

ОСОБЕННОСТИ ГРАНАТА И КЛИНОПИРОКСЕНА В АЛМАЗОСОДЕРЖАЩИХ ЭКЛОГИТАХ ИЗ КИМБЕРЛИТОВОЙ ТРУБКИ УДАЧНАЯ, ЯКУТИЯ: СВИДЕТЕЛЬСТВО МЕТАСОМАТОЗА

В статье обсуждается минералогия ксенолитов алмазоносных эклогитов с признаками метасоматоза из кимберлитовой трубки Удачная. При этом рассмотрены особенности содержащихся в них алмазов, составы первичных гранатов и омфацитов, а также изменения структурного и видового составов исходных гранатов и клинопироксенов в процессе метасоматоза. В результате уточнения структуры пиропов предложен двухфазный состав граната, представленный преимущественно пиропом сложного состава, ассоциирующего с Ca-пиропом. Во всех образцах первичный омфацит замещается по периферии зёрен другой разновидностью клинопироксена, обеднённого содержаниями Na_2O , который характерен для продуктов частичного плавления. По результатам геотермометрии установлено, что данные эклогиты были сформированы в интервале температур 1000–1200 °С.

На основании морфологии алмазов, данных по содержанию общего азота в алмазах и его агрегации постулируется многостадийность формирования алмазов в эклогитах и наиболее вероятный рост более поздних генераций алмазов под воздействием метасоматизирующих мантийных флюидов, содержащих в своём составе углерод в той или иной форме. Предполагается, что отдельные стадии алмазообразования, вероятно, были разорваны во времени на несколько сотен миллионов лет.

Ключевые слова: кимберлиты, ксенолиты эклогитов, алмазы, гранаты, пироксены, метасоматоз.

Трубка Удачная – это уникальное промышленное месторождение Якутии с высоким содержанием и качеством алмазного сырья. В кимберлитах этой трубки широко распространены ксенолиты мантийных пород, в том числе эклогиты, но только редкие образцы последних содержат алмазы. В то же время следует отметить, что в этой трубке установлено наиболее широкое разнообразие мантийных ксенолитов с алмазами как перидотитовых, так и эклогитовых ассоциаций по сравнению с другими кимберлитовыми трубками Якутской алмазоносной провинции [1-6, 9, 10, 16, 17]. Характерные особенности расположения алмазов в ксенолитах эклогитов из трубки Удачная, наличие алмазов с различной степенью агрегации азота в отдельных образцах и ряд других фактов свидетельствуют в пользу многостадийного роста алмазов и их более позднего образования по сравнению с минералами ксенолитов, наиболее вероятно, в процессе мантийного метасоматоза из флюида или флюид-расплава, что ранее было продемонстрировано в публикациях [7, 11, 18, 19, 23, 24]. Конкретное и яркое проявление метасоматоза в исследованных образцах – изменение химического состава первичных зёрен гранатов и клинопироксенов, расположенных в различ-



Специус Здислав Витольдович

доктор геолого-минералогических наук
главный научный сотрудник
SpetsiusZV@gmail.com

Лисковская Людмила Валентиновна

кандидат геолого-минералогических наук
старший научный сотрудник
LiskovayaLV@alrosa.ru

Иванов Александр Сергеевич

кандидат геолого-минералогических наук
ведущий научный сотрудник
IvanovAS@alrosa.ru

Богущ Ирина Николаевна

кандидат геолого-минералогических наук
ведущий научный сотрудник
BogushIN@alrosa.ru

Научно-исследовательское геологическое
предприятие АК «АЛРОСА» (ПАО),
г. Мирный



ных участках ксенолитов, которые, как правило, подвержены поздним преобразованиям с замещением первичных фаз и сохранением только реликтов исходных гранатов и омфацитов.

Цель работы – выявление структурных признаков метасоматической проработки минералов алмазосодержащих ксенолитов мантийных эклогитов из кимберлитов трубки Удачная, выяснение изменения их видового и химического составов, а также кристаллической структуры и компонентного состава породообразующих гранатов и клинопироксенов в результате воздействия метасоматических процессов.

Для проведения исследований были использованы ксенолиты биминеральных эклогитов (образцы Уе-32, Уж-2, Уж-11) с визуально видимыми кристаллами алмаза, которые были отобраны из текущей добычи при обогащении кимберлитов на промышленной фабрике 12. Исходные ксенолиты были представлены крупнозернистыми породами, состоящими преимущественно из граната и

клинопироксена (рис. 1). Из них путём дробления породы были извлечены алмазы. В петрографическом отношении все три образца представлены биминеральными эклогитами с примерно равными соотношениями граната и клинопироксена. Акцессорные минералы представлены редкими сульфидами, в образце Уж-11 отмечены единичные лейсты флогопита. Для всех изученных образцов характерно проявление интенсивных метасоматических преобразований, что отражается в частичном изменении состава гранатов по периферии зёрен и развитии келифитовых кайм на гранатах, интенсивном замещении и аморфизации клинопироксена с сохранением только отдельных его реликтов, а также в повсеместном присутствии продуктов частичного плавления, составляющих от 10 до 20 % модального состава образцов, аналогично охарактеризованным в работах [7, 15, 21, 23]. Реликты зёрен исходного клинопироксена (омфацита) составляют обычно менее 50 %, характерны его замещение вторич-

