимберлитовой диатремы. Характерной особенностью кимберлитовых пород является их сильная измененность, что выражается в отсутствии реликтов оливина,

интенсивной хлоритизации флогопита до глубины порядка 200 м и, практически, карбонатном составе основной массы верхних горизонтов.

Кимберлиты отличаются исключительно низким содержанием хромшпинелидов, пикроильменита и перовскита, они обеднены пироповыми и обогащены альмандиновыми гранатами. Последнее, скорее всего, обусловлено низким содержанием глубинных ксенолитов и высоким — метаморфических пород фундамента [5]. Соотношение минералов тяжелой фракции в сравнении с их распределением в других трубках свидетельствует о сходстве описываемых кимберлитов с кимберлитовыми породами из трубок Айхал и Ломоносовская [11].

По содержанию петрогенных элементов кимберлитовые породы обеих трубок близки между собой и резко отличаются от таковых других трубок Якутской провинции. Это низкотитанистые (менее 10 мас.% TiO_2), низкожелезистые, среднемагнезиальные и относительно высококалиевые породы. Средний химический состав кимберлитовых пород трубок Ботуобинская и Нюрбинская отличается от состава кимберлитовых пород трубок Малоботуобинского и Далдын-Алакитского районов повышенным содержанием в них глинозема и оксида калия, при небольшом количестве оксида титана. По петрохимическим особенностям кимберлитовые породы трубок Накынского поля наиболее сходны с таковыми тр. Айхал Алакит-Мархинского поля [1—4]. Возраст кимберлитовых трубок, определенный по флогопиту Rb-Sr методом, составил 366 ± 10 млн лет [4] и по флогопиту ^{40}Ar - ^{39}Ar -методом — 380 ± 12 млн лет [11].

Данные по вещественному составу кимберлитов трубок Ботуобинская и Нюрбинская показывают их отличие по целому ряду параметров от других коренных месторождений алмазов Якутской алмазоносной провинции. Во-первых, это аномально высокое (от 25 до 50 % объема основной массы) содержание лейстовидного флогопита и крайне низкое (менее 0,5 об.%) тонкодисперсной рудной вкрапленности и перовскита в основной массе кимберлитовых пород обоих тел. Во-вторых, все без исключения разновидности кимберлитовых пород изученных трубок характеризуются как крайне низким выходом тяжелой фракции в целом, так и низкой концентрацией минералов-спутников алмаза (пиропов и хромшпинелидов) при практически полном отсутствии пикроильменита [11].

Результаты микрорентгеноспектральных анализов пиропов из разновидностей кимберлитовых пород Накынского поля свидетельствуют об их относительно повышенной хромистости и в то же время о низком содержании среди них пиропов алмазной ассоциации дунит-гарцбургитового парагенезиса (2,2—4,7 % в тр. Ботуобинская и 1,2—5,4 % в тр. Нюрбинская) [7]. По данным оптико-спектроскопических исследований установлен высокий (до 13,6 % в кимберлитовой брекчии тр. Ботуобинская) процент пиропов, отвечающих по составу гранатам магнезиально-железистых эклогитов.

Некоторые авторы, указывая на необычный состав кимберлитов Накынского поля, сближают эти породы с кимберлитами II группы, которые относительно широко распространены в Южно-Африканской алмазоносной провинции [11].

Кимберлитовые породы характеризуемых трубок также резко отличаются от кимберлитовых пород известных трубок Якутии тем, что при относительно высокой калиевости имеют экстремально низкие содержания титана. По петрохимическому составу и ряду других признаков кимберлитовые породы Накынского поля несут в себе признаки кимберлитов как I, так и II групп. Это достаточно отчетливо проявлено в соотношении TiO_2 - K_2O [11]. По содержанию стронция (616—1152 г/т) они отвечают кимберлитам II группы и 1В подтипа, в то время как по содержанию рубидия (13—45 г/т) они ближе к кимберлитам первого типа. Двойственная природа кимберлитов данного поля детально обсуждена в работе В. Корниловой с соавторами и, по ее мнению, вероятно, обусловлена характером исходного протолита и его историей [9]. По изотопному составу Nd ($\epsilon = 0,26 - 0,85$) источник кимберлитов имел небольшую степень истощения, а по величине $^{147}Sm/^{144}Nd$ кимберлитов (0,122—0,125) он характеризуется как обогащенный [4]. Последнее утверждение хорошо согласуется с первичным изотопным составом стронция ($\epsilon = 29,5 - 46,9$) кимберлитов этого поля.

Алмазы обеих трубок в морфологическом отношении почти идентичны. Во всех разновидностях кимберлитовых пород обеих трубок Накынского поля установлены аномально высокие содержания алмазов. По морфологическому спектру среди них преобладают алмазы октаэдрического габитуса, причем около 95 % относится к алмазам I группы, в соответствии с классификацией Ю.Л. Орлова [5]. Среди алмазов доминируют кристаллы с грубопластинчатым и полицентрическим ростом граней. Во всех классах крупности присутствуют округлые алмазы и ромбододекаэдры в подчиненном количестве по отношению к октаэдрам и возрастанием их процентного содержания в мелких классах [1, 5]. По своему морфологическому спектру кристаллы этих трубок сходны с алмазами трубок Малоботуобинского района, однако распространение комбинационных алмазов и кубических кристаллов сближает их с алмазами из трубок Далдын-Алакитского района, а наличие округлых форм и ромбододекаэдров с популяциями алмазов северных полей провинции.

Отличительной особенностью популяции алмазов из кимберлитов Накынского поля является высокое содержание природно-нарушенных кристаллов с регенерированными поверхностями сколов, алмазов с каналами травления и другими характерными формами резорбции и природного травления [6, 8]. По количественному содержанию подобного типа кристаллов в алмазной продукции они не имеют аналогов среди других трубок Якутской кимберлитовой провинции и занимают промежуточное положение между популяциями алмазов из лампроитов Аргайла и кимберлитов Архангельской провинции (севера Русской платформы). Следует также отметить, что среди алмазов преобладают прозрачные кристаллы при небольшом количестве окрашенных индивидов, крайне редки алмазы типа борт, а также характерно низкое содержание сингенетичных включений, среди которых преобладают сульфиды и хромшпинелиды.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБРАЗЦЫ

Данная статья базируется на материалах, полученных в результате изучения особенностей и состава минералов-включений в алмазах из тр. Ботуобинская. Алмазы исследованной коллекции (91 кристалл) были отобраны для изучения включений в результате просмотра более 3000 кристаллов и представляют в целом относительно усредненную и статистически представительную партию с точки зрения распространенности минералов различного состава. Большая часть первичных алмазов исходной коллекции была представлена бесцветными и прозрачными кристаллами октаэдрической или комбинационной формы размером 3—4 мм. Все кристаллы пришлифованы до выведения включений на поверхность, после чего минеральные фазы в них исследовались *in situ*. Предварительно алмазы проверялись на наличие трещин и отсутствие связи включений с поверхностью кристаллов, т. е. установления сингенетичности содержащихся в них минералов-узников с образованием алмазов.

