

ИК-КАРТИРОВАНИЕ АЛМАЗНЫХ ПЛАСТИН ИЗ КСЕНОЛИТОВ ЭКЛОГИТОВ И ПЕРИДОТИТОВ ТРУБКИ НЮРБИНСКАЯ (Якутия): ГЕНЕТИЧЕСКИЕ СЛЕДСТВИЯ**З.В. Специус, И.Н. Богущ, О.Е. Ковальчук***Научно-исследовательское геолого-разведочное предприятие АК АЛРОСА,
678170, Мирный, Чернышевское шоссе, 16, Россия*

Представлены результаты исследований ИК-поглощения, фото- и катодолуминесценции алмазов из перидотитовых и эклогитовых ксенолитов тр. Нюрбинская. Проанализированы особенности внутреннего строения алмазов разного генезиса и изменения их примесного состава по объему кристаллов. Проведено сравнение спектральных характеристик кристаллов из ксенолитов разного генезиса и кимберлитов этой трубки. Исследование внутреннего строения алмазов (класс $-4...+2$ мм) выполнено для 38 эклогитовых и 4 перидотитовых кристаллов, из которых были изготовлены плоскопараллельные пластинки толщиной 0.4—0.8 мм. В работе приведены результаты детального исследования алмазов с различными характеристиками из четырех эклогитовых и двух перидотитовых ксенолитов тр. Нюрбинская.

Площадное картирование алмазных пластин из ксенолитов показало варьирующее содержание общего азота и его агрегации, а также водорода и их зональное распределение в исследованных кристаллах. Перидотитовые алмазы обычно мало- и среднеазотистые, с высокой степенью агрегации азота и малыми концентрациями водорода, у них редки признаки прерывания роста. Кристаллы из эклогитов характеризуются высокими концентрациями азота и водорода, среди них много зональных алмазов с признаками мультистадийного роста, что указывает на наличие нескольких генераций роста. Состав включений и особенности распределения примеси азота и его агрегации в алмазах свидетельствуют о большом вкладе кристаллов эклогитового парагенезиса в совокупность алмазной продукции тр. Нюрбинская. Особенности внутреннего строения кристаллов из эклогитов, расположение алмазов в ксенолитах эклогитов и ряд других фактов свидетельствуют в пользу их более позднего, по сравнению с минералами ксенолитов, образования в процессе метасоматоза из флюида или флюид-расплава, что определило типоморфизм алмазов этого коренного источника и обусловило его высокую продуктивность.

*Алмаз, мантийные ксенолиты, эклогиты, перидотиты, примеси азота и водорода.***FTIR MAPPING OF DIAMOND PLATES OF ECLOGITIC AND PERIDOTITIC XENOLITHS FROM THE NYURBINSKAYA PIPE (Yakutia): GENETIC IMPLICATIONS****Z.V. Spetsius, I.N. Bogush, and O.E. Kovalchuk**

Results of studies of IR absorption and photo- and cathodoluminescence of diamonds from peridotitic and eclogitic xenoliths from the Nyurbinskaya pipe. The internal structure of diamonds of different genesis and the changes in their impurity composition throughout the crystals are analyzed. A comparison is made for the spectral parameters of crystals from xenoliths of different genesis and from kimberlites of this pipe. The internal structure of 38 eclogitic and 4 peridotitic diamond (class -4 to $+2$ mm) crystals is examined on their 0.4–0.8 mm thick plane-parallel plates. We present results of a detailed study of diamonds with different characteristics from four eclogitic and two peridotitic xenoliths from the Nyurbinskaya pipe.

Areal mapping of diamond plates from xenoliths showed varying contents of total nitrogen, its aggregates, and hydrogen and their zonal distribution in the investigated crystals. Peridotitic diamonds are characterized by low and medium nitrogen contents, a high degree of nitrogen aggregation, and low contents of hydrogen and seldom show signs of growth interruption. Eclogitic diamonds have high contents of nitrogen and hydrogen; there are many zoned diamonds with signs of multistage growth among them, which indicates that they are of several growth generations. The composition of inclusions, the distribution of nitrogen impurity, and the degree of nitrogen aggregation in diamonds testify to a predominance of eclogite paragenesis crystals in the Nyurbinskaya pipe. The internal structure of eclogitic paragenesis crystals, the arrangement of diamonds in eclogitic xenoliths, and other facts argue for their later, compared with peridotitic xenolith diamonds, formation from fluid or fluid-melt during metasomatism. This determined the typomorphism of diamonds and high productivity of this pipe.

*Diamond, mantle xenoliths, eclogites, peridotites, nitrogen and hydrogen impurities***ВВЕДЕНИЕ**

Вскоре после обнаружения южно-африканских кимберлитовых трубок в них были найдены и кратко охарактеризованы материнские алмазоносные породы — эклогиты, которым первоначально не было уделено должного внимания [Williams, 1932; Bonney, 1989]. Практически только после открытия

© З.В. Специус, И.Н. Богущ, О.Е. Ковальчук, 2015

DOI: 10.15372/GiG20150125

кимберлитовых трубок в Якутии началось системное и детальное исследование этих уникальных образований, начало этому было положено пионерными работами В.С. Соболева с соавторами [Соболев, 1960; Соболев и др., 1969, 1972] и продолжено в дальнейшем другими исследователями [Бобриевич и др., 1959; Бартошинский, 1960; Соболев, Кузнецова, 1966; Пономаренко и др., 1973; Соболев, 1974; Пономаренко, Специус, 1976; Соболев и др., 1998], причем необходимо подчеркнуть, что алмазоносные перидотиты впервые были обнаружены и охарактеризованы российскими учеными [Соболев и др., 1969; Pokhilenko et al., 1977; Пономаренко и др., 1980].

Следует отметить, что несмотря на более чем 100-летний период после открытия первых кимберлитовых трубок в Южной Африке, а затем в России, Канаде и других провинциях мира и наличие десятков книг и сотен публикаций по исследованию кимберлитов и алмазов, проблема происхождения алмазов полностью не решена и является предметом многих дискуссий [Соболев, 1960; Соболев и др., 1984; Meyer, 1985; Ireland et al., 1994; Bulanova, 1995; Taylor et al., 1998, 2000; Cartigny, 2005; Stachel, Harris, 2008; Spetsius, Taylor, 2008; Thomassot et al., 2009]. На рубеже прошлого и нынешнего столетий произошли существенные успехи в изучении содержащихся в кимберлитах мантийных ксенолитов, в первую очередь с алмазами, а также алмазов из различных месторождений, что было продемонстрировано на последних четырех международных кимберлитовых конференциях (1998—2012 г.) [Navon, 1999; Pearson et al., 1999; Spetsius, 1999, 2004; Anand et al., 2004; Shirey et al., 2004; Spetsius et al., 2009, 2012]. С помощью ИК-спектроскопии, фото- и катодолюминесценции установлено сложное внутренне строение подавляющего большинства алмазов из кимберлитов и получены новые данные по возрасту алмазов и мантийных пород, свидетельствующие о достаточно широком временном интервале их формирования, в первую очередь алмазов эклогитового парагенезиса [Shirey et al., 2013; Bulanova et al., 2014].

