

## ВЗАИМОСВЯЗЬ МОРФОЛОГИИ И ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АЛМАЗОВ С СОСТАВОМ КСЕНОЛИТОВ ИЗ КИМБЕРЛИТОВ ЯКУТИИ

З.В. Специус, И.Н. Богуш

*Научно-исследовательское геологоразведочное предприятие АК АЛРОСА (ПАО),  
Мирный, spetsiuszv@alrosa.ru*

## INTERRELATION OF MORPHOLOGY AND PHYSICAL PROPERTIES OF DIAMONDS WITH CONTAIN OF THE XENOLITHS FROM YAKUTIA KIMBERLITES

Z.V. Spetsius, I.N. Bogush

*Research prospecting enterprise JSC ALROSA (PJSC), Mirnyi*

### Введение

Парагенные ассоциации с алмазом в кимберлитах могут быть подразделены на 3 типа: а) минералы-включения в кристаллах алмазов, б) минералы-сростки с алмазом, в) ксенолиты алмазосодержащих мантийных пород. Выделенные типы, в том или ином количестве, обнаружены во всех кимберлитовых трубках с промышленным содержанием алмазов. Эти образования всегда привлекали пристальное внимание исследователей, поскольку они содержат наиболее достоверные сведения об условиях формирования алмазов в природе и информацию об особенностях состава среды алмазообразования, т.е. петрологических особенностях верхней мантии (Соболев, 1974; Специус, 2008).

Изучение алмазов из ксенолитов показало, что в то время как в перидотитах преобладают кристаллы октаэдрического габитуса, в эклогитах алмазы характеризуются большим морфологическим разнообразием (Специус, 2008). Помимо октаэдров, отмечаются кубоиды, а также алмазы в «оболочке», причём кристаллы разного габитуса могут встречаться в одном образце ксенолита (Spetsius, Taylor, 2008). Целью настоящей работы являлось получение и анализ данных по минералогии ксенолитов с алмазами и выявление взаимосвязи свойств алмазов с особенностями содержащих их эклогитов.

Состав пороодообразующих гранатов определялся с помощью рентгеновского микроанализатора с электронным зондом Superprobe JXA-8800R в стандартных условиях. Примесный состав алмазов исследовался методом ИК-спектроскопии. Регистрацию спектров ИК-поглощения алмазных пластинок проводили методом детального картирования (до 800 точек) с шагом около 50 мкм на Фурье спектрометре VERTEX-70. По ИК-спектрам, нормированным по поглощению в двухфононной области, определялись концентрации А-, В1-, В2-дефектов алмазов (Boyd et al., 1995). Суммарный азот (*Ntot*) определялся сложением выявленных концентраций этой примеси в С-, А-, В- формах. Содержание В2-дефектов оценивалась по коэффициенту поглощения полосы на 1358–1380 см<sup>-1</sup>, а примеси водорода, связанного с кристаллической решеткой (группа С-Н) – на 3107 см<sup>-1</sup> (Соболев и др., 1971; Weerdt et al., 2003). Картирование пластинок по ИК-характеристикам проводилось с использованием программы «ArcMap, version 9.3» и стандартных настроек при построении изолиний с равными интервалами.

### Перидотитовые ксенолиты

В целом гранаты алмазосодержащих ксенолитов относятся к хромистым пиропам (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> до 11.8 мас. %). Содержание Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в различных зёрнах граната в ксенолите обычно меняется на 2–3 мас. %, отдельных случаях вариации содержания Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> достигают 6 мас. %. Широкий диапазон Cr и повышенные содержания Са в лерцолитовых гранатах связывают с метасоматическими процессами. В ксенолите алмазоносного гранатового перидотита из трубки Мир присутствуют признаки более позднего роста алмаза по сравнению с пороодообразующими минералами и в отдельных кристаллах зафиксировано резкое увеличение концентраций Sr по периферии включений пироба, что логично объясняется более молодым возрастом алмазов (Shimizu et al., 1997). Различие в химическом составе зёрен одноимённых минералов

объясняется процессом перемешивания разнородного глубинного вещества при внутримантийном диапиризме и высокотемпературном мантийном метасоматозе (Специус, Серенко, 1990).

Следует отметить, что алмазы в перидотитах представлены октаэдрическими формами, причём для кристаллов нехарактерно наличие внутренней зональности и отсутствуют признаки мультистадийного роста кристаллов. Перидотитовые алмазы в основном мало- и среднеазотистые, процентное содержание азота в В-форме выше, чем в эклогитовых кристаллах. Слабые полосы ИК-поглощения на  $3107\text{ см}^{-1}$  выявлены только в отдельных центральных зонах перидотитовых кристаллов, в них также редко фиксируются признаки прерывания роста (Специус и др., 2015).