Исследование состава минералов осуществлялось с помощью рентгеновского микроанализатора с электронным зондом Superprobe JXA-8800R акционерной компании „АЛРОСА“ в стандартных условиях. В отдельных случаях анализ выполнялся с использованием Link ISIS-300. При этом разрешающая способность составляла 133 эВ, ускоряющее напряжение — 20 кВ, ток зонда — 10 нА, диаметр пучка 1—2 мкм. В качестве стандартов использовались сертифицированные в ОИГТМ СО РАН (г. Новосибирск) природные минералы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Соотношение силикатных и сульфидных минералов в алмазах характеризуемой трубки оценено по данным, полученным как в процессе исследования включений характеризуемой коллекции алмазов, так и в процессе морфологического изучения отдельных партий алмазов из этой трубки. Как показывают эти результаты, сульфиды в процентном отношении преобладают среди включений и составляют более половины их суммарного количества, что было отмечено еще на ранней стадии исследований при визуальном изучении алмазов [1, 5, 6]. В частности, среди исследованных алмазов данной партии сульфиды были установлены в 65 % образцов от общего количества кристаллов с включениями. Следует подчеркнуть, что высокая распространенность сульфидов в алмазах характерна для большинства кимберлитов Якутской провинции [12, 13].

Сведения по распространенности и присутствию включений силикатов, оксидов и сульфидов в кристаллах исследованной партии алмазов суммированы и приведены в табл. 1.

Включения силикатных минералов и оксидов были установлены в 28 кристаллах из общей совокупности алмазов исследованной партии. При этом, судя по составу минералов, эцлогитовый парагенезис в алмазах тр. Ботуобинская составляет 1/3 по отношению к ультраосновному парагенезису. Помимо обычных для включений в алмазах — оливина, граната, шпинели, пироксенов и рутила, обнаружены магнезиальный флогопит и в одном из образцов — стекло, которые будут охарактеризованы в отдельной публикации. Среди силикатных минералов наиболее распространены хромшпинелиды. Относительно редкий пример включения хромшпинелида, содержащего, в свою очередь, включение оливина приведен на рис. 1. Подобные взаимоотношения двух минералов указывают на их несомненное равновесие в процессе образования, что позволяет оценить температуру формирования, которая, согласно расчетам по геотермометру [14], составляет около 1350 °С. Присутствие ортопироксена в одном из образцов в ассоциации с оливином позволяет оценить давление при формировании включения и, соответственно, образовании алмаза по геобарометру [15, 16], которое составляет более 40 кбар, что отвечает условиям стабильности алмаза.

Представительные анализы основных силикатных минералов-включений в алмазах приведены в табл. 2. Как свидетельствуют приведенные данные, состав оливина отвечает типичному форстериту и аналогичен включениям этого минерала в алмазах из кимберлитов других трубок. Для него характерно умеренное содержание никеля, которое составляет 0,32 мас.% NiO, что находится в пределах зафиксиро-

Таблица 1.

**Результаты визуальной и инструментальной диагностики включений
в алмазах из тр. Ботубинская**

№ п/п	Визуальная диагностика	Включения невыведенные	Характеристика включений	Проанализированные		Парагенезис
				силикаты	сульфиды	
1	2	3	4	5	6	7
1	ChrSp?	Ol	—	—	Pn, Mss	пир.
2	ChrSp+Gt?	Ol?	—	—	Pn	y/o
3	ChrSp	—	—	Ol	—	»
4	Sf	Sf	—	—	—	—
5	ChrSp	Ol много	—	—	—	y/o
6	Sf	Срх (2 крупн.)	—	—	Po	эк.
7	Gt op+Sf	—	Крупное	Gt	—	»
8	Срх (Q)	—	В центре	Sa, Срх	—	»
9	ChrSp?	—	Группа	Sp, Gl	—	y/o
10	Sf	—	—	—	—	—
11	»	—	В центре	—	Po	эк.
12	ChrSp?	—	—	—	—	y/o?
13	Sf	—	—	—	Po	эк.
14	ChrSp	Прозр. Ol	—	Serp, (Ol)	—	y/o
15	Sf	—	Много мелких	—	—	—
16	Sf?	Прозр. мелк. Ol?	—	—	Pn	y/o
17	ChrSp	—	—	—	»	»
18	Sf	Срх? крупн.	—	—	Po	эк.
19	ChrSp?	—	3 вкл. в центре	Fl, Opх	—	пир.
20	Sf	—	—	—	—	—
21	ChrSp?	—	—	—	—	y/o?
22	Sf	—	2 вкл.	Glass	Po	эк.
23	»	—	Крупн., в центре	—	»	»
24	Алмаз?	—	Микровкл.	—	—	—
25	Срх?	—	—	—	—	эк.?
26	Ol+ChrSp	—	—	—	—	y/o?
27	ChrSp?	—	—	—	Po	эк.
28	ChrSp?	Ol?	3 крупн. вкл.	—	Mss	»
29	ChrSp	Ol+алмаз	—	Sp, Ol	—	y/o
30	Gt?+Ol?	Gt	Св.-оранжевое	Gt	—	эк.
31	ChrSp?	Много мелк. Sf	Группа вкл.	Ap	Px	»
32	ChrSp?	—	3 вкл.	—	Po	»
33	ChrSp	—	2 вкл.	Ol, Sp	—	y/o
34	ChrSp?	—	Крупное	—	—	—
35	Sf	—	—	—	Mss	эк.
36	ChrSp?	—	—	—	—	y/o?
37	ChrSp	—	—	Ol	—	y/o
38	ChrSp?	Ol?, Gt?	—	—	Po	y/o?
39	—	—	—	—	Mss	эк.
40	—	—	—	—	Pn, Mss	y/o
41	—	Группа мелк.+Sf	—	—	Mss	пир.
42	—	—	Трециноватое	—	—	—
43	ChrSp	—	2 в центре	Sp	Pn	y/o
44	ChrSp?+Gt	Алмаз, Срх	3 кр.Sg?+Gt	Fl, Ru, Gl	—	эк.
45	Sf	Ol, отороч. Sf	—	—	—	y/o
46	»	—	—	—	Mss, Po	эк.