Достоверно алмазоносными материнскими породами, без сомнения, можно считать ксенолиты мантийных пород, которые содержат в том или ином количестве алмазы и найдены в ряде кимберлитовых трубок Якутской провинции как среди ультрамафитов, так и среди различных типов эклогитов [Соболев и др., 1984; Специус, 2008; Spetsius, Taylor, 2008]. Исследованию алмазов из эклогитов различных типов и посвящена данная публикация, базирующаяся на детальном исследовании физических свойств алмазов из уникальной коллекции ксенолитов (160 образцов) из тр. Нюрбинская, особенности минералогии которых освещались ранее [Специус и др., 2006; Spetsius et al., 2008].

Трубка Нюрбинская — это одно из богатейших коренных месторождений Якутии с высоким качеством алмазного сырья. Она расположена в верховье правого притока р. Накын, приурочена к осевой линии диагонального разлома на глубине 60—80 м от дневной поверхности и перекрыта отложениями позднеэриасового-раннеюрского возраста (T_3 — J_{1dh} и J_{1uk}). Ее возраст внедрения составляет 364 млн лет [Агашев и др., 2004] и соответствует интервалу D_3 , установленному для главных месторождений алмазов Якутии: Мир, Интернациональная, Юбилейная, Сытыканская [Девис и др., 1980] и Удачная [Кинни и др., 1997]. Кимберлиты данной трубки существенно отличаются от пород других полей, прежде всего, чрезвычайно низким содержанием пикроильменита, малыми концентрациями Ti, Fe, K, Rb, P и других примесных элементов. По Nb-Sr-изотопным характеристикам они схожи с кимберлитами группы I, но по минералогии, петрографии и ряду геохимических характеристик их можно отнести к II группе [Корнилова и др., 2001]. Мантийные ксенолиты размерами от 2 до 25 см встречаются во всех типах и фазах кимберлитов, причем относительно высокий процент из них содержит алмазы. В свою очередь, алмазы тр. Нюрбинская, как и других тел Накынского поля, уникальны по своим морфологическим и структурным характеристикам. Об этом свидетельствуют наши исследования более 11000 кристаллов из геологических коллекций и выборок кристаллов при эксплоразведке месторождений и из текущей добычи, а также литературные данные [Богущ и др., 2001; Специус и др., 2006; Богущ, Кедрова, 2009]. Среди них много высокоазотистых октаэдров и кристаллов переходных форм с фиолетовой фотолуминесценцией, являющейся следствием сочетания голубого и красного свечения. Особенностью популяции алмазов из трубок Накынского поля является наличие кристаллов с тонкой зеленоватой оболочкой «coated diamond» и преобладание алмазов с эклогитовым парагенезисом включений [Митюхин, Специус, 2005], а также распространенность алмазов с розово-фиолетовой фотолуминесценцией и с зелеными фантомами внутри. Детальное изучение особенностей алмазов, в том числе их внутреннего строения, в результате картирования распределения структурных дефектов в пластинках алмазов из ксенолитов мантийных пород с известным парагенезисом из кимберлитовой тр. Нюрбинская представляет несомненный практический и научный интерес. Установление особенностей типоморфизма и физических характеристик кристаллов в различных типах ксенолитов мантийных пород позволит в последующем разбраковать кристаллы из кимберлитов по исходным типам материнских пород и установить вероятный вклад различных парагенетических ассоциаций в алмазоносность кимберлитов как Среднемархинского, так и других районов Якутской провинции. Исследование внутренней неоднородности кристаллов, концентрации и распределения по объему структурных дефектов, непосредственно связанных с условиями роста и постростового нахождения кристаллов, позволяет выяснить их ростовую исто-

рию и получить ценную информацию о процессах в мантии при высоких температурах и давлениях, что мы и попытались показать в данной статье.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для решения поставленной задачи путем разрушения породы были извлечены алмазы из уникальной коллекции ксенолитов различного состава тр. Нюрбинская [Специус и др., 2006]. Исходные ксенолиты представляли собой нодулы овальной формы, состоящие из относительно неизмененного граната и редких псевдоморфоз полностью измененного клинопироксена и в ряде случаев напоминали собой мегакристы (рис. 1). Алмазы в большинстве случаев располагались на поверхности ксенолитов в виде единичных кристаллов или сростков двух кристаллов и только в обр. N-60 присутствовало четыре алмаза. Отнесение исходной породы к эклогитовому или перидотитовому типу было осуществлено на основании данных по химическому составу граната [Специус и др., 2006]. Детальная характеристика образцов и химические составы гранатов, в том числе данные по изотопному составу кислорода, приведены в работе [Spetsius et al., 2008]. Состав породообразующих гранатов определялся с помощью рентгеновского микроанализатора с электронным зондом Superprobe JXA-8800R АК «АЛРОСА» в стандартных условиях. При этом разрешающая способность составляла 133 эВ, ускоряющее напряжение — 20 кВ, ток зонда — 10 нА, диаметр пучка 1—2 мкм. Для исследования внутреннего строения алмазов из имеющейся коллекции было отобрано 38 алмазов из эклогитов и 4 из перидотитов, представленных бесцветными кристаллами (класс $-4...+2$ мм), из которых были изготовлены плоскопараллельные пластинки толщиной 0.45—0.85 мм, проходящие ориентировочно через геометрический центр кристаллов. Изучение морфологии алмазов проводилось с использованием бинокулярного микроскопа фирмы Leica. Для выявления особенностей их внутреннего строения использовался метод люминесцентной спектроскопии. Фотолюминесценция (ФЛ) алмазов возбуждалась азотным лазером ЛГИ-505, работающим на длине волны 337 нм. Спектры ФЛ не регистрировались, поэтому анализировался только цвет свечения. Катодолюминесценция (КЛ) алмазов изучена с помощью сканирующего микроскопа фирмы Цейс в центре GEMOC университета Маквори, Сидней.

Примесный состав алмазов исследовался методом ИК-спектроскопии. Регистрацию спектров ИК-поглощения для изготовленных пластинок проводили методом детального картирования (около 800 точек) с шагом около 50 мкм и с разрешением 1 см^{-1} на Фурье спектрометре VERTEX-70 фирмы Bruker с микроскопом Nuregion 2000. По ИК-спектрам, нормированным по поглощению в двухфононной области, определялись концентрации А-, В1-, В2-дефектов алмазов [Boyd et al., 1994, 1995]. Для расчета спектров алмаза смешанного IaAB типа применяли разложение суммарного ИК-спектра на индивидуальные А- и В-системы полос поглощения, полученные с природных алмазов чистых типов IaA и IaB. Суммарный азот ($N_{\text{сум.}}$) определялся сложением выявленных концентраций этой примеси в С-, А-, В-формах, так как доля азота в В2 (platelets) не установлена. Предполагается, что дефект В2 образуется совместно с дефектом В1 [Woods, 1986; Kiflawi, Bruley, 2000], а размер этих пластинчатых дефектов коррелирует с положением максимума его полосы [Соболев и др., 1968]. Содержание В2-дефектов оценивалось по коэффициенту поглощения полосы на $1358\text{—}1380 \text{ см}^{-1}$, а примеси водорода, связанного с кристаллической решеткой (группа С-Н), — на 3107 см^{-1} [Соболев, Лисойван, 1971; Woods et al., 1983; Weerd et al., 2003].