### Эклогитовые ксенолиты

Эклогитовые породы вызывают особый интерес, т.к. среди алмазоносных ксенолитов они явно преобладают. Так, например, на долю эклогитовых из трубки Нюрбинская приходится более 60 % из 165 алмазосодержащих ксенолитов, а образцы дунит-гарцбургитового парагенезиса составляют менее 10 % (Spetsius et al., 2008). Согласно общепринятой классификации, эклогиты делятся на три основные группы (А, В, С) и могут являться куммулатами мантийных магм базальтового состава (эклогиты группы А) или реститами плавления пород океанической коры в процессе субдукции (эклогиты групп В и С). Изученные эклогиты из продуктивных кимберлитов Якутии представлены всеми тремя группами при доминировании группы В (Специус, 2008). Клинопироксены эклогитов группы В нередко содержат значительную примесь  $\text{K}_2\text{O}$  (до 0.45 %) и обогащены редкоземельными элементами. В то же время гранат имеет типичные для эклогитовых ксенолитов распределения РЗЭ. Эклогитовые ксенолиты из высокопродуктивных трубок Якутии – это в основном крупнозернистые породы, сложенные преимущественно гранатом и клинопироксеном с акцессорным рутилом. Кроме биминеральных, встречаются корундовые и дистеновые эклогиты. При этом фиксируются широкие вариации в процентном содержании клинопироксенов: от единичных зёрен до 65 % (редко более) от объёма ксенолита. В некоторых случаях ксенолиты выглядят как гранатиты или мегакристы гранатов. Реликтов клинопироксена в отдельных образцах не установлено даже после их распиловки и последующей шлифовки (Spetsius et al., 2008).

В изученных нами алмазосодержащих эклогитах зафиксированы участки частичного плавления, что согласуется с литературными данными (Spetsius, Taylor, 2002). Причём прожилки, состоящие из стекла, продуктов его замещения и флогопита, часто пересекают зёрна пироксена и граната, образуют каймы вокруг зёрен гранатов. Вокруг клинопироксена наблюдается его перекристаллизация и образование клинопироксена-II губчатой структуры, обычно К-содержащего. Отмечается также наличие наложенной рутилсодержащей минерализации, что подтверждается её расположением в межзерновом пространстве совместно с новообразованными клинопироксеном-II и шпинелью. Эта минеральная ассоциация отражает этап мантийного метасоматоза, связанного с воздействием флюида/расплава, обогащённого К, Fe, Ti, на эклогитовые мантийные породы. Определение абсолютного возраста акцессорного рутила из эклогита трубки Удачная свидетельствует о том, что метасоматоз на данном участке литосферы имел место в силуре ( $420 \pm 9.6$  млн лет) не ранее 60 млн лет до образования трубки Удачная (Рагозин и др., 2014). Учитывая, что алмаз встречается в виде включений в зёрнах пироксена и каймах вокруг граната, предполагается, что образование алмаза связано с этим этапом.

### Взаимосвязь между свойствами алмазов и составом эклогитов

В современной литературе доминирует точка зрения, что большинство клинопироксенов в ксенолитах кимберлитовых трубок архейских кратонов имеет метасоматическое происхождение. При анализе характеристик алмазов и минерального состава эклогитов нами была установлена взаимосвязь между наличием и проявленностью поздних генераций алмазов (с малым параметром  $Kt$ ; Evans, 1992) с количеством клинопироксена в объёме ксенолита. Для малоизмененных эклогитовых ксенолитов из трубок Удачная, Комсомольская, Мир, Юбилейная с высоким содержанием гранатов характерны алмазы ранней генерации, которые имеют высокие параметры  $Kt$ . Области или кристаллы поздних генераций представлены слабо, если вообще присутствуют в этих ксенолитах. Это наблюдается и по ИК-данным целых кристаллов, когда среди кристаллов из эклогитов трубки Удачная с высоким (более 60 %) содержанием в ксенолите граната резко доминируют алмазы со значительным параметром  $Kt$ .