1	2	3	4	5	6	7
47	ChrSp?	Прозр. Ol?+Sf	—	—	—	y/o?
48	ChrSp	—	3 вкл.	Sp	—	y/o
49	ChrSp?	Ol+Sf+ChrSp?	—	—	—	y/o?
50	ChrSp	—	Группа вкл.	Serp (Ol)	Pn	y/o
51	Sf?	—	2 вкл.	Q	Po	эк.
52	ChrSp?	—	1 центр+2 пер.	—	—	y/o?
53	—	—	Серый кристалл	—	—	—
54	Sf	Крупн. Срх?+Gt?	Срх в центре	—	Po	эк.
55	ChrSp?	—	—	—	—	y/o?
56	»	Ol крупн.	—	—	Pn	y/o
57	Sf	—	Крупное	—	Po	эк.
58	Sf?	—	—	—	—	эк.?
59	ChrSp	Ol, алмаз?	—	Ol	Mss	y/o
60	Sf	—	Мелкие в центре	Fsp, Срх	—	эк.
61	ChrSp	—	Крупное	—	Po, Chp	y/o
62	ChrSp?	Ol	3 вкл.	—	Chp	y/o?
63	Sf?	—	—	—	—	эк.?
64	ChrSp	Ol	Мелкие в центре	Ol	—	y/o
65	Sf	—	—	—	Po	эк.
66	»	Срх?	3 вкл.	—	»	»
67	»	—	—	—	»	»
68	—	—	—	—	»	»
69	ChrSp	Ol+Gr крупн.	Крупные	—	Pn, Mss	y/o
70	Sf	Ol	Группа мелких	—	Po	эк.
71	Ol?	Неск. крупных	В центре	—	—	y/o?
72	Sf	Ol	Группа	—	Po	эк.
73	ChrSp?	Ol	1 крупное	—	—	y/o?
74	Sf	Срх	Несколько	—	Po	эк.
75	—	Срх?	Много	—	—	эк.?
76	Ol?	Ol, 1 зерно	—	Ol	—	y/o
77	ChrSp	—	—	Ol	—	»
78	Sf	Мелк. Sf+Gt?	Группа мелких	—	Po	эк.
79	»	Срх?	—	—	»	»
80	»	—	Мелкие (периф.)	—	»	»
81	ChrSp	—	2 вкл.	Gr, Sp	Mss	y/o
82	—	—	—	—	Pn	»
83	—	Ol в глубине	—	—	»	»
84	—	—	—	Q	—	эк.
85	Sf	—	Мелкие	Срх	—	эк.
86	»	Ol крупн. в центре	—	»	—	»
87	»	Мелк. пр.+Sf+Gt?	—	—	Po	»
88	ChrSp	—	Мелк. прозр.	Ol	Pn	y/o
89	»	—	Крупное	Gr, Sp	—	»
90	—	Срх?	—	Срх	—	эк.
91	Sf	—	—	—	Po	»

Примечание эк. — эклогитовый, y/o — перидотитовый, пир. — пироксенитовый парагенезисы. Po — пирротин, Pn — пентландит, Mss — моносulfидный твердый раствор, ChrSp — хромшпинелид, Gt — гранат, Chp — шпинель, Px — пироксен, Gl — стекло, Fl — флогопит, Serp — серпентин, Fsp — фельдшпатоид, Sa — санидин, Ap — пироп-альмандин, Sf — сфалерит, Q — кварц, Sp — шпинель, Орх — ортопироксен, Gt ор — гранат оранжевый.