Картирование пластинок по указанным ИК-характеристикам проводилось с использованием программы «ArcMap, version 9.3» и стандартных настроек при построении изолиний с равными интервалами.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Как отмечено выше, идентификация алмазосодержащих ксенолитов и отнесение к тому или иному типу пород осуществлялась в первую очередь на основании состава породообразующего граната (таблица), поскольку остальные минералы либо полностью изменены, либо присутствуют исключительно редко в виде единичных зерен. В данной работе мы приводим результаты детального исследования алмазов с различными характеристиками из четырех эклогитовых и двух перидотитовых ксенолитов тр. Нюрбинская. При анализе результатов учитывались также полученные нами ранее данные по другим пластинкам и ИК-параметры алмазов из коренных тел Среднемархинского района. Сделанные в работе выводы базируются на приведенной в статье и указанной выше фактуре.

Перидотитовый ксенолит N-98. Исходный образец представлял собой практически мегакрист фиолетового граната (с содержанием 9.57 мас. % Cr_2O_3), что позволяет отнести его к дунит-гарцбургитовому типу [Соболев и др., 1969]. Из ксенолита был извлечен октаэдр с тригональными слоями роста, из которого была изготовлена пластинка толщиной 0.45 мм. Алмаз имеет фиолетовую ФЛ с малым ярко-зеленым фантомом в центре кристалла, причем визуально признаков прерывания роста алмаза на

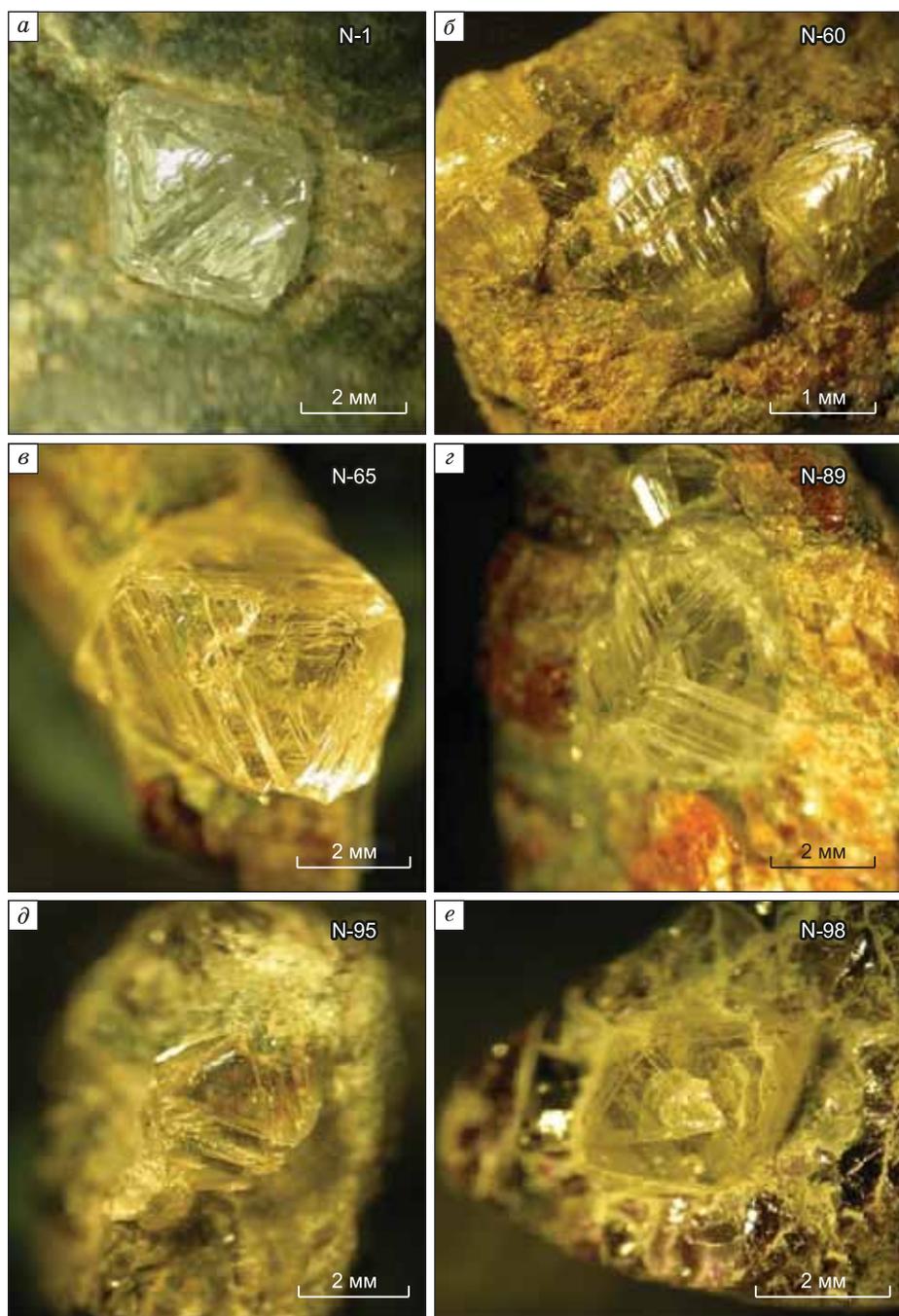


Рис. 1. Алмазсодержащие ксенолиты из тр. Нюрбинская.

a — обр. N-1, по составу граната отвечает высокоглиноземистому эклогиту. Алмаз представлен бесцветным гладкогранным октаэдром, размер — 2.4×1.8 мм; *б* — обр. N-60, по составу граната отвечает железисто-магнезиальному эклогиту. Алмазы представлены четырьмя серыми октаэдрами с полицентрическим строением граней, размер 2—3 мм. Достаточно отчетливо видны каналы травления и линии скольжения, секущие кристаллы, а также оторочки вокруг алмазов, выполненные хлоритизированным флогопитом; *в* — обр. N-65, по составу граната отвечает магнезиальному эклогиту. Алмаз представлен кристаллом октаэдрического габитуса с полицентрическим строением граней, размер кристалла 3 мм; *г* — обр. N-89, по составу граната отвечает железисто-магнезиальному эклогиту. Алмаз представлен прозрачным уплощенным октаэдром с полицентрическим строением граней, содержит небольшой восток, размер — 3.5×2.5 мм; *д* — обр. N-95, по составу граната отвечает дунит-гарцбургиту. Алмаз представлен прозрачным грубоступенчатым октаэдром, размер — 2.5×1.5 мм; *е* — обр. N-98, по составу граната отвечает дунит-гарцбургиту. Алмаз представлен прозрачным октаэдром с пластинчатым строением граней, размер — 2.2×1.5 мм.

Химические составы гранатов в ксенолитах с алмазами из тр. Нюрбинская

№ обр.	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	NiO	Сумма
N-1	40.19	0.40	21.69	0.12	10.63	0.16	8.13	17.54	0.19	0.02	99.08
N-60	40.2	0.54	21.21	0.09	17.5	0.3	11.99	7.05	0.18	0.01	99.09
N-65	41.61	0.28	21.2	0.06	18.19	0.39	12.07	4.3	0.12	0.01	98.24
N-89	39.45	0.33	21.38	0.06	21.83	0.44	10.67	4.53	0.12	0.02	98.84
N-95	40.39	0.41	14.66	10.5	7.15	0.47	17.84	6.88	0.06	0.01	98.40
N-98	41.14	0.07	15.79	9.57	7.42	0.45	21.12	3.17	0.06	0.01	98.82

краю фантома не наблюдается. Концентрация азота и его процентное содержание в В-форме от центра к краю кристалла постепенно понижается от 1380 до 360 ат. ppm и с 45 до 28 % соответственно (рис. 2). Коэффициент поглощения полосы В2-дефекта (platelets) также равномерно понижается от 21.1 до 4.5 см⁻¹, коррелируя с общим содержанием азота. Положение максимума основной полосы этого пластинчатого дефекта постепенно смещается с 1367 см⁻¹ в центре на 1364 см⁻¹ к краю пластинки. Поглощение линии на 3107 см⁻¹, которую связывают с примесью водорода, меняется скачкообразно от 6.2 см⁻¹ (для внутреннего фантома с зеленой ФЛ) до нулевых значений в области с фиолетовой ФЛ.