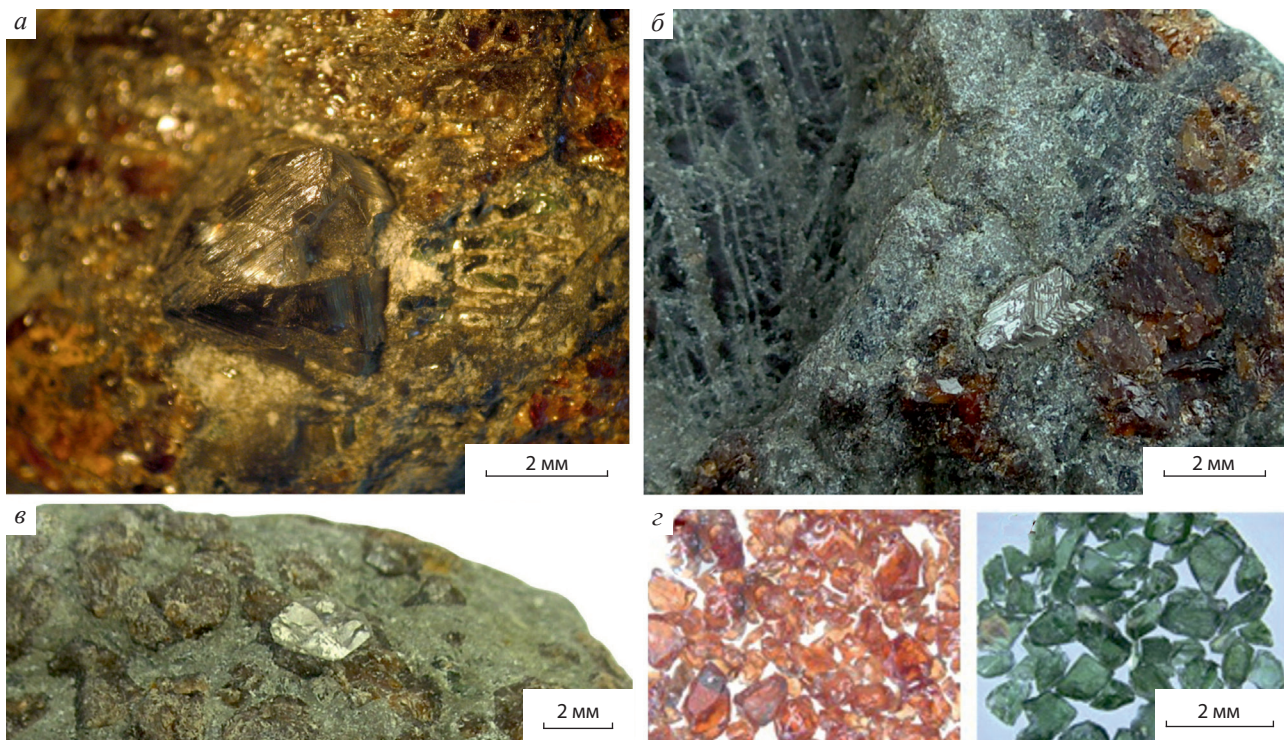


Рис. 1. КСЕНОЛИТЫ АЛМАЗОНОСНЫХ ЭКЛОГИТОВ ИЗ ТРУБКИ УДАЧНАЯ:

а – образец Уе-32, в центре – алмаз октаэдрической формы светло-серого цвета с полицентрическим строением граней, размерность 8 грейнеров; *б* – образец Уж-11, алмаз представлен шпинелевым двойником (~ 2 мм), расположен между зёрнами граната и клинопироксена; *в* – образец Уж-2, бесцветный октаэдр (~ 3 мм) с отколотой поверхностью, расположен в скоплении зёрен граната; *г* – монофракции граната и клинопироксена из ксенолита эклогита (образец Уж-11), которые были подготовлены для структурных исследований

ным клинопироксеном с гораздо более низким содержанием Na_2O и наличие специфичных структур (spongy texture), аналогичных охарактеризованным в работах [15, 21]. Все эти признаки однозначно указывают на интенсивное проявление процессов мантийного метасоматоза в этих образцах, что побудило нас не только определить состав исходных гранатов и клинопироксенов, но и провести дополнительные исследования по выяснению изменения состава и структурных преобразований граната в процессе метасоматоза.

Химический состав минералов ксенолитов определялся рентгеновским микроанализатором Superprobe JXA-8800R АК «АЛРОСА» в стандартных условиях. При этом разрешающая способность составляла 133 eV, ускоряющее напряжение – 20 kV, ток – 10 nA, диаметр пучка 1–2 мкм. Морфология кристаллов изучалась с использованием бинокулярного микроскопа фирмы Leica Wild M420.

Дефектно-примесный состав алмазов определялся методом ИК-спектроскопии. Регистрацию спектров ИК-поглощения в волновом диапазоне 600–4500 cm^{-1} проводили с разрешением 2–4 cm^{-1} на Фурье-спектрометре Tensor-27 фирмы Bruker с микроскопом Hyperion 3000. В качестве внутреннего стандарта было принято собственное поглощение алмаза. Для расчёта спектров алмаза смешанного типа применяли разложение суммарного ИК-спектра на индивидуальные C-, A- и B1-системы полос поглощения, полученные с природных алмазов чистых типов Ib, IaA и IaB. Кон-

центрации дефектов определялись с использованием соотношений, предложенных в работах [4, 12]. Суммарный азот (N_{tot}) определялся сложением выявленных концентраций этой примеси в C-, A-, B-формах. Составы первичных гранатов и омфацитов исследованных образцов приведены в табл. 1.