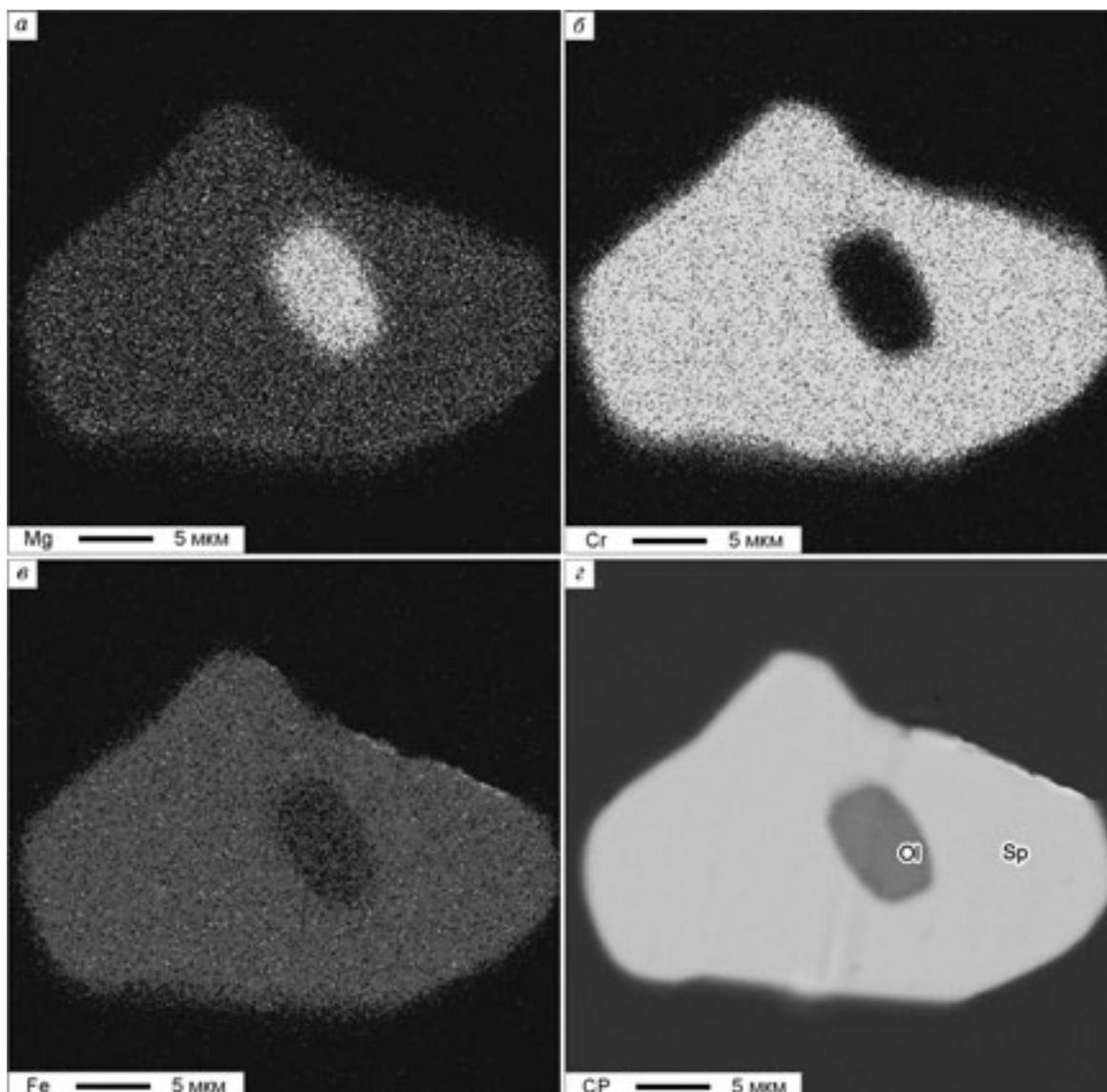


Рис. 1. Пример силикатного включения в алмазах из кимберлитовой тр. Ботуобинская.

Включение хромистой шпинели, содержащее, в свою очередь, включение оливина. Обр. Б-29: а, б, в, з — соответственно в лучах Mg, Cr, Fe и в обратнорассеянных электронах (СР).

рованных содержаний этого элемента во включениях оливинов в алмазах из кимберлитовых трубок Якутии. В одном из алмазов (обр. Б-76) зафиксировано небольшое увеличение содержания никеля от центра к краю зерна оливина соответственно 0,25 и 0,39 мас.% NiO, что коррелируется с возрастанием количества железа от 7,15 до 7,50 мас.% FeO. Хромшпинелиды характеризуются повышенным содержанием хромового минала, причем в отдельных случаях содержание Cr_2O_3 составляет до 66 мас.%, что характерно также и для шпинелидов из концентрата кимберлитов этой трубки [7]. Явной зональности в данном минерале не отмечается, хотя в отдельных включениях к краю зерен фиксируется небольшое увеличение (на 0,2 мас.%) содержаний Ti, Mn и Fe. В составе ортопироксена присутствует существенная примесь алюминия (см. табл. 2), что нехарактерно для включений данного минерала и указывает на умеренные давления при образовании алмазов. Следует подчеркнуть, что проанализированный ортопироксен имеет исключительно высокое содержание алюминия — 3,19 мас.% Al_2O_3 . Подобные высокие содержания оксида алюминия не были зафиксированы ранее среди включений этого минерала в алмазах и характерны для ортопироксена из шпинелевых перидотитов и ортопироксенитов [17]. Согласно геобарометрам [15, 16], при подобном составе минерала давление при формировании гранатсодержащей минеральной ассоциации соответствует уровню около 45 кбар. Приведенный анализ граната из вклю-

Таблица 2. Представительные составы (мас.%) включений силикатных и оксидных минералов в алмазах из кимберлитовой тр. Ботуобинская

Оксид	Б-33, ОI	Б-19, Орх	Б-33, Sp	Б-30, Gt	Б-8, Срх	Б-44, Ru
SiO ₂	41,42	50,47	0,33	39,83	56,07	0,37
TiO ₂	0,11	0,26	0,04	0,45	0,43	94,98
Al ₂ O ₃	0,23	3,19	2,14	23,94	11,42	0,26
Cr ₂ O ₃	0,14	0,44	66,63	0,12	0,51	0,25
MnO	0,11	0,04	0,87	0,36	0,21	0,03
FeO	6,85	12,72	18,61	16,67	5,37	1,04
MgO	51,15	31,91	9,66	12,26	7,11	Не обн.
CaO	0,03	0,58	0,16	7,89	12,54	»
Na ₂ O	0,0	0,0	0,0	0,20	6,20	»
Сумма	100,04	99,61	98,44	101,72	99,86	99,44
Nb ₂ O ₅	—	—	—	—	—	2,51

Примечание. Анализы минералов (среднее из 2) выполнены в АК „АЛРОСА“, г. Мирный. ОI — оливин, Орх — ортопироксен, Sp — шпинель, Gt — гранат, Срх — клинопироксен, Ru — рутил.

чения в алмазе октаэдрического габитуса (см. табл. 2, обр. Б-30) по своему составу отвечает типичному пироп-альмандину из эклогитов. Для него характерны высокая железистость и умеренная магнизиальность. Помимо основных компонентов гранат содержит существенную примесь оксида титана и натрия (см. табл. 2).

Клинопироксен эклогитового состава зафиксирован в пяти октаэдрических кристаллах, причем в одном случае в ассоциации с фельдшпатоидом, который по составу отвечает сангидину. По составу клинопироксены соответствуют типичным омфацитам из биминеральных эклогитов магнизиального ряда как по содержанию Na₂O и Al₂O₃, так и по содержанию Fe и Mg, или, в некоторых случаях (высокая примесь жадеитового компонента), возможно, омфациту Ку-эклогитов [17]. Максимальное содержание Na₂O в одном из включений (обр. Б-90) составило 6,87 мас.%. В одном из образцов присутствует неоднородный клинопироксен, отличительной особенностью которого является наличие небольшой зоны изменения со своеобразной структурой (рис. 2). Подобная структура обычно отмечается при замещении и преобразовании первичных пироксенов в ксенолитах эклогитов в процессе их частичного плавления [17, 18]. При этом аналогично с изменением состава минералов эклогитов в процессе их частичного плавления из тр. Удачная, в данном случае также наблюдается замещение первичного высоконатриевого омфацита вторичным клинопироксеном с более низким содержанием оксида натрия и глинозема (см. точки 1 и 2 на рис. 2 соответственно 6,20 и 2,58 мас.% Na₂O и 11,42 и 9,03 мас.% Al₂O₃). Интересно, что содержание калия в обоих случаях одинаковое и составляет 0,03 мас.% K₂O. У нас не существует достоверных свидетельств — происходил процесс частичного подплавления и изменения состава исходного пироксена до захвата его растущим кристаллом алмаза или после, хотя трещин вокруг включения не зафиксировано. Однако поскольку зона развития вторичного клинопироксена и замещения первичного омфацита имеет локальный характер, то не исключено, что проникновение метасоматизирующих флюидов осуществлялось через небольшую трещину в кристалле, которая не фиксируется даже при исследовании под сканирующим микроскопом.