Перидотитовый ксенолит N-95. Ксенолит дунит-гарцбургитового состава (с содержанием в гранате 10.5 мас. % Cr₂O₃, см. таблицу), в котором присутствовал грубоступенчатый октаэдр (см. рис. 1), из которого была изготовлена пластинка толщиной 0.8 мм. Алмаз имеет слабую фиолетовую ФЛ с малым желто-фиолетовым фантомом в центре кристалла и секториальное строение внутренней области. Концентрация азота и его процентное содержание в В-форме от центра к краю кристалла понижается от 410 до 145 ат. ppm и с 24 до 16 % соответственно (см. рис. 2). Коэффициент поглощения полосы В2-дефекта понижается от 3 до 0.5 см⁻¹, коррелируя с общим содержанием азота. Положение максимума основной полосы этого пластинчатого дефекта постепенно смещается с 1370 на 1361 см⁻¹ к краю пластинки. Поглощение линии на 3107 см⁻¹ в центре около 1.9 см⁻¹, затем резко снижается до нулевых значений к периферии кристалла (см. рис. 2).

Эклогитовый ксенолит N-60. Эклогит сложен почти мономинеральным оранжевым гранатом, имеющим округлые очертания (см. рис. 1). В результате предыдущих исследований установлено, что ксенолит химически неоднороден: в нем широко варьирует состав зональных зерен гранатов [Spetsius et al., 2008]. Гранаты в ксенолите представлены низкокальциевым пиропом, на диаграмме Fe—Mg—Ca гранат соответствует полю эклогитовых гранатов группы В с повышенным содержанием Na₂O — 0.18 мас. %. От центра к краевой зоне зерен граната отмечается увеличение содержания FeO от 15.23 до 16.93 мас. % и CaO от 6.13 до 7.20 мас. % и уменьшение количества MgO от 14.40 до 12.27 мас. %. Алмазы расположены в межзерновом пространстве, вокруг них отмечаются прерывистые оторочки, сложенные вторичными минералами, представленными преимущественно хлоритизированным флогопитом. Вокруг зерен граната наблюдаются келифитовые каймы, состоящие из флогопита и шпинели.

Из ксенолита был извлечен октаэдр с полицентрическим строением граней, из которого была изготовлена пластинка толщиной 0.45 мм. Алмаз имеет внутренний фантом с яркой синей ФЛ, который сменяется областью со слабым фиолетовым свечением. Концентрация азота и его процентное содержание в В-форме от центра к краю внутренней области понижается от 790 до 60 ат. ppm и с 60 до 10 % соответственно (рис. 3). Коррелируя с общим содержанием азота понижается и коэффициент поглощения полосы В2-дефекта от 19.0 до 5.0 см⁻¹, а положение максимума В2-полосы при этом постепенно смещается с 1365 на 1361 см⁻¹. На краю пластинки малоазотистая область резко сменяется другой зоной с высокими (более 700 ат. ppm) концентрациями азота и с 25 %-м содержанием этой примеси в В-форме (см. рис. 3). Интенсивность линий В2-дефекта небольшая (2.5—0.5 см⁻¹), а максимум полосы расположен уже на 1372—1382 см⁻¹. На границе перехода от центрального внутреннего фантома с яркой синей ФЛ к области со слабым фиолетовым свечением меняется скачкообразно (от 0.3 до 3.0 и опять до 0.1 см⁻¹) поглощение линии на 3107 см⁻¹ в ИК-спектрах, выделяясь узкой полосой на рисунке распределения примеси водорода по алмазной пластинке (см. рис. 3).

Эклогитовый ксенолит N-65. Ксенолит, по составу граната отвечающий магнезиально-железистому эклогиту (см. таблицу), содержал октаэдр с полицентрическим строением граней, из которого была изготовлена пластинка толщиной 0.67 мм. Алмаз имеет ярко-зеленую зональную ФЛ, при этом в центре наблюдаются два расположенных рядом желто-зеленых фантома. Эти фантомы выделяются и по данным ИК-спектроскопии в виде высокоазотистых (около 800 ат. ppm) областей с большими концентрациями примеси водорода (поглощение линии на 3107 см⁻¹ около 17.0 см⁻¹) (см. рис. 3). Вероятно, они соответствуют зародышевым центрам двух кристаллов, сросшихся впоследствии. Причем в одном из них отмечается (по ФЛ, двупреломлению, ИК-характеристикам) внутренняя округлая область (по-видимому, ранний округлый алмаз) с содержанием азота около 440 ат. ppm и коэффициентами СН-полос