Было выполнено детальное исследование видового состава пироксена и граната с уточнением структуры и компонентного состава последнего. Для этого из ксенолитов путём дробления породы были подготовлены монофракции первичных гранатов и омфацитов (см. рис. 1, 2), а также развитых по ним продуктов метасоматического замещения. Вес подготовленных к исследованию выборок зёрен граната и клинопироксена составлял не менее 800 мг. Структурные исследования гранатов выполнены рентгеноструктурным методом с использованием дифрактометра ARL X'TRA Thermo Scientific (Швейцария) с базой данных PDF-4. Рентгендифракционные картины гранатов получены на $\text{CuK}\alpha$ излучении при $V = 40\text{kV}$ и $I = 40\text{mA}$, с шагом $0,05^\circ$ и временем накопления 10 с. Уточнение структуры пиропов выполнено методом Ритвельда с помощью пакета программ FullProf (EdPCR, v. 2.00).

Все изученные гранаты относятся к пироп-альмандинам. На тройной диаграмме, построенной по содержаниям Ca, Mg и Fe (см. табл. 1), они соответствуют области эклогитовых ассоциаций мантийных ксенолитов из данной трубки (рис. 2). По данным составов неизменённых гранатов и исход-

1. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ГРАНАТОВ И ОМФАЦИТОВ В КСЕНОЛИТАХ МАНТИЙНЫХ ЭКЛОГИТОВ ИЗ ТРУБКИ УДАЧНАЯ, ПО ДАННЫМ МИКРОРЕНТГЕНСПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА, В МАС. %

Образец	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Cr_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	Total
Гранаты											
Уж-2	40,28	0,26	21,79	0,03	15,41	0,34	11,08	10,75	0,13	0,00	100,07
Уж-11	41,03	0,58	21,78	0,09	14,83	0,30	17,04	4,30	0,22	0,00	100,17
Уе-32	40,48	0,45	22,01	0,06	12,71	0,23	12,75	11,12	0,18	0,00	100,00
Омфациты											
Уж-2	55,81	0,19	8,88	0,08	3,31	0,04	10,67	15,46	4,87	0,25	99,30
Уж-11	56,10	0,51	8,52	0,10	5,26	0,08	11,05	11,79	6,29	0,04	99,69
Уе-32	56,02	0,35	10,49	0,10	3,06	0,03	9,56	13,16	6,58	0,07	99,35

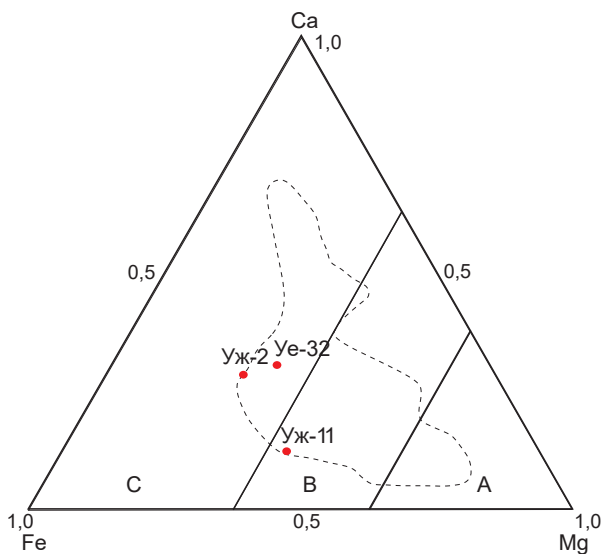
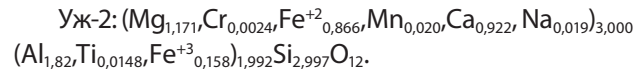
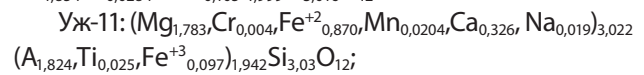
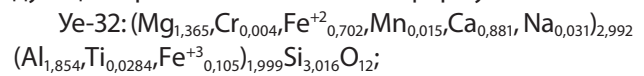


Рис. 2. РАСПОЛОЖЕНИЕ СОСТАВА ГРАНАТОВ ИССЛЕДОВАННЫХ ОБРАЗЦОВ ЭКЛОГИТОВ ИЗ ТРУБКИ УДАЧНАЯ НА ДИАГРАММЕ Ca-Mg-Fe, ОТРАЖАЮЩЕЙ ВЗАИМООТНОШЕНИЯ ГРУПП ЭКЛОГИТОВ, ПО [24]. ПОЛЕ СОСТАВА ГРАНАТОВ (выделено штрих-пунктиром) ЭКЛОГИТОВ С АЛМАЗАМИ ИЗ ТРУБКИ УДАЧНАЯ, ПО [20]

ных клинопироксенов (омфацитов), все три ксенолита являются биминеральными эклогитами: один ксенолит (Уж-11) отвечает эклогитам (Group B), два – эклогитам (Group C), согласно классификации [25]. Следует отметить повышенное, почти предельное для эклогитов трубки Удачная содержание FeO в гранатах образцов Уж-2 и Уж-11 (см. рис. 2) и весьма высокое содержание Na (0,13–0,22 мас. % Na₂O), что типично для гранатов, парагенных с алмазами [5]. Ассоциирующие омфациты характеризуются низкой железистостью и высоким содержанием Na, особенно из высокоглинозёмистых эклогитов (> 6 мас. % Na₂O). На базе данных химизма первичных гранатов и омфацитов нами рассчитаны температуры равновесия ксенолитов с использованием термометров Ellis, Green, 1979; Krogh, 2000 [13, 14], которые составили при фиксированном давлении 50 кбар для образца Уж-32 (соответственно 1200 и 1075 °C), Уж-2 (1230 и 1085 °C) и Уж-11 (1055 и 975 °C). Таким образом, можно полагать, что данные эклогиты были сформированы в интервале температур 1000–1200 °C, что, в принципе, соответствует условиям образования алмазоносных эклогитов и согласуется с оценками других работ [5, 8].