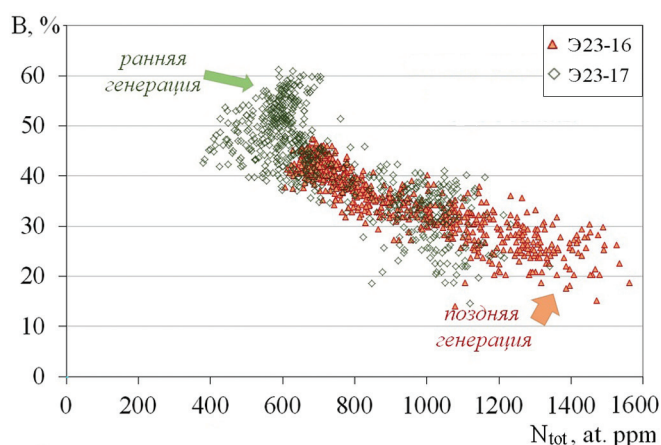


Рис. 1. Изменение концентрации азота в пластинках алмаза с разновозрастными областями из ксенолита Э-23 трубки Удачная. В Э23-17 преобладает центральная область, в Э23-16 – периферийная.

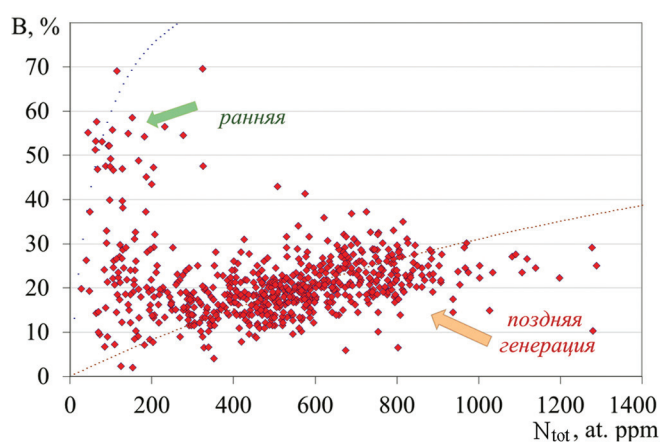


Рис. 2. Концентрация азота в алмазах из эклогитов трубки Мир. Алмазы в большинстве относятся к поздней генерации с низким параметром  $Kt$ .

Обратная картина отмечается для ксенолитов с доминированием в составе пироксена, алмазы которых на диаграмме «азот-агрегация азота» образуют спадающий в низкоагрегированную область тренд (рис. 1). Зёрна акцессорного рутила, входящего в состав вторичной минеральной ассоциации, встречены нами в ряде ксенолитов, в минеральном составе которых резко доминирует клинопироксен, а зёрна гранатов имеют признаки подплавления (например, в ксенолите UE-39 из трубки Удачная около 65 %  $Sr_x$  и единичные зёрна Ru). Как отмечалось, абсолютный возраст зёрен рутила оценивается ~420 млн лет (Рагозин и др., 2014), что согласуется с небольшим временем нахождения поздней генерации алмазов с малым параметром  $Kt$ .

Указанная выше закономерность по характеристикам алмазов и минеральным составом ксенолитов также отчётливо проявляется при анализе пластинок алмазов. Так, например, алмазы из ксенолита UE-31 трубки Удачная относятся к ранней генерации с высоким параметром  $Kt$ . При этом в ксенолите содержится около 90 % граната.

Зафиксировано зональное распределение примеси азота и водорода в процессе образования алмазов ксенолита UE-23 (рис. 1). В пластинке UE23-17 преобладает центральная область, в пластинке UE23-16 доминирует периферийная. Центральная область алмаза относится к ранней генерации с высоким параметром  $Kt$ , периферийная – к поздней с низким параметром  $Kt$ . Наблюдается и резкий скачок концентрации водорода в начале роста поздней генерации во всех алмазах ксенолита. В общем случае для этого ксенолита можно отметить большой вклад поздней генерации, образование которой шло в процессе интенсивного метасоматического преобразования минералов эклогита.

На рисунке 2 показаны концентрация азота и её агрегация в алмазах из эклогитовых ксенолитов трубки Мир. Алмазы этого месторождения представлены в основном поздней генерацией с малым параметром  $Kt$ . Анализ минерального состава выявил в ксенолитах менее 40 % граната. Зёрна клинопироксена в отдельных случаях изменены на 80 %. В подавляющем большинстве случаев алмазы окружены вторичными минералами, часто между алмазами и вмещающими их минералами наблюдает-