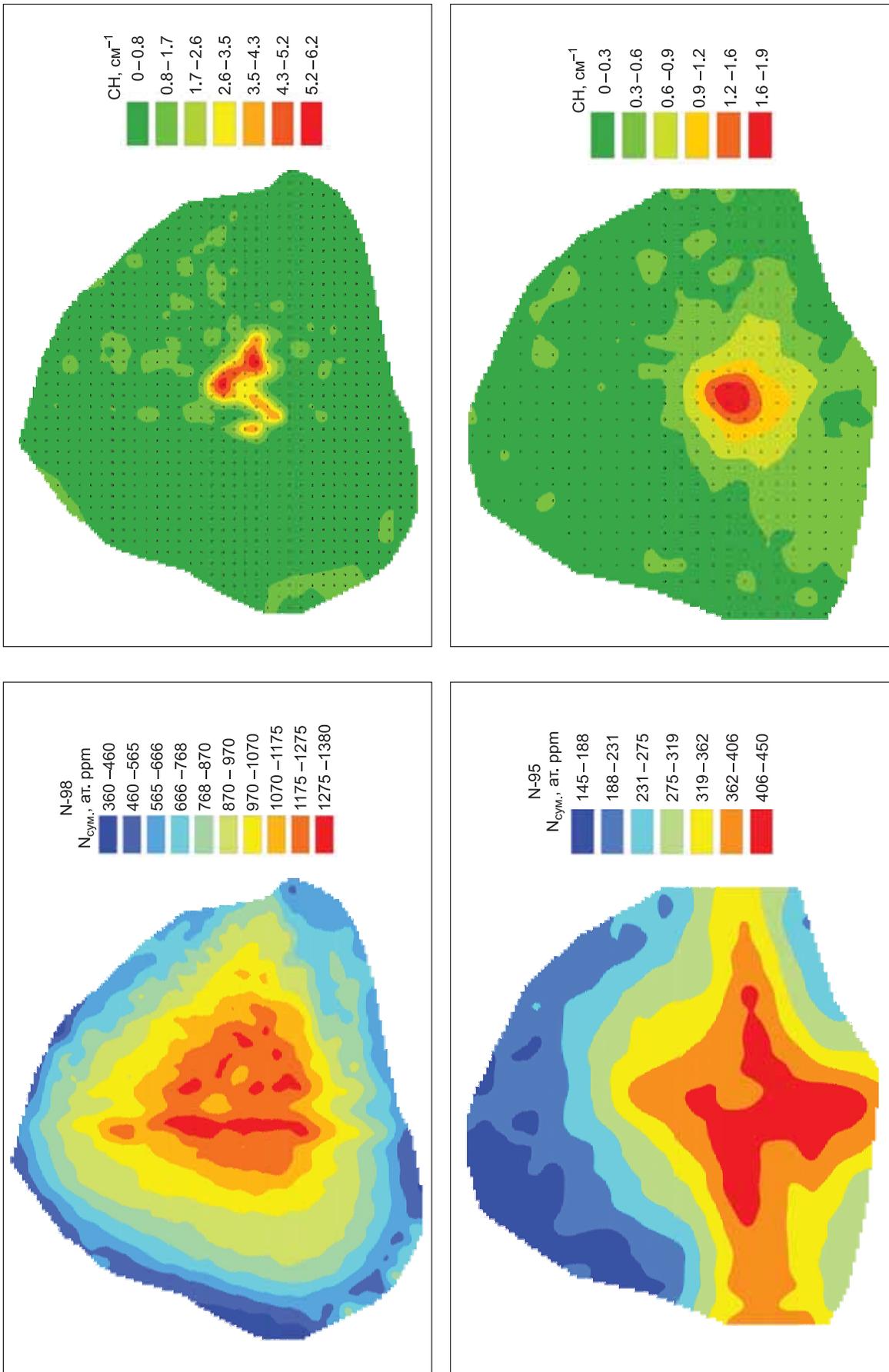


Рис. 2. Распределение примеси азота (ат. ppm) и водорода (cm^{-1}) по алмазным пластинкам из перидотитовых ксенолитов N-98 и N-95 с указанием точек измерения.

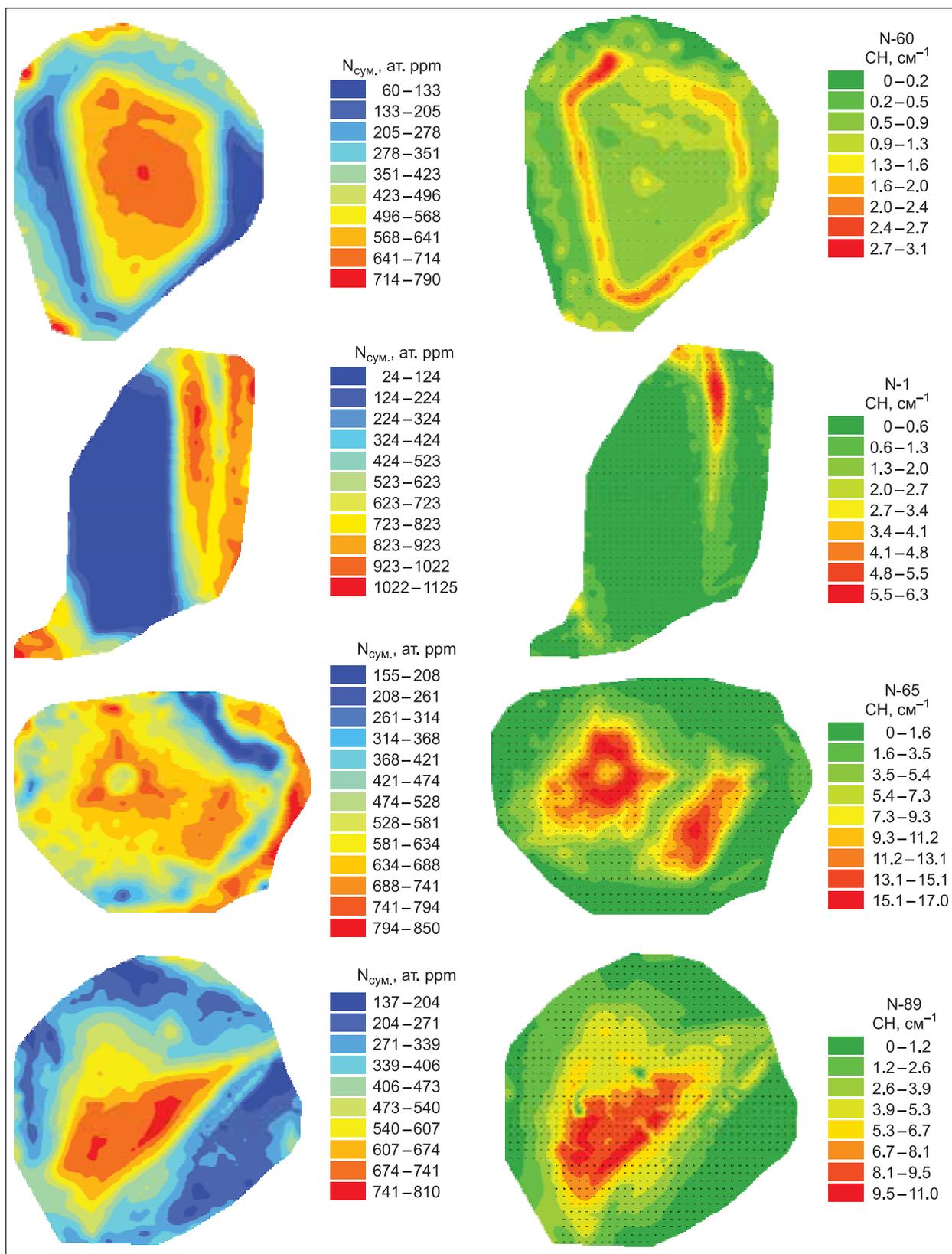


Рис. 3. Распределение примеси азота (ат. ppm) и водорода (cm^{-1}) по алмазным пластинкам из эклогитовых ксенолитов N-60, N-1, N-65 и N-89 с указанием точек измерения.

около 9 см^{-1} (см. рис. 3). Концентрация азота для этих двух зон, представляющих, вероятно, уже второй этап алмазообразования, в процессе роста меняется от 760 до 155 ат. ppm, а содержание азота в В-форме — от 25 до 15 % соответственно. Эти сросшиеся области резко сменяются крайней зоной с высокими (до 850 ат. ppm) концентрациями примеси азота. Скачкообразно от 6.0 до 0.5 см^{-1} , коррелируя с общим содержанием азота, меняется в ней и интенсивность полосы В2-дефекта. Коэффициент поглощения полосы на 3107 см^{-1} резко увеличивается до 17 см^{-1} в начале второй зоны, снижаясь затем до исчезновения к ее краю. Скачок (около 4 см^{-1}) концентрации водорода наблюдается и в начале крайней высокоазотистой области (см. рис. 3).

Эклогитовый ксенолит N-1. Ксенолит по составу граната отвечает высокоглиноземистому эклогиту, что подтверждается также присутствием единичных зерен корунда. Алмаз представлен бесцветным гладкогранным октаэдром переходной формы. Из кристалла была изготовлена пластинка толщиной 0.55 мм . Алмаз имеет слабую зеленую ФЛ с темно-зеленым фантомом в центре кристалла. По концентрации азота выделяется относительно однородная внутренняя область с очень малым содержанием азота — около 50 ат. ppm с 10-20 % в В-форме (см. рис. 3). Полосы поглощения В2-дефекта в ИК-спектрах этой области слабые — от 0.1 до 0.8 см^{-1} , а положение максимума полосы этого пластинчатого дефекта здесь $1357\text{—}1363 \text{ см}^{-1}$. Эта область, являющаяся геометрическим центром кристалла, резко сменяется следующей зоной с высокими (около 1000 ат. ppm) концентрациями основной примеси. Интенсивность полосы В2-дефекта также резко возрастает до 3.5 см^{-1} , а положение его максимума смещается на 1373 см^{-1} . Поглощение полосы на 3107 см^{-1} в центральной области не регистрируется, но резко увеличивается до 6 см^{-1} в начале второй зоны, снижаясь до исчезновения к периферии кристалла (см. рис. 3).