Рутилы установлены в двух кристаллах, один из них в ассоциации с флогопитом. Проанализированный рутил содержит, помимо основных компонентов, существенную примесь ниобия (2,5 мас.% Nb₂O₅) и гафния, что объясняет низкую сумму оксидов (см. табл. 2). Следует подчеркнуть, что повышенные содержания ниобия чрезвычайно нехарактерны и редко наблюдаются в рутилах из эклогитов или других пород. Столь высокие примеси ниобия не были ранее зафиксированы ни среди рутилов из включений в алмазах, ни среди рутилов из ксенолитов эклогитов или пироксенитов, ни тем более в рутилах из эклогитов метаморфических комплексов [17, 19—21].

Включения сульфидов. Как отмечено выше, в ряде исследованных алмазов были выведены на поверхность для последующих микронзондовых определений только включения сульфидов, которые по распространенности в отдельных кристаллах данной партии образцов преобладают над силикатно-оксидными минералами. Типичное включение сульфидов, представленное моносulfидным твердым раствором (Mss), приведено на рис. 3. Все выведенные на поверхность (препарированные) сульфиды были проанализированы, составы отдельных фаз приведены в табл. 3. В большинстве случаев они пред-

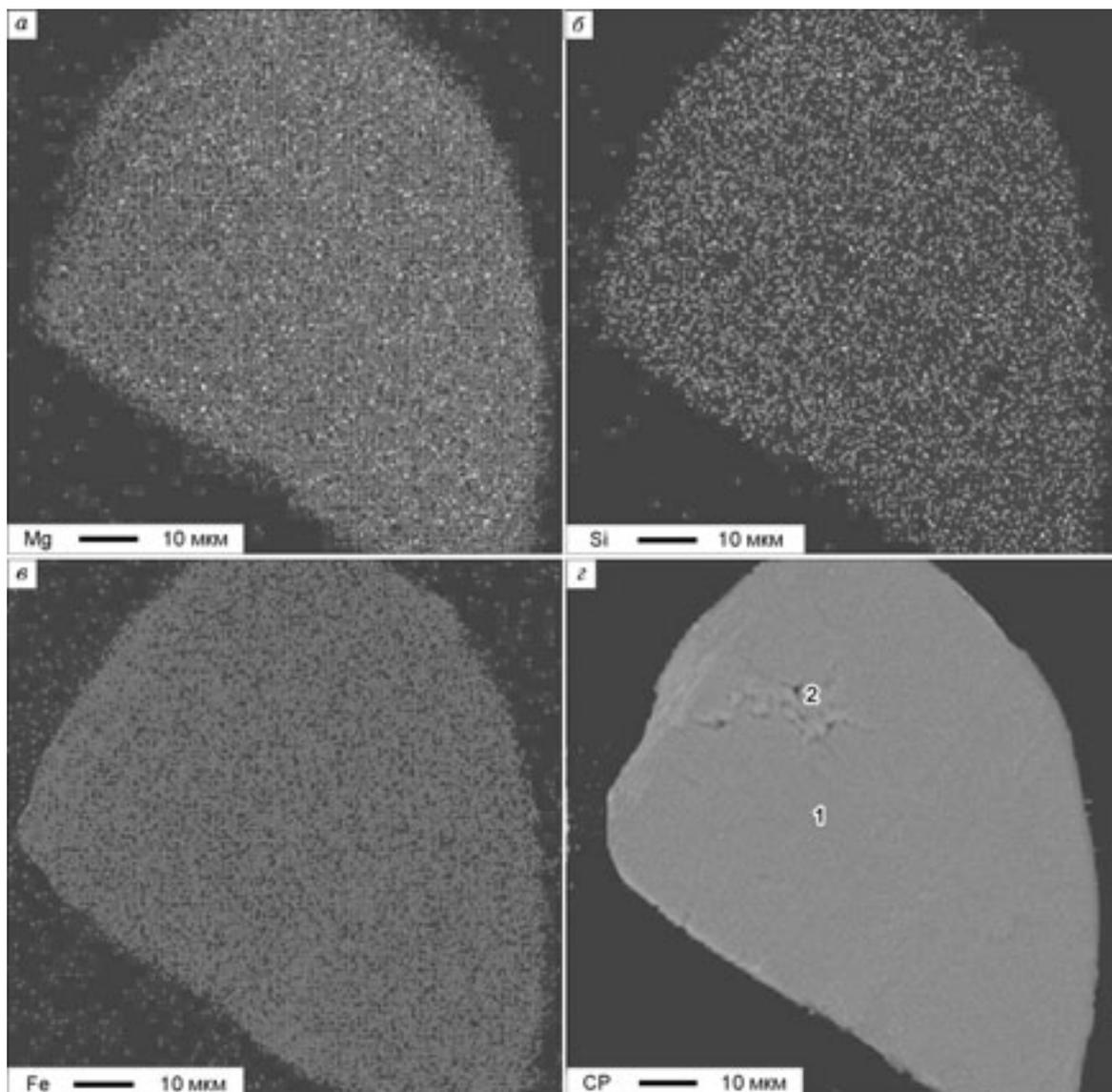


Рис. 2. Включение клинопироксена в алмазе из тр. Ботуобинская.

Видна зона изменения и подплавления первичного омфацита. Обр. Б-8: *а, б, в, г* — соответственно в лучах Mg, Si, Fe и в обратнорассеянных электронах. 1, 2 — пояснения в тексте.