На основании данных микрорентгеноспектрального анализа для пиропов получены следующие кристаллохимические формулы:



Как видно из формул, в пиропе имеют место отклонения от стехиометрического состава в виде избытка Si, дефицита катионов в позициях R²⁺ и др.

Рассчитанные по полученным кристаллохимическим коэффициентам рентгенодифракционные характеристики пиропов существенно отличаются от экспериментальных с неудовлетворительными величинами Брэгговского критерия – *Rbr*, находящимися в интервале от 46,60 до 51,30. Уточнение структуры пиропов в пределах одной фазы не позволило улучшить его результаты. Уменьшить величины Брегговского критерия до удовлетворительного значения позволило только введение в расчёт второй фазы граната. В результате уточнения структуры пиропов предложен двухфазный состав граната, представленный преимущественно пиропом сложного состава, ассоциирующего с Ca-пиропом. Графические результаты уточнения структуры граната, полученные для граната из ксенолита Уж-11, показаны на рис. 3.

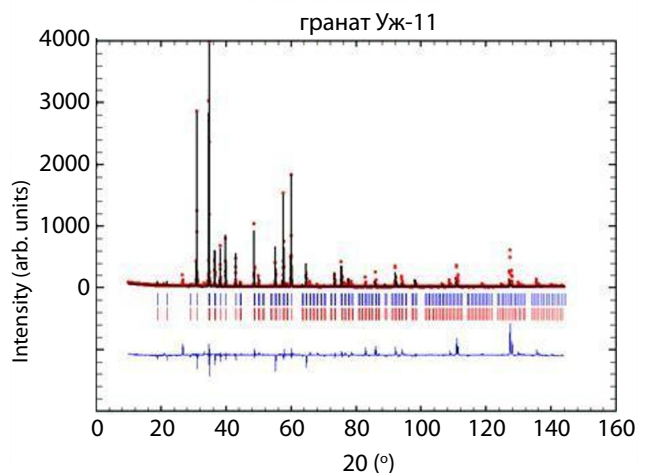


Рис. 3. УТОЧНЕНИЕ СТРУКТУРЫ ГРАНАТА ИЗ ОБРАЗЦА КСЕНОЛИТА Уж-11 В ДВУХФАЗНОЙ СИСТЕМЕ ПИРОП (~ 95 %) И Ca-ПИРОП (~ 5 %)

В результате уточнения структуры гранатов из ксенолитов Уе-32, Уж-11 и Уж-2 получены следующие кристаллохимические формулы:

Уе-32 – I фаза – 96 % пироп ($Mg_{1,365}Cr_{0,004}Fe^{+2}_{0,75}Mn_{0,015}Ca_{0,78}Na_{0,033}O_{12,933}(Al_{1,33},Fe^{+3}_{0,11})_{1,44}(Si_{2,67}Ti_{0,07})_{2,74}O_{12,06}$, (*Rbr* = 17,95),

II фаза – 4 % пироп ($Mg_{2,00}Ca_{1,00}Al_2Si_3O_{12,00}$, (*Rbr* = 16,25);

Уж-11 – I фаза – 95 % пироп ($Mg_{1,749}Cr_{0,004}Fe^{+2}_{0,706}Mn_{0,004}Ca_{0,03}Na_{0,02}O_{11,90}(Al_{1,506},Fe^{+3}_{0,102})_{1,608}(Si_{2,963},Ti_{0,03})_{2,993}O_{11,90}$, (*Rbr* = 22,36),

II фаза – 5 % пироп ($Mg_{0,5}Ca_{1,5}Al_2Si_3O_{12}$, (*Rbr* = 15,00);

Уж-2 – I фаза – 88% пироп ($Mg_{0,97}Cr_{0,0027}Fe^{+2}_{0,96}Ca_{0,42}Na_{0,022}O_{10,28}(Al_{1,27},Fe^{+3}_{0,107})_{1,337}(Si_{2,62}Ti_{0,022})_{2,64}O_{10,28}$, (*Rbr* = 13,95),

II фаза – 12 % пироп ($Mg_{0,3}Ca_{2,05}Mn_{0,4}O_{12}(Al_{1,27}Fe^{+3}_{0,107})_{1,828}Si_{3,00}O_{12}$, (*Rbr* = 16,89).

По результатам уточнения кристаллохимических формул, пиропы первой, преобладающей, фазы имеют дефектную структуру. В тетраэдрах наблюдается дефицит Si и замещение его на Ti. Октаэдрические позиции заняты Al и Fe³⁺ и частично вакантны. Также имеет место дефицит катионов R²⁺.

Известно, что двухфазные системы возникают в условиях, когда температуры плавления компонентов несколько отличаются. При этом, если формирование фаз происходит при достаточном притоке вещества из среды кристаллизации, то не должны образовываться значительные дефекты структуры в виде недостатка образующих струк-

туру элементов – Si, Al, Mg, O. Поэтому в данном случае есть основания предполагать, что в изученных гранатах образование двухфазных систем происходило не в момент кристаллизации, а на более позднем этапе, когда под внешним воздействием, предположительно метасоматизирующих флюидов, произошло разделение твёрдого раствора граната на две фазы.