Эклогитовый ксенолит N-89. Из ксенолита магнезиально-железистого эклогита был извлечен прозрачный уплощенный октаэдр с полицентрическим строением граней, из которого была изготовлена пластинка толщиной 0.64 мм . Алмаз имеет визуально равномерную по всему объему слабую розово-фиолетовую ФЛ. Однако на КЛ-топограмме отчетливо проявлены кубические сектора роста, содержащие различные количества примесных центров, определяющих другой цвет и интенсивность свечения (рис. 4). Как следствие распределения структурных дефектов по зонам и секторам роста на КЛ-топограмме проявляется зональное внутреннее строение кристалла. По характеру свечения в режиме катодолюминесценции выделяется центральная ярко люминесцирующая область с нормальным механизмом роста и высокими содержаниями примесей азота и водорода и внешняя слабосветящаяся зона с тангенциальным ростом и малыми концентрациями примесей (см. рис. 4). Концентрация азота и его процентное содержание в В-форме от центра к краю внутренней зоны кристалла понижается от 810 до 400 ат. ppm и с 30 до 25 %, а внешней области — от 300 до 137 ат. ppm и с 20 до 12 % соответственно (см. рис. 3). Поглощение линии на 3107 см^{-1} меняется от 11.0 до 4.0 см^{-1} в первой и с 2.5 до 0.1 см^{-1} во второй области (см. рис. 3). Различия наблюдаются и для В2-центра: в центральной зоне интенсивность полосы и положение ее максимума меняются с геометрического центра от 7.0 до 2.5 см^{-1} и с 1376 на 1370 см^{-1} , а в октаэдрических секторах — от 2.5 до 0.1 см^{-1} к краю пластинки и с 1369 на 1363 см^{-1} соответственно.

Характер изменения концентрации азота и его процентного содержания в В-форме на границе кубоид—октаэдр в этом алмазе позволяет, исходя из экспериментально выведенных моделей и основ-

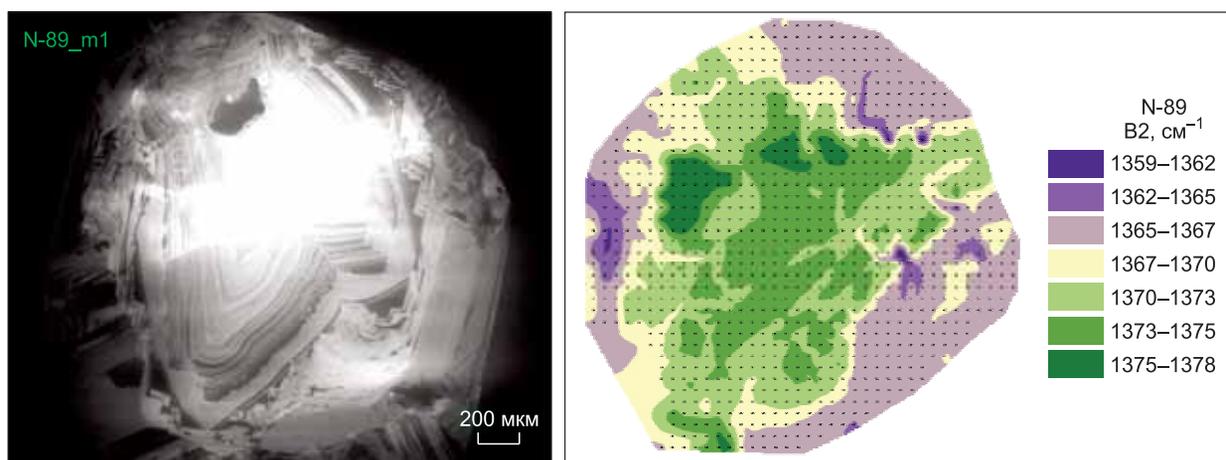


Рис. 4. Зональная структура алмаза N-89 по данным катодолюминесценции (КЛ-топограмма) и результатам определения положения максимума полосы В2-центра (platelets) в спектрах при ИК-картировании.

ных параметров кинетики агрегации азота в алмазе [Evans et al., 1982], предположить его непрерывную кристаллизацию со сменой нормального механизма роста на тангенциальный.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В результате комплексного изучения 160 мантийных ксенолитов различного генезиса и их алмазов установлено, что кристаллы из эклогитовых ксенолитов тр. Нюрбинская в большинстве случаев обогащены азотом. Эта примесь находится преимущественно в А-форме, а содержание азота в высокоагрегированной В-форме только в отдельных алмазах (ксенолит N-60) превышает 30 % от суммарного азота. Часто в них присутствуют зоны с высокими концентрациями примеси водорода (коэффициент поглощения полосы на 3107 см^{-1} варьирует от 3 до 17 см^{-1}). Алмазы этого генезиса обычно обладают фиолетовым свечением в УФ-лучах с ярко-зелеными фантомами внутри. Как по результатам исследования катодоллюминесценции, так и при картировании пластинок по структурным дефектам, определяемым по ИК-спектрам, часто наблюдается зональность таких кристаллов. Существенное различие в степени агрегации примеси в отдельных зонах некоторых кристаллов указывает на различные времена отжига (нахождения в мантийных условиях) этих областей [Evans et al., 1982]. Данный факт можно объяснить дискретностью образования алмазов в несколько временных этапов, соответствующих различным генерациям образования алмазного вещества.

Алмазы из перидотитов обычно мало- и среднеазотистые с несколько большей по сравнению с эклогитовыми агрегацией азота. Однако среди них также встречен кристалл (ксенолит N-98) с концентрацией азота в центре около 1300 ат. ppm (см. рис. 2). Слабые полосы ИК-поглощения на 3107 см^{-1} выявлены только в центральных областях перидотитовых кристаллов, что свидетельствует о малых концентрациях водорода. В изученных кристаллах из перидотитовых ксенолитов признаки дискретности их образования не выявлены, предположительно, они соответствуют одной генерации.

Общей тенденцией, установленной для выделяемых вероятных генераций алмазов по данным для всех изученных кристаллов, является последовательное уменьшение суммарного содержания азота и его агрегации от центра соответствующих областей к их краям. При этом цвет ФЛ областей больше зависит от степени агрегации, чем от концентрации азота. Отмечено, что области с повышенными концентрациями примеси водорода часто сопровождаются ярким зеленым свечением в УФ-лучах. Интересным фактом является резкий скачок концентрации примеси водорода в начале образования большинства новых зон, соответствующих отдельным генерациям (см. рис. 3). На наш взгляд, эти данные свидетельствуют о смене окислительно-восстановительных условий и флюидного режима в ходе последовательных стадий кристаллизации алмазов, которые, вероятно, соответствуют отдельным генерациям. Для начальных стадий образования этих генераций алмаза, по-видимому, характерны восстановительные условия. Несмотря на указанные систематические колебания концентраций примесей, для каждой новой генерации характерны «свои» соотношения азот—водород, а наиболее распространенной является область с азотом около $800\text{—}1000\text{ ат. ppm}$ и коэффициентами поглощения полосы на 3107 см^{-1} около $7\text{—}15\text{ см}^{-1}$. Флуктуационная смена режимов в процессе роста алмазов и установленные закономерности однозначно указывают на метасоматическую природу образования эклогитовых алмазов.