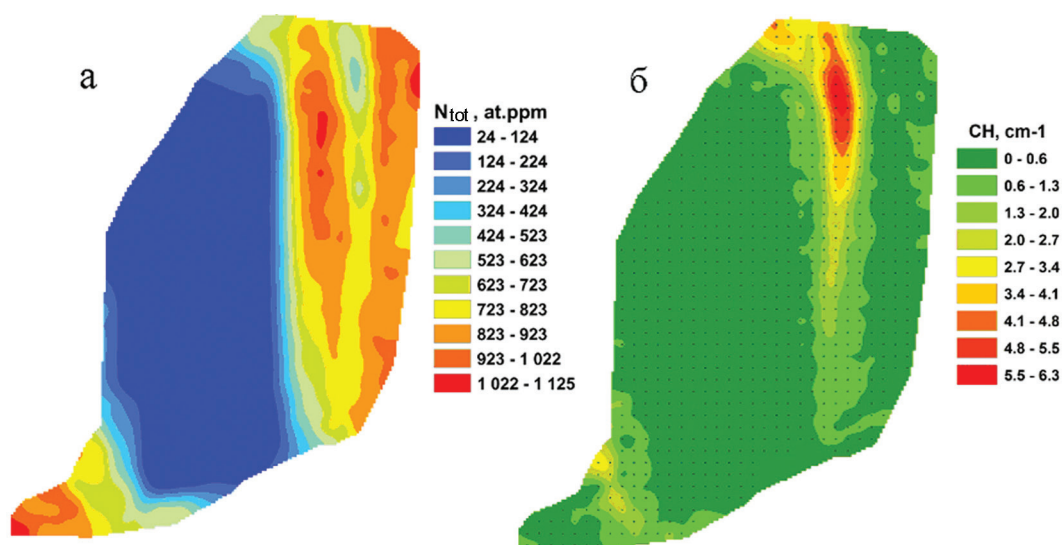


Рис. 3. Зональное распределение примеси азота (а) и водорода (б) в алмазе ксенолита N-1 из трубки Нюрбинская.

ся оторочка, представленная хлоритизированным флогопитом. Кристаллы часто имеют уплощенную и ассиметричную форму, обусловленную, по нашему мнению, ростом в ограниченном пространстве с очевидным наложенным характером алмазов в ксенолите. В некоторых эклогитовых ксенолитах отмечены скопления алмазов, которые образуют отдельные цепочки и прожилки.

Поздние генерации широко развиты в алмазах Накынского поля, определяя типоморфные характеристики кристаллов из кимберлитовых трубок этой территории. Так, например, ксенолит N1 по составу граната отвечает высокоглиноземистому эклогиту, что подтверждается также присутствием единичных зёрен корунда (Spetsius et al., 2008). На рисунке 3 показано распределение примеси азота и водорода по объёму алмаза из этого ксенолита. По концентрации азота выделяется относительно однородная внутренняя область с очень малым содержанием азота – около 50 at. ppm с 10–20 % в В-форме (рис. 3 а). Эта область, являющаяся геометрическим центром кристалла, резко сменяется следующей зоной с высокими концентрациями примесей азота и водорода (около 1000 at. ppm и более 6.3 см<sup>-1</sup>, соответственно). Поглощение полосы на 3107 см<sup>-1</sup> в центральной и периферийной областях практически не регистрируется (рис. 3 б).

Области выделенной ранней генерации алмазов в разных вариациях обнаружены практически во всех эклогитовых кристаллах трубки Удачная. Выявленная взаимосвязь между количеством неизменного граната эклогита и проявленностью этой зоны указывает на возможное совместное формирование эклогитов и алмазов этой генерации. Можно предположить, что первая генерация эклогитовых алмазов из ксенолитов образована в конце архея при формировании эклогитовых и перидотитовых мантийных пород.

По всем признакам, на позднем этапе алмазообразования уже происходило заметное преобразование мантийных пород. Связь между содержанием алмазов поздней генерации и количеством Crx в эклогитах, а также распространенность алмаза в виде включений в Crx, позволяют утверждать, что образование алмаза связано с этим этапом метасоматоза.

Как отмечено при исследовании примесного состава пластинок алмазов, каждая новая генерация алмазного вещества сопровождается всплеском содержания примеси водорода в структуре алмаза (Спеццус и др., 2015). Водороду в развитии Земли отводится ведущая роль, он участвует в образовании минералов, способствует миграции элементов, влияет на направленность геохимических процессов мантии и, вероятно, является основным компонентом флюидов, ответственных за рост алмазов в процессе метасоматоза.

Существуют признаки, что процессы глубинного метасоматоза проявляются неоднократно, имеют различную геохимическую специализацию и могут существенно различаться как уровнем концентрации

и соотношениями несовместимых элементов, так и алмазопродуктивностью. В пользу многократного проявления глубинного метасоматоза мантийных пород свидетельствуют широкий диапазон значений модельного возраста алмазов и мантийных минералов. Полученные результаты ещё раз убедительно свидетельствуют о том, что процессы природного алмазообразования связаны с эволюцией химического состава литосферной мантии, включающей этапы частичного плавления и метасоматоза.