Пироксены из ксенолитов представлены смесью разновидностей (табл. 2). Во всех ксенолитах преобладает первичный пироксен омфацитового состава, характерный для мантийных алмазосодержащих эклогитов с содержанием обычно более 4 мас. % Na₂O (см. табл. 1), который присутствует в виде отдельных реликтовых зёрен. Во всех трёх образцах первичный омфациит ассоциирует и замещается по периферии зёрен другой разновидностью клинопироксена, обеднённого содержанием Na₂O, который характерен для продуктов частичного плавления (*spongy texture*) и достаточно детально описан в работах [15, 21]. Характер преобразования омфациита хорошо проявлен и продемонстрирован на рис. 1, б, где вверху слева видно, что крупное зерно омфациита по периферии замещается поздним пироксеном и содержит линейные прожилки продуктов частичного плавления. Помимо этого следует подчеркнуть, что отмечается тенденция к возрастанию количества замещающего пироксена с увеличением содержания Са-пиропа в ассоциирующем гранате.

Параллельно с исследованием химического и видового составов минералов эклогитов были изу-

2. ВИДОВОЙ СОСТАВ КЛИНОПИРОКСЕНОВ И ГРАНАТОВ ИЗ КСЕНОЛИТОВ МАНТИЙНЫХ ЭКЛОГИТОВ ТРУБКИ УДАЧНАЯ

Образец ксенолита		Уе-32	Уж-11	Уж-2
Условное содержание, %	Пироксен ($Ca_{0,55}Na_{0,30}Fe_{0,07}Mg_{0,06}(Mg_{0,59}Fe_{0,08}Ti_{0,01}Al)Si_2O_3$)	94	80	41
	Пироксен ($Mg_{0,944}Fe_{0,056}(Ca_{0,844}Na_{0,14}Fe_{0,014})Si_{1,86}Al_{0,14}O_6$)	6	9	39
	Слюда	-	-	4
	Моноклинные амфиболы	-	-	4
	Кварц	сл.	11	8
	Калиевые полевые шпаты, энстатит, кианит	2	2	2
Данные по уточнению структуры пиропа		96 % пироп + 4 % Са-пироп	95 % пироп + 5 % Са-пироп	88 % пироп + 12 % Са-пироп

ченности содержащихся в них алмазов, что включало помимо изучения морфологии кристаллов исследование содержания в них примеси общего азота и его агрегации. Следует отметить, что, судя по размерности и морфологии кристаллов, во всех трёх образцах присутствуют алмазы, которые представлены как минимум двумя типами кристаллов. Так, из эклогита Уе-32 были извлечены 12 алмазов (из них три крупных кристалла весом более 150 мг каждый (один размерностью 8 грейнеров и два алмаза ситового класса -11+9)), которые представлены алмазами переходной формы, и девять кристаллов класса -1+0,5, представленных преимущественно октаэдрами с полицентрическим строением граней. В ксенолите Уж-2 присутствовали девять алмазов (четыре кристалла весом 15–60 мг, представленные октаэдрами с полицентрическим строением граней, и пять мелких кристаллов октаэдрической формы). В образце Уж-11 был обнаружен 21 алмаз (из них 10 крупных кристаллов весом 30–180 мг) октаэдрической формы с полицентрическим строением и треугольными впадинами на гранях; остальные, более мелкие алмазы (класс -1+0,5) представлены преимущественно кристаллами переходной формы или их обломками. Эти особенности морфологии алмазов

в изученных эклогитах указывают на вероятность по меньшей мере двух периодов формирования алмазов в исследованных ксенолитах, что весьма характерно для алмазосодержащих эклогитов трубки Удачная и отмечено в ряде публикаций [22–24].

Исследование содержания примесного азота и его агрегации в алмазах из этих эклогитов подтверждает наиболее вероятную модель мультстадийного роста алмазов в эклогитах, которая была предложена в работах [23, 24], что достаточно показательно иллюстрируется диаграммой соотношения содержания общего азота и его агрегации (рис. 4), на которой выделяются по две группы кристаллов в изученных образцах. Особенно ярко это проявлено для алмазов из образца Уж-11, которые формируют две группы, чётко различающиеся как по общему содержанию примеси азота, так и по его агрегации. Существенное различие в степени агрегации азота этих двух групп кристаллов указывает на то, что они были сформированы в две самостоятельные стадии алмазообразования, которые, возможно, были разорваны во времени на несколько сотен миллионов лет.

Таким образом, полученные данные свидетельствуют об интенсивном развитии метасоматоза в алмазосодержащих ксенолитах эклогитов из трубки Удачная, проявленного в двухфазном составе породообразующих пироксенов и пиропов. Несомненно, что образование Са-пироба и Mg-Fe-пироксена с низким содержанием Na_2O , замещающего исходный омфациит, является свидетельством перекристаллизации первичных минералов эклогитов в процессе мантийного метасоматоза. Следует отметить, что при этом наблюдается изменение не только химического состава первичных минералов, но и их видового состава. Исходя из полученных результатов, предполагается рост более поздних генераций алмазов в ксенолитах эклогитов под воздействием метасоматизирующих мантийных флюидов, содержащих в своём составе углерод в той или иной форме. Необходимо подчеркнуть, что отдельные стадии алмазообразования, возможно, были разорваны во времени на несколько сотен миллионов лет. Полученные данные позволяют уточнить закономерности и условия образования алмазов в мантийных эклогитах, а также проследить эволюцию минералов эклогитов в процессе мантийного метасоматоза этого сегмента литосферы.