ставлены Mss, пирротином и пентландитом с редкими блоками и тонкими каймами халькопирита. Для пирротина характерно постоянное присутствие никеля, содержание которого обычно выше 2 мас.%, а также меди (от 0,5 до 1,8 мас.%) и кобальта (0,2—0,4 мас.%). Пентландит во всех случаях содержит более 0,5 мас.% кобальта и имеет незначительную примесь меди. Моносulfидные твердые растворы характеризуются существенными колебаниями в содержании большинства основных элементов, причем наиболее широко варьируют содержания Ni, Co и Cu. При этом содержание никеля изменяется более чем в 2 раза (3,66 — 15,87 мас.%), кобальта от 0,03 до 0,43 мас.% и меди от 1,1 до 5,4 мас.%. Необходимо отметить, что существенные вариации в содержании Ni, Co и Cu установлены не только между отдельными образцами (см. табл. 3), но и в пределах единичных включений, что иллюстрируется распределением никеля и кобальта в одном из образцов (см. рис. 3, табл. 3). Как показывают результаты микрозондового анализа, большая часть sulfидных образований представлена пирротином или моносulfидными твердыми растворами с невысокими содержаниями никеля. Однофазные пентландиты зафиксированы только в двух кристаллах алмазов, где они ассоциируют с хромшпинелидами. Как показывают соответствующие пересчеты соотношений различных sulfидных фаз индивидуальных включений с учетом их химического состава, с целью установления исходных составов первичных

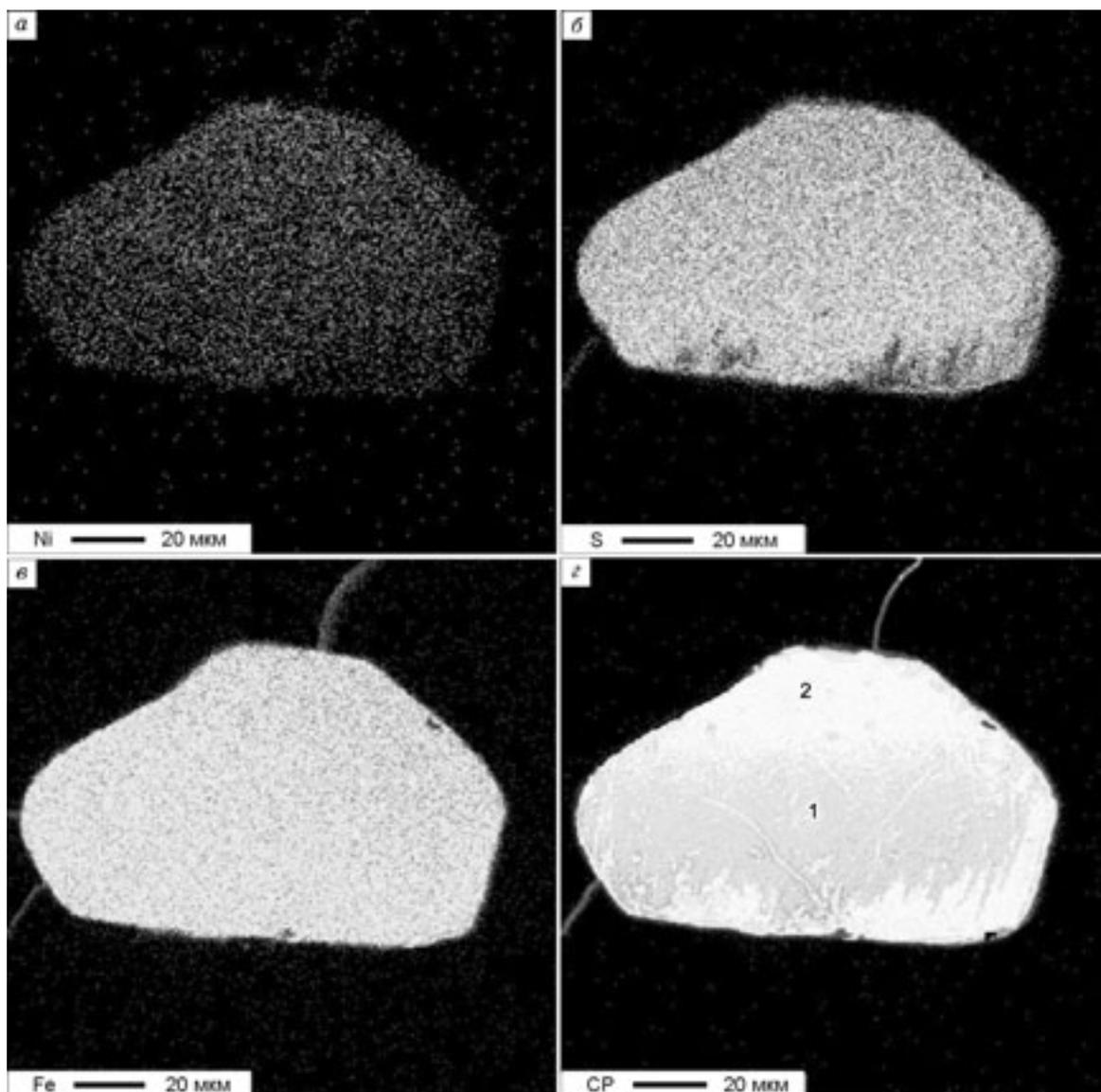


Рис. 3. Сульфидное включение в алмазе из кимберлитовой тр. Ботуобинская, представленное моносульфидным твердым раствором.

Обр. Б-28: *а, б, в, г* — соответственно в лучах Ni, S, Fe и в обратнорассеянных электронах. Точки 1, 2 соответствуют номерам анализов в табл. 3.