### Заключение

Анализ особенностей внутреннего строения алмазов разного генезиса, изменения их примесного состава по объёму кристаллов показал, что эклогитовые и перидотитовые кристаллы по физическим характеристикам, внутреннему строению и другим особенностям отличаются между собой. Среди кристаллов эклогитового генезиса много зональных алмазов с признаками мультстадийного роста, в них часто наблюдаются области с высокими концентрациями азота в А-форме и водорода. Перидотитовые алмазы в основном мало- и среднеазотистые, процентное содержание азота в В-форме выше, чем в эклогитовых кристаллах, в них редко фиксируются признаки прерывания роста. Для эклогитов установлена взаимосвязь между их минеральным составом и структурными характеристиками алмазов. Для малоизмененных эклогитов с высоким содержанием гранатов характерны алмазы с высоким параметром  $Kt$  – ранней генерации. Области или кристаллы поздних генераций широко присутствуют в ксенолитах с рутилом или большим количеством клинопироксена. Сравнение спектральных особенностей кристаллов из ксенолитов разного генезиса и алмазной продукции кимберлитовых трубок подтверждает большой вклад в совокупность алмазов ряда месторождений кристаллов эклогитового парагенезиса. Ряд фактов свидетельствует в пользу образования большей части алмазов эклогитового парагенезиса в процессе мантийного метасоматоза из флюида или флюид-расплава.

### Литература

- Рагозин А.Л., Зедгенизов Д.А., Шацкий В.С., Орихаши Ю., Агашев А.М., Каги Х.* U-Pb-возраст рутила из ксенолита эклогита кимберлитовой трубки Удачная // ДАН. 2014. Т. 457. № 2. С. 213–216.
- Соболев Н.В.* Глубинные включения в кимберлитах и проблема состава верхней мантии. Новосибирск: Наука, 1974. 264 с.
- Соболев Е.В., Лисойван В.И.* Азотные центры и рост кристаллов природного алмаза // Проблемы петрологии земной коры и верхней мантии. Новосибирск: Наука, 1978. С. 245–255.
- Снециус З.В.* Мантийные ксенолиты – источник алмазов и ключ к их происхождению // Проблемы прогнозирования и поисков месторождений алмазов на закрытых территориях. Якутск: изд-во ЯНЦ СО РАН, 2008. С. 39–45.
- Снециус З.В., Серенко В.П.* Состав континентальной верхней мантии и низов коры под Сибирской платформой. М.: Наука, 1990. 272 с.
- Снециус З.В., Богущ И.Н., Ковальчук О.Е.* ИК-картирование алмазных пластин из ксенолитов эклогитов и перидотитов трубки Нюрбинская, Якутия: генетические следствия // Геол. и геофиз. 2015. № 56. С. 301–310.
- Boyd S.R., Kiflawi I., Woods G.S.* Infrared absorption by the B nitrogen aggregation in diamond // Philos. Mag., 1995. В. 72. P. 351–361.
- Evans T.* Aggregation of nitrogen in diamond // The properties of natural and synthetic diamond. Edit by Field J.E. 1992. P. 259–290.
- Spetsius Z.V. and Taylor L.A.* Partial melting in mantle eclogite xenoliths: connection with diamond genesis // International Geology Review. 2002. V. 44. P. 973–987.
- Spetsius Z.V., Taylor L.A.* Diamonds of Siberia: Photographic evidence for their origin. Tranquility Base Press, Lenoir City, Tennessee, USA, 2008, 278 p.
- Spetsius Z.V., Taylor L.A., Valley J.W., De Angelis M.T., Spicuzza M., Ivanov A.S. and Banzeruk V.I.* Diamondiferous xenoliths from crustal subduction: garnet oxygen isotopes from the Nyurbinskaya pipe, Yakutia // Eur. Jour. Mineral. 2008. V. 20. P. 375–385.
- Spetsius Z.V., Kovalchuck O.E. and Bogush I.N.* Properties of diamonds in xenoliths from kimberlites of Yakutia: Implication to their origin and exploration // Ext. Abstr. of 10th Intern. Kimb. Conf, Bangalore, India, 2012, No. 10IKC-51.
- de Weerd F., Pal'yanov Y.N., Collins A.T. (2003)* Absorption spectra of hydrogen in  $^{13}\text{C}$  diamond produced by high-pressure, high-temperature synthesis // J. Phys. Condens. Matter. V. 15. P. 3163–3170.