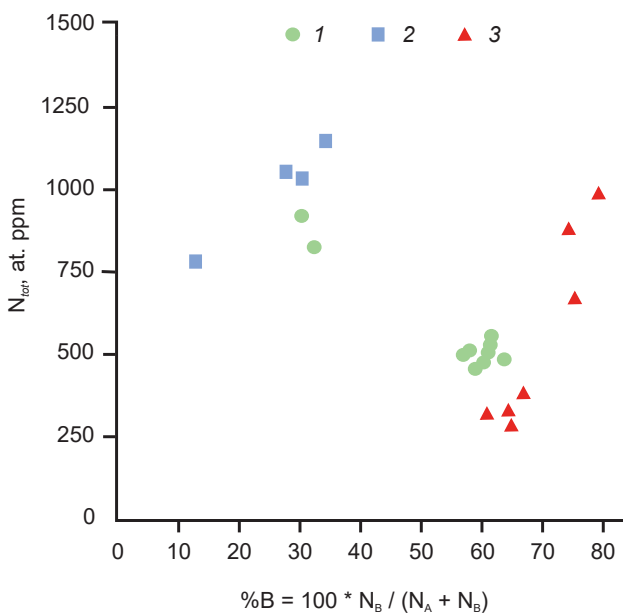


Рис. 4. СОДЕРЖАНИЕ ОБЩЕГО АЗОТА И ЕГО АГРЕГАЦИЯ В АЛМАЗАХ ИЗ КСЕНОЛИТОВ МАНТИЙНЫХ ЭКЛОГИТОВ ТРУБКИ УДАЧНАЯ:

1 – Уж-11; 2 – Уж-2; 3 – Уе-32

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пономаренко А. И., Серенко В. П., Лазько Е. Е. Первые находки алмазоносных эклогитов в кимберлитовой трубке «Удачная» // Доклады Академии наук СССР. – 1973. – Т. 209. – № 1. – С. 188–189.
2. Пономаренко А. И., Соболев Н. В., Похиленко Н. А., Лаврентьев Ю. Г., Соболев В. С. Алмазоносный гроспидит и алмазоносные дистеновые эклогиты из кимберлитовой трубки «Удачная», Якутия // Доклады Академии наук СССР. – 1976. – Т. 226, № 4. – С. 927–930.
3. Пономаренко А. И., Специус З. В., Соболев Н. В. Новый тип алмазоносных пород – гранатовые пироксениты // Доклады Академии наук СССР. – 1980. – Т. 251, № 2. – С. 438–441.
4. Соболев Е. В., Лисойван В. И. // Проблемы петрологии земной коры и верхней мантии. – Новосибирск: Наука, 1978. – С. 245–255.
5. Соболев Н. В. Глубинные включения в кимберлитах и проблема состава верхней мантии. – Новосибирск: Наука, 1974. – 264 с.
6. Соболев Н. В., Похиленко Н. П., Ефимова Э. С. Ксенолиты алмазоносных перидотитов в кимберлитах и проблема происхождения алмазов // Геология и геофизика. – 1984. – № 12. – С. 63–80.
7. Специус З. В. Форма, природа и условия частичного плавления в ксенолитах кимберлитовых трубок // Вестник Московского государственного университета. – 1980. – № 5. – С. 101–105.
8. Специус З. В. Мантийные ксенолиты – источник алмазов и ключ к их происхождению // Проблемы прогнозирования и поисков месторождений алмазов на закрытых территориях. – Якутск ЯНЦ СО РАН, 2008. – С. 39–45.
9. Специус З. В., Безбородов С. М. Минералогия алмазоносных эклогитов из кимберлитовой трубки Удачная (новые находки) // Доклады Академии наук. – 1992. – Т. 326, № 4. – С. 717–721.
10. Специус З. В., Богуш И. Н., Кедрова Т. В. Томография ксенолита пироксенита и особенности алмазов (трубка Удачная, Якутия) // Материалы Юбилейного съезда Российского минералогического общества «200 лет РМО». – СПб. – 2017. – Т. 1. – С. 316–318.
11. Шацкий В. С., Зедгенизов Д. А., Рагозин А. Л. Свидетельства метасоматического образования алмазов в ксенолите эклогита из кимберлитовой трубки Удачная (Якутия) // Доклады Академии наук СССР. – 2005. – Т. 402, № 2. – С. 239–242.
12. Boyd S. R., Kiflawi I., Woods G. S. Infrared absorption by the B nitrogen aggregate in diamond // Philosophical Magazine. – 1995. – Part B72. – P. 351–361.
13. Ellis D. J., Green D. H. An experimental study of the effect of Ca upon garnet-clinopyroxene Fe–Mg exchange equilibria // Contributions to Mineralogy and Petrology. – 1979. – V. 71. – P. 13–22.
14. Krogh Ravna E. J. The garnet–clinopyroxene Fe²⁺–Mg geothermometer: an updated calibration // Journal of Metamorphic Geology. – 2000. – V. 18. – P. 211–219.
15. Misra K. C., Mahesh A., Taylor L. A., Sobolev N. V. Multi-stage metasomatism of diamondiferous eclogite xenoliths from the Udachnaya kimberlite pipe, Yakutia, Siberia // Contributions to Mineralogy and Petrology. – 2004. – V. 146. – P. 696–714.
16. Snyder G. A., Taylor L. A., Crozaz G., Holliday A. N., Beard B. L., Sobolev V. N., Sobolev N. V. The origins of Yakutian eclogite xenoliths // Journal of Petrology. – 1997. – V. 38. – P. 85–113.
17. Sobolev V. N., Taylor L. A., Snyder G. A., Sobolev N. V. Diamondiferous eclogites from the Udachnaya kimberlite pipe, Yakutia, Siberia // International Geology Review. – 1994. – V. 36. – P. 42–64.
18. Sobolev V. N., Taylor L. A., Snyder G. A., Jerde E. A., Neal C. R., Sobolev N. V. Quantifying the effects of metasomatism in mantle xenoliths: Constraints from secondary chemistry and mineralogy in Udachnaya eclogites, Yakutia // International Geology Review. – 1999. – V. 41. – P. 391–416.
19. Spetsius Z. V. Two generation of diamonds in the eclogite xenoliths / Gurney J. J., Gurney J. L., Pascoe M. D., Richardson S. H. (eds) // Proceedings of 7th International Kimberlite Conference. – Cape Town: Red Roof Design, 1999. – V. 2. – P. 823–828.
20. Spetsius Z. V. Petrology of highly aluminous xenoliths from kimberlites of Yakutia // Lithos. – 2004. – V. 77. – P. 525–538.
21. Spetsius Z. V., Griffin B. J. Secondary phases associated with diamonds in eclogites from the Udachnaya kimberlite pipe: Implications for diamond genesis // Extended Abstract of 7th International Kimberlite Conference. – Cape Town, South Africa Red Roof Press, 1998. – P. 850–852.
22. Spetsius Z. V., Kovalchuck O. E., Bogush I. N. Properties of diamonds in xenoliths from kimberlites of Yakutia: implication to their origin and exploration // Extended Abstract 10th International Kimberlite Conference 2012. – Bangalore, India, 2012. – IOIKC–51.
23. Spetsius Z. V., Taylor L. A. Partial Melting in Mantle Eclogite Xenoliths: Connection with Diamond Paragenesis // Geology Review. – 2002. – V. 44. – P. 973–987.
24. Taylor L. A., Milledge H. J., Bulanova G. P., Snyder G. A., Keller R. A. Metasomatic eclogitic diamond growth: evidence from multiple diamond inclusions // International Geology Review. – 1998. – V. 40. – P. 663–676.
25. Taylor L. A., Neal C. R. Eclogites with oceanic crustal and mantle signatures from the Bellsbank kimberlite, South Africa, part 1: Mineralogy, Petrography, and whole rock chemistry // Journal of geology. – 1989. – V. 97. – P. 551–567.