сульфидных расплавов, большинство их характеризуется низким содержанием никеля (менее 10 мас.%) и, следовательно, они представляют собой сульфидные образования, соответствующие по их первичному составу производным эклогитовой ассоциации.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Соотношение алмазов с включениями ультраосновного и основного парагенезисов в алмазах исследованной коллекции из тр. Ботуобинская, если судить только на основании распространенности силикатных, оксидных и рудных минералов, составляет почти 3:1. Эти данные указывают на гораздо более высокое содержание включений эклогитового типа в популяции алмазов данной трубки и на повышенную роль эклогитового субстрата в качестве алмазообразующей среды в данном районе. Столь высокое количество алмазов, имеющее эклогитовый тип включений, не отмечалось ранее среди каких-либо кимберлитовых трубок на территории Якутской провинции, даже учитывая непроверенные данные визуального наблюдения о повышенной роли эклогитового парагенезиса в некоторых трубках северных

Таблица 3. Представительные составы (мас.%) сульфидных минералов, присутствующих в виде включений в алмазах из кимберлитовой тр. Ботуобинская

Образец	S	Fe	Ni	Cu	Co	Сумма	Фаза
Б-18	34,52	59,75	2,72	0,76	0,32	98,07	Po
Б-38	37,41	59,23	2,75	0,65	0,28	100,32	»
Б-11	37,36	58,44	2,48	1,61	0,33	100,22	»
Б-16	36,47	32,23	27,92	0,99	0,56	98,17	Pn
Б-43	35,45	37,63	21,46	3,64	0,47	98,65	»
Б-28-1	37,41	56,42	4,47	1,82	0,34	100,46	Mss
Б-28-2	37,19	56,1	4,24	3,32	0,39	101,24	»
Б-6	37,89	54,93	3,66	2,09	0,37	98,94	»
Б-34	37,03	55,59	6,51	1,09	0,43	100,65	»
Б-35	35,23	49,49	7,83	5,4	0,42	98,37	»
Б-39	38,32	53,8	4,18	2,65	0,4	99,35	»
Б-59	38,14	44,13	15,87	1,11	<0,03	99,28	

полей и Прианабарья. Однако, если оценивать парагенетическую принадлежность алмазов, базируясь на присутствии включений не только силикатно-оксидных минералов, но также и исходя из распространенности, соотношения и состава сульфидных фаз в них, то количество алмазов с включениями эклогитового парагенезиса составит существенно более высокий вклад в формирование всей исследованной совокупности.

Как было показано в работах [12, 13], пересчет содержания отдельных сульфидных фаз на исходный сульфидный расплав позволяет разделять сульфидные включения в алмазах на ассоциации ультраосновного и эклогитового парагенезисов, базируясь на содержании в них никеля. Результаты микронзондовых анализов свидетельствуют, что среди сульфидных выделений в алмазах тр. Ботуобинская преобладают как отдельные сульфидные фазы, которые представлены в первую очередь пирротинном или низконикелевым моносульфидным твердым раствором и соответствуют эклогитовой ассоциации, так и многофазные образования сульфидов, представленные ассоциацией $Mss \pm$ пирротин \pm пентландит с небольшой примесью халькопирита (см. табл. 3). Соответствующие результаты пересчетов, проведенные на основании соотношения сульфидных фаз и их химического состава, показали, что в случае присутствия в кристаллах многофазных сульфидных выделений, после приведения их составов к исходному сульфидному расплаву, в большинстве исследованных алмазов обнаруживается их принадлежность к эклогитовой ассоциации. По суммированным результатам изучения состава силикатов, оксидов и сульфидов, ассоциации эклогитового парагенезиса включений в алмазах составили 52 % от общего количества макровключений, т. е. они являются преобладающими. Следует отметить, что в трех образцах были установлены сульфиды с содержанием никеля 12—15 %, которые могут быть соотнесены с переходными пироксенитовым или вебстеритовым типами парагенезиса [12].

Анализ включений в алмазах тр. Ботуобинская с учетом присутствующих сульфидных фаз в кристаллах свидетельствует о том, что эклогитовый парагенезис составляет не менее 50 % от всей совокупности включений в алмазах этой трубки. На долю ультраосновного парагенезиса приходится 45 % и более 3 % кристаллов содержат включения, которые принадлежат пироксенитовой ассоциации. Подобное высокое содержание эклогитового парагенезиса среди включений в алмазах не отмечалось ранее среди популяций алмазов какой-либо из кимберлитовых трубок Якутской провинции. Естественно, что эти результаты будут детализированы при последующих исследованиях, однако уже сейчас можно утверждать о необычности парагенетического состава алмазов в кимберлитах тр. Ботуобинская и, вероятно, всего Накынского поля.

Полученные данные свидетельствуют о специфичном составе среды алмазообразования и, соответственно, составе литосферной мантии в районе нового Накынского кимберлитового поля. По-видимому, этот факт объясняет и высокую алмазоносность кимберлитов обеих трубок, которая в данном случае обеспечивается захватом мантийных ксенолитов, представленных в первую очередь породами эклогитового состава. Мы не можем утверждать на все сто процентов — является ли это результатом селективного захвата или следствием аномального состава мантии в данном районе. Однако предварительные результаты, полученные в процессе изучения ксенолитов с алмазами из тр. Нюрбинская, свидетельствуют о повышенной распространенности алмазоносных ксенолитов эклогитового или пирок-

сенитового состава в кимберлитах этой трубки. Это позволяет утверждать и считать более вероятной причиной преобладания эклогитового типа парагенезиса среди включений в алмазах — повышенную распространенность эклогитового субстрата в составе литосферной мантии под Накыньским кимберлитовым полем. Имеются также такие косвенные признаки, как повышенное содержание округлых растворенных форм алмазов и кристаллов с каналами травления и другими признаками коррозии, что свидетельствует о повышенной роли процессов метасоматоза и частичного плавления в образовании алмазов [17]. Эти процессы, по-видимому, не только обусловили распространенность отдельных типов кристаллов и специфический облик популяции алмазов, но и, вероятно, обеспечили поступление достаточного количества углерода благодаря интенсивному проникновению флюидных компонентов. Участие метасоматических процессов и сопровождающих их флюидных компонентов в формировании алмазов подчеркивается как проявлением зональности в гранатах алмазосодержащих ксенолитов из этих трубок, так и постоянным присутствием хлоритизированного флогопита в виде кайм вокруг алмазов в ксенолитах из обеих трубок.

В работах Н.В. Соболева с соавторами [22, 23], основанной на данных изучения включений в крупных алмазах, указывается на резкое повышение роли эклогитового парагенезиса среди крупных алмазов из трубок Мир, Удачная и Айхал, а также на возрастание доли алмазов с низким содержанием азота. Этот факт свидетельствует о возможности находок крупных кристаллов в алмазной продукции из трубок Нюрбинского поля, а также о вероятности повышенной распространенности среди них алмазов с пониженным содержанием азота и безазотных кристаллов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Суммируя полученные результаты, можно констатировать, что включения в алмазах из тр. Ботуобинская представлены силикатами, оксидами и сульфидами, причем последние преобладают. Судя по соотношению силикатных и оксидных минералов-включений, а также по составу сульфидов, позволяющих на основании их состава и соотношения фаз реконструировать исходный состав сульфидных расплавов, эклогитовый парагенезис включений составляет более половины всех проанализированных кристаллов в тр. Ботуобинская. Полученные результаты указывают на отличие фазового состава минеральных включений в кристаллах данной трубки от детально исследованных ранее включений в алмазах из кимберлитовых трубок Малоботуобинского и Далдын-Алакитского полей и, соответственно, среды их алмазообразования, явившейся источником алмазов в кимберлитах Накыньского поля и подтверждают вывод о специфичном составе литосферной мантии данного района [6—9].