Как показали проведенные нами ранее исследования, для популяции алмазов из кимберлитов этой трубки типичны высокоазотистые кристаллы с повышенными концентрациями примеси азота в А-форме, с наличием областей с фиолетовой ФЛ и зелеными фантомами внутри [Богущ и др., 2001; Митюхин, Специус, 2005; Богущ, Кедрова, 2009]. Отмечается высокий процент (около 10 %) кристаллов IV разновидности, по Ю.Л. Орлову [1984], с зеленовато-желтой «оболочкой». В целом характеристики изученных алмазов из ксенолитов полностью соответствуют характеристикам алмазов из кимберлитов тр. Нюрбинская. Высокая частота встречаемости зональных кристаллов и/или преобладание в зональных образцах областей с повышенными концентрациями примеси азота и малым процентом примеси в В-форме (соответственно, относительно небольшие времена нахождения при высоких температурах) указывают на большой вклад в совокупность алмазной продукции этой трубки кристаллов поздних генераций роста. Несомненно также метасоматический генезис оболочек «coats» на алмазах [Araújo et al., 2009], причем, судя по минеральным включениям, это «эклогитовые» алмазы.

Отмеченные факты позволяют предположить высокий процент кристаллов эклогитового генезиса в популяции алмазов тр. Нюрбинская и свидетельствуют в пользу их образования в процессе метасоматоза из флюида или флюид-расплава, что, вероятно, определило характерный типоморфизм алмазов этого коренного источника и обусловило его высокую продуктивность, равно как и высокое содержание алмазов в других телах Накынского кимберлитового поля.

Для алмазов перидотитового парагенезиса метасоматический рост алмазов более проблематичен, однако ряд фактов также свидетельствует в пользу их возможного образования из метасоматирующе-

го флюида [Thomassot et al., 2009], но при этом предполагается их гораздо более древний возраст и рост в условиях, вероятно, одноактного мантийного метасоматоза [Stachel, Harris, 2008]. В настоящее время гипотеза ксеногенной природы алмазов не вызывает принципиальных возражений и является практически неоспоримой парадигмой [Shirey et al., 2013]. Однако существует ряд дискуссионных моментов в интерпретации изотопных и других геохимических исследований в приложении к расшифровке генезиса алмазов. Одним из таких моментов остается вопрос выяснения образования алмазов в процессе кристаллизации их из магматического расплава или роста в процессе метасоматоза из флюидной фазы или флюидизированного расплава. Геохимические данные по распределению примесных элементов во включениях алмазов и прямые наблюдения в ксенолитах свидетельствуют о том, что метасоматический рост алмазов вполне вероятен, хотя, по экспериментальным данным, кристаллизация их происходит в карбонатно-силикатных или сульфидно-силикатных расплавах. В любом случае интенсивное участие флюидных компонентов в процессе алмазообразования несомненно [Spetsius, Taylor, 2002, 2008]. Основные свидетельства многостадийного образования алмазов в ксенолитах эклогитов в процессе мантийного метасоматоза были также суммированы ранее [Spetsius, 1999], а наличие нескольких генераций алмазов установлено в результате их датирования [Richardson et al., 1993]. Существует ряд свидетельств метасоматического образования алмазов, которое поддерживается подавляющим большинством ученых [Taylor et al., 1998; Cartigny, 2005; Spetsius, Taylor, 2008; Stachel, Harris, 2008; Thomassot et al., 2009].

Базируясь на всех вышеизложенных фактах, нам представляется возможной следующая модель алмазообразования в первую очередь в породах эклогитового состава, когда рост алмазов происходит под воздействием метасоматизирующих мантийных флюидов, содержащих в своем составе углерод в той или иной форме (рис. 5). Подобная модель была предложена коллективом авторов в качестве вероятной схемы для объяснения преобразования эклогитов типа II в тип I из тр. Робертс Виктор, Южная Африка [Gréau et al., 2011]. При этом, как было продемонстрировано ими, а также в других работах [McCandless, Gurney, 1989], алмазы содержатся только в интенсивно метасоматизированных эклогитах группы I, что подтверждается и данными исследования алмазоносных ксенолитов из трубок Удачная, Мир, Комсомольская и других [Spetsius, Taylor, 2008; Spetsius et al., 2012].

Мы представили здесь вероятностную модель алмазообразования в мантийном эклогитовом субстрате, исходя из современных петрологических представлений по данному вопросу. Следует подчеркнуть, что в процессе мантийного метасоматоза благоприятные условия для зарождения и последующего роста алмазов обеспечиваются восходящими потоками мантийных флюидов, которые содержат и поставляют углерод в той или иной форме.

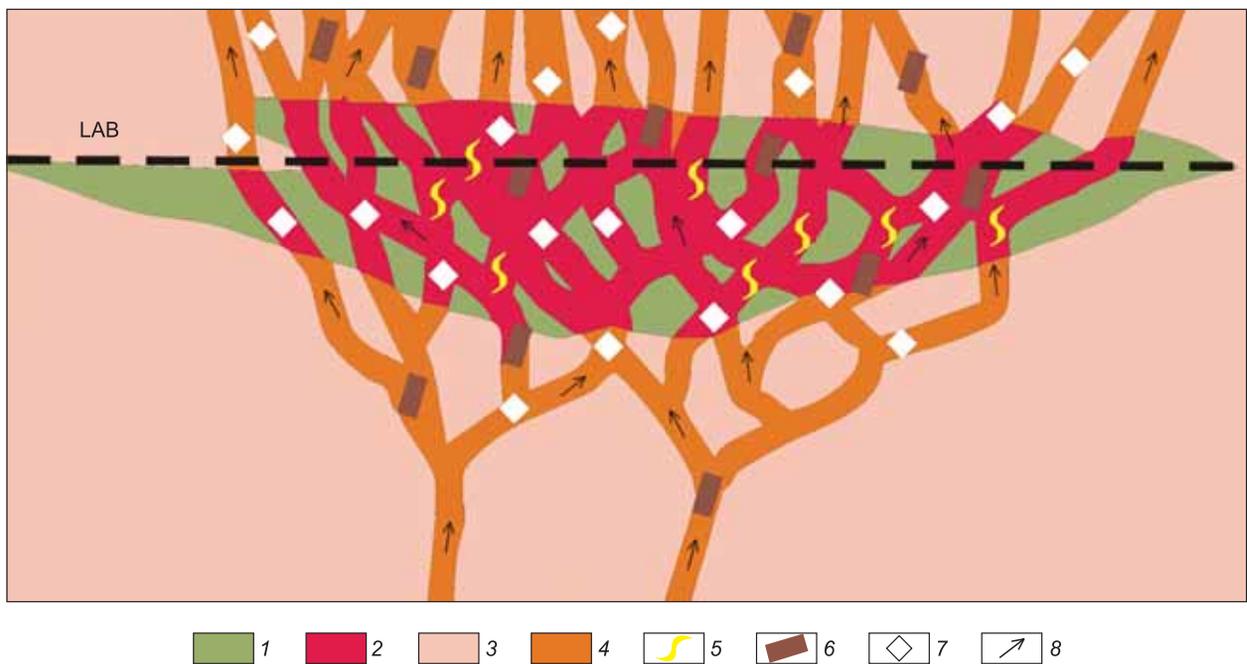


Рис. 5. Схематическая модель, иллюстрирующая предполагаемый механизм метасоматоза мантийного субстрата и образования алмазов, по [Gréau et al., 2011].

1, 2 — эклогиты: 1 — II тип, 2 — I тип; 3 — перидотит; 4 — метасоматизированный перидотит; 5 — сульфид; 6 — флогопит; 8 — просачивание метасоматизирующего флюид-расплава.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, результаты исследований ИК-поглощения, фото- и катодолуминесценции алмазов из перидотитовых и эклогитовых ксенолитов из тр. Нюрбинская показывают, что морфологические и физические характеристики изученных алмазов соответствуют характеристикам алмазов из кимберлитов этой трубки. Анализ особенностей внутреннего строения алмазов разного генезиса, изменения их примесного состава по объему кристаллов показал, что эклогитовые и перидотитовые кристаллы по физическим характеристикам, внутреннему строению и другим особенностям различаются между собой. Среди кристаллов эклогитового генезиса много зональных алмазов с признаками мультистадийного 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. Слабые полосы ИК-поглощения на 3107 см^{-1} выявлены только в отдельных центральных зонах перидотитовых кристаллов, в них также редко фиксируются признаки прерывания роста. Сравнение спектральных особенностей кристаллов из ксенолитов разного генезиса и алмазной продукции кимберлитов тр. Нюрбинская подтверждает большой вклад в совокупность алмазов этого месторождения кристаллов эклогитового парагенезиса. Ряд фактов свидетельствует в пользу образования если не всех, то подавляющего большинства алмазов эклогитового парагенезиса в процессе мантийного метасоматоза из флюида или флюид-расплава. По мнению авторов, эти закономерности не только определили типоморфизм алмазов этого коренного источника, но и обусловили в целом высокую продуктивность кимберлитов Накынского поля.

Авторы выражают благодарность академику Н.В. Соболеву за ценные критические замечания и конструктивные предложения, а также анонимным рецензентам за замечания, способствовавшие улучшению статьи.

ЛИТЕРАТУРА

- Агашев А.М., Похиленко Н.П., Толстов А.В., Поляничко В.В., Мальковец В.Г., Соболев Н.В.** Новые данные о возрасте кимберлитов Якутской алмазоносной провинции // ДАН, 2004, т. 399, № 1, с. 95—99.
- Бартошинский З.В.** Об алмазах из эклогита кимберлитовой трубки «Мир» // Геология и геофизика, 1960 (6), с. 129—131.
- Бобриевич А.П., Смирнов Г.И., Соболев В.С.** Ксенолит эклогита с алмазами // Докл. АН СССР, 1959, т. 126, № 3, с. 637—640.
- Богущ И.Н., Кедрова Т.В.** Алмазы трубки Нюрбинская и связанных с ней даечного тела и россыпей ближнего сноса мезозойского возраста // Система: коренной источник—россыпь. Якутск, Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2009, с. 47—51.
- Богущ И.Н., Миронов В.П., Митюхин С.И.** Характеристики алмазов Накынского кимберлитового поля по данным спектроскопии // Проблемы алмазной геологии и некоторые пути их решения. Воронеж, Изд-во ВГУ, 2001, с. 359—368.
- Дэвис Г.Л., Соболев Н.В., Харькив А.Д.** Новые данные о возрасте кимберлитов Якутии, полученные уран-свинцовым методом по цирконам // Докл. АН СССР, 1980, т. 254, № 1, с. 175—179.
- Кинни П.Д., Гриффин Б.Дж., Хеамэн Л.М., Брахофогель Ф.Ф., Специус З.В.** Определение U-Pb возрастов перовскитов из якутских кимберлитов ионно-ионным масс-спектрометрическим (SHRIMP) методом // Геология и геофизика, 1997, т. 38 (1), с. 91—99.
- Корнилова В.П., Фомин А.С., Зайцев А.И.** Новый тип алмазоносных кимберлитовых пород на Сибирской платформе // Региональная геология и металлогения, 2001, № 13—14, с. 105—117.
- Митюхин С.И., Специус З.В.** Включения в алмазах из кимберлитовой трубки Ботуобинская (Накынский поле, Якутия) // Геология и геофизика, 2005, т. 46 (12), с. 1246—1258.
- Орлов Ю.Л.** Минералогия алмаза. М., Наука, 1984, 264 с.
- Пономаренко А.И., Специус З.В.** Алмазоносные эклогиты из кимберлитовой трубки Сытыканская // Геология и геофизика, 1976 (6), с. 103—106.
- Пономаренко А.И., Серенко В.П., Лазько Е.Е.** Первые находки алмазоносных эклогитов в кимберлитовой трубке «Удачная» // Докл. АН СССР, 1973, т. 209, № 1, с. 188—189.
- Пономаренко А.И., Специус З.В., Соболев Н.В.** Новый тип алмазоносных пород — гранатовые пироксениты // Докл. АН СССР, 1980, т. 251, № 2, с. 438—441.
- Соболев В.С.** Условия образования месторождений алмазов // Геология и геофизика, 1960 (1), с. 7—22.
- Соболев В.С., Най Б.С., Соболев Н.В., Лаврентьев Ю.Г., Поспелова Л.Н.** Ксенолиты алмазоносных серпентинитов из трубки Айхал // Докл. АН СССР, 1969, т. 188, с. 1141—1143.

- Соболев В.С., Соболев Н.В., Лаврентьев Ю.Г.** Включения в алмазе из алмазоносного эклогита // Докл. АН СССР, 1972, т. 207, с. 164—167.
- Соболев Е.В., Лисойван В.И.** Примесные центры в алмазах // Тез. VIII отчетн. научн. конф. Новосибирск, 1971, с. 60—61.
- Соболев Е.В., Ленская С.В., Лисойван В.И.** О пластинчатых образованиях в структуре природных алмазов // Журнал структурной химии, 1968, т. 9, № 6, с. 1029—1033.
- Соболев Н.В.** Глубинные включения в кимберлитах и проблема состава верхней мантии. Новосибирск, Наука, 1974, 264 с.
- Соболев Н.В., Кузнецова И.К.** Минералогия алмазоносных эклогитов // Докл. АН СССР, 1966, т. 167, № 6, с. 23—31.
- 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.
- Соболев Н.В., Тэйлор Л.А., Зуев В.М., Безбородов С.М., Снайдер Г.А., Соболев В.Н., Ефимова Э.С.** Особенности эклогитового парагенезиса алмазов кимберлитовых трубок Мир и Удачная (Якутия) // Геология и геофизика, 1998, т. 39 (12), с. 1667—1678.
- Специус 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.
- Специус З.В., Иванов А.С., Митюхин С.И.** Ксенолиты и мегакристы с алмазами из кимберлитовой трубки Нюрбинская (Накынское поле, Якутия) // Докл. РАН, 2006, т. 408, № 6, с. 810—814.
- Anand M., Taylor L.A., Misra K.C., Carlson W.D., Sobolev N.V.** Nature of diamonds in Yakutian eclogites: views from eclogite tomography and mineral inclusions in diamonds // Lithos, v. 77, 2004, p. 333—348.
- Araújo D.P., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Grant K.J., Ireland T., Holden P., van Acherbergh E.** Microinclusions in monocrystalline octahedral diamonds and