REFERENCES

- Ponomarenko A. I., Serenko V. P., Laz'ko E. E. Pervye nakhodki almazonosnykh eklogitov v kimberlitovoi trubke "Udachnaya" [The first finds of diamondiferous eclogites in the Udachnaya kimberlite pipe], *Doklady Akademii nauk SSSR [Reports of the USSR Academy of Sciences]*, 1973, V. 209, No 1, pp. 188–189. (In Russ.).
- Ponomarenko A. I., Sobolev N. V., Pokhilenko N. A., Lavrent'ev Yu. G., Sobolev V. S. Almazonosnyi grospidit i almazonosnye distenovye eklogity iz kimberlitovoi trubki "Udachnaya", Yakutiya [Diamond-bearing grospidite and diamondiferous disthene eclogites from the Udachnaya kimberlite pipe, Yakutia], *Doklady Akademii nauk SSSR [Reports of the USSR Academy of Sciences]*, 1976, V. 226, No 4, pp. 927–930. (In Russ.).
- Ponomarenko A. I., Spetsius Z. V., Sobolev N. V. Novyi tip almazonosnykh porod – granatovye piroksenity [A new type of diamondiferous rocks – garnet pyroxenites], *Doklady Akademii nauk SSSR [Reports of the USSR Academy of Sciences]*, 1980, V. 251, No 2, pp. 438–441. (In Russ.).
- Sobolev E. V., Lisoivan V. I. Problemy petrologii zemnoi kory i verkhnei mantii [Problems of petrology of the earth's crust and upper mantle], Novosibirsk, Nauka Publ., 1978, pp. 245–255.
- Sobolev N. V. Glubinnye vklyucheniya v kimberlitakh i problema sostava verkhnei mantii [A new type of diamondiferous rocks – garnet pyroxenites], Novosibirsk, Nauka Publ., 1974, 264 p.
- Sobolev N. V., Pokhilenko N. P., Efimova E. S. Ksenolity almazonosnykh peridotitov v kimberlitakh i problema proiskhozhdeniya almazov [Xenoliths of diamondiferous peridotites in kimberlites and the problem of the origin of diamonds], *Geologiya i geofizika [Russian Geology and Geophysics]*, 1984, No 12, pp. 63–80. (In Russ.).
- Spetsius Z. V. Forma, priroda i usloviya chastichnogo plavleniya v ksenolitakh kimberlitovykh trubok [Form, nature and conditions of partial melting in xenoliths of kimberlite pipes], *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta [MSU Vestnik]*, 1980, No 5, pp. 101–105. (In Russ.).
- Spetsius Z. V. Mantiinye ksenolity – istochnik almazov i klyuch k ikh proiskhozhdeniyu [Mantle xenoliths – a source of diamonds and a key to their origin], *Problemy prognozirovaniya i poiskov mestorozhdenij almazov na zakrytykh territorijah [Problems of forecasting and prospecting for diamond deposits in closed areas]*, Yakutsk, YaNTs SO RAN, 2008, pp. 39–45. (In Russ.).
- Spetsius Z. V., Bezborodov S. M. Mineralogiya almazonosnykh eklogitov iz kimberlitovoi trubki Udachnaya (novye nakhodki) [Mineralogy of diamondiferous eclogites from the Udachnaya kimberlite pipe (new findings)], *Doklady Akademii nauk [Reports of the Academy of Sciences]*, 1992, V. 326, No 4, pp. 717–721. (In Russ.).
- Spetsius Z. V., Bogush I. N., Kedrova T. V. Tomografiya ksenolita piroksenita i osobennosti almazov (trubka Udachnaya, Yakutiya) [Tomography of xenolith of pyroxenite and features of diamonds (Udachnaya pipe, Yakutia)], *Materialy Yubileinogo s'ezda Rossiiskogo mineralogicheskogo obshchestva "200 let RMO" [Materials of the Jubilee Congress of the Russian Mineralogical Society "200 years of the RMO"]*, St. Petersburg, 2017, V. 1, pp. 316–318. (In Russ.).
- Shatskii V. S., Zedgenizov D. A., Ragozin A. L. Svidetel'stva metasomaticheskogo obrazovaniya almazov v ksenolite eklogita iz kimberlitovoi trubki Udachnaya (Yakutiya) [Evidence of the metasomatic formation of diamonds in the eclogite xenolith from the Udachnaya kimberlite pipe (Yakutia)], *Doklady Akademii nauk SSSR [Reports of the USSR Academy of Sciences]*, 2005, V. 402, No 2, pp. 239–242. (In Russ.).
- Boyd S. R., Kiflawi I., Woods G. S. Infrared absorption by the B nitrogen aggregate in diamond, *Philosophical Magazine*, 1995, Part B72, pp. 351–361.
- Ellis D. J., Green D. H. An experimental study of the effect of Ca upon garnet-clinopyroxene Fe–Mg exchange equilibria, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1979, V. 71, pp. 13–22.
- Krogh Ravna E. J. The garnet–clinopyroxene Fe²⁺–Mg geothermometer: an updated calibration, *Journal of Metamorphic Geology*, 2000, V. 18, pp. 211–219.
- Misra K. C., Mahesh A., Taylor L. A., Sobolev N. V. Multi-stage metasomatism of diamondiferous eclogite xenoliths from the Udachnaya kimberlite pipe, Yakutia, Siberia, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2004, V. 146, pp. 696–714.
- Snyder G. A., Taylor L. A., Crozaz G., Holliday A. N., Beard B. L., Sobolev V. N., Sobolev N. V. The origins of Yakutian eclogite xenoliths, *Journal of Petrology*, 1997, V. 38, pp. 85–113.
- Sobolev V. N., Taylor L. A., Snyder G. A., Sobolev N. V. Diamondiferous eclogites from the Udachnaya kimberlite pipe, Yakutia, Siberia, *International Geology Review*, 1994, V. 36, pp. 42–64.
- Sobolev V. N., Taylor L. A., Snyder G. A., Jerde E. A., Neal C. R., Sobolev N. V. Quantifying the effects of metasomatism in mantle xenoliths: Constraints from secondary chemistry and mineralogy in Udachnaya eclogites, Yakutia, *International Geology Review*, 1999, V. 41, pp. 391–416.
- Spetsius Z. V. Two generation of diamonds in the eclogite xenoliths, *Proceedings of 7th International Kimberlite Conference, Cape Town, Red Roof Design*, 1999, V. 2, pp. 823–828.

20. Spetsius Z. V. Petrology of highly aluminous xenoliths from kimberlites of Yakutia, *Lithos*, 2004, V. 77, pp. 525–538.
21. Spetsius Z. V., Griffin B. J. Secondary phases associated with diamonds in eclogites from the Udachnaya kimberlite pipe: Implications for diamond genesis, Extended Abstract of 7th International Kimberlite Conference, Cape Town, South Africa, *Red Roof Press*, 1998, pp. 850–852.
22. Spetsius Z. V., Kovalchuck O. E., Bogush I. N. Properties of diamonds in xenoliths from kimberlites of Yakutia: implication to their origin and exploration, *Extended Abstract 10th International Kimberlite Conference 2012*, Bangalore, India, 2012, 10IKC–51.
23. Spetsius Z. V., Taylor L. A. Partial Melting in Mantle Eclogite Xenoliths: Connection with Diamond Paragenesis, *Geology Review*, 2002, V. 44, pp. 973–987.
24. Taylor L. A., Milledge H. J., Bulanova G. P., Snyder G. A., Keller R. A. Metasomatic eclogitic diamond growth: evidence from multiple diamond inclusions, *International Geology Review*, 1998, V. 40, pp. 663–676.
25. Taylor L. A., Neal C. R. Eclogites with oceanic crustal and mantle signatures from the Bellsbank kimberlite, South Africa, part 1: Mineralogy, Petrography, and whole rock chemistry, *Journal of geology*, 1989, V. 97, pp. 551–567.

FEATURES OF GARNET AND CLINOPYROXENE IN DIAMONDIFEROUS ECLOGITES FROM THE UDACHNAYA KIMBERLITE PIPE, YAKUTIA: METASOMATOSIS EVIDENCE

Z. V. Spetsius (PhD, chief researcher)
 L. V. Liskovaya (PhD, senior researcher)
 A. S. Ivanov (PhD, leading researcher)
 I. N. Bogush (PhD, leading researcher)

Research Geological Enterprise JSC ALROSA (PJSC), Mirny

Mineralogy of diamondiferous eclogite xenoliths showing metasomatism evidence from the Udachnaya kimberlite pipe is discussed. The paper also reviews features of diamonds they contain, compositions of primary garnets and omphacites as well as alteration of structural and species compositions of original garnets and clinopyroxenes during metasomatism. Based on pyrope structure update, two-phase garnet composition is suggested, which is mostly represented by complex pyrope associated with Ca-pyrope. In all samples, primary omphacite is replaced by another clinopyroxene variety depleted in Na₂O, which is typical of partial melting products. Geothermometry results suggested that the eclogites formed within a temperature range of 1,000–1,200 °C. Based on diamond morphology, data on total N content in diamonds and its aggregation, multiple stages of diamond formation in eclogites and the most probable growth of later diamond generations impacted by metasomatizing mantle fluids containing carbon are postulated. It is suggested that certain diamond formation stages probably had a time gap of several hundred million years.

Keywords: kimberlites, eclogite xenoliths, diamonds, garnets, pyroxenes, metasomatism.