ЛИТЕРАТУРА

1. **Коптиль В.И., Банзерук В.И., Липашова А.Н.** Сравнительная минералогическая характеристика алмазов кимберлитовых трубок Ботуобинская и Нюрбинская (Накыньское поле) // Геология, закономерности размещения, методы прогнозирования и поисков месторождений алмазов. Мирный, 1998, с. 183—184.
2. **Томшин М.Д., Фомин А.С., Корнилова В.П. и др.** Особенности магматических образований Накыньского кимберлитового поля Якутской провинции // Геология и геофизика, 1998, т. 39, № 12, с. 1693—1704.
3. **Черный С.Д., Фомин А.С., Яныгин Ю.Т., Колесников Г.В.** Геологическое строение и вещественный состав кимберлитовых трубок Накыньского поля Якутской провинции // Геология, закономерности размещения, методы прогнозирования и поисков месторождений алмазов. Мирный, 1998, с. 157—159.
4. **Агашев А.М., Похиленко Н.П., Толстов А.В. и др.** Новые данные о возрасте кимберлитов Якутской алмазонасной провинции // Докл. РАН, 2004, т. 399, с. 95—99.
5. **Cherny S.D., Fomin A.S., Yanygin Ju.T. et al.** Geology and composition of the Nakyn field kimberlite pipes and diamond properties (Yakutia) // Extended Abstracts of the 7th International Kimberlite Conference, Cape Town, 1998, p. 147—148.
6. **Специс З.В., Серенко В.П.** Литосфера Среднемархинского кимберлитового района // Геология и тектоника платформ и орогенных областей северо-востока Азии (Тез. докл., т. 2). Якутск, ЯНЦ СО РАН, 1999, с. 104—108.
7. **Похиленко Н.П., Соболев Н.В., Черный С.Д. и др.** Пиропы и хромиты из кимберлитов Накыньского поля (Якутия) и района Снэп-Лэйк (провинция Слейв, Канада): свидетельства аномального строения литосферы // Докл. РАН, 2000, т. 372, № 3, с. 356—360.
8. **Spetsius Z.V., Serenko V.P., Mituxin S.I.** The lithosphere of the Nakynsky kimberlite field, Yakutia // Abstracts 31th IGC. Brazilia, Rio de Janeiro, 2000.

9. **Корнилова В.П., Фомин А.С., Зайцев А.И.** Новый тип алмазоносных кимберлитовых пород на Сибирской платформе // Региональная геология и металлогения, 2000, № 13—14, с. 105—117.
10. **Специус З.В., Митюхин С.И., Иванов А.С.** Первая находка ксенолита с алмазом в кимберлите трубки Ботуобинская (Накынское поле, Якутия) // Докл. РАН, 2003, т. 390, № 5, с. 1—4.
11. **Специус З.В., Серенко В.П.** Глубинные ксенолиты из кимберлитов Накынского поля // Геологические аспекты минерально-сырьевой базы акционерной компании „АЛРОСА“. Мирный, 2003, с. 191—196.
12. **Ефимова Э.С., Соболев Н.В., Поспелова Л.И.** Включения сульфидов в алмазах и особенности их парагенезиса // Зап. ВМО, 1983, ч. 112, вып. 3, с. 300—310.
13. **Буланова Г.П., Специус З.В., Лескова Н.В.** Сульфиды в алмазах и ксенолитах из кимберлитовых трубок Якутии. Новосибирск, Наука, 1990, 120 с.
14. **Ballhaus C., Berry R.F., and Green D.H.** High pressure experimental calibration of the olivine-orthopyroxene-spinel oxygen geobarometer: implications for the oxidation state of the upper mantle // Contr. Miner. Petrol., 1991, v. 107, p. 27—40.
15. **Witt-Eickschen G. and Seck H.A.** Solubility of Ca and Al in orthopyroxene from spinel peridotite: an improved version of an empirical geothermometer // Contr. Miner. Petrol., 1991, v. 106, p. 431—439.
16. **Nickel K.G., Green D.H.** Empirical geothermobarometry for garnet peridotites and implications for the nature of the lithosphere, kimberlites and diamonds // Earth Planet. Sci. Lett., 1985, v. 73, p. 158—170.
17. **Специус З.В., Серенко В.П.** Состав континентальной верхней мантии и низов коры под Сибирской платформой. М., Наука, 1990, 272 с.
18. **Spetsius Z.V. and Taylor L.A.** Partial melting in mantle eclogite xenoliths: connection with diamond paragenesis // Intern. Geol. Rev., 2002, v. 44, p. 973—987.
19. **Специус З.В., Сафронов А.Ф.** Некоторые особенности состава рутила в эклогитовых ассоциациях и в парагенезисе с алмазом // Зап. ВМО, 1986, ч. 115, вып. 6, с. 699—705.
20. **Zack T., Kronz A., Foley S.F., Rivers T.** Trace element abundances in rutiles from eclogites and associated garnet mica schists // Chemical Geology, 2002, v. 184, p. 97—122.
21. **Fipke C.E., Gurney J.J., Moor R.O.** Diamond exploration techniques emphasizing indicator mineral geochemistry and Canadian examples, Canada // Geological Survey of Canada, 1995.
22. **Соболев Н.В., Ефимова Э.С., Логвинова А.М. и др.** Распространенность и состав минеральных включений в крупных алмазах Якутии // Докл. РАН, 2001, т. 376, № 3, с. 382—386.
23. **Sobolev N.V., Kaminsky F.V., Griffin W.L. et al.** Mineral inclusions in diamonds from the Sputnik kimberlite pipe, Yakutia // Lithos, 1997, v. 39, p. 135—157.

*Поступила в редакцию
24 декабря 2004 г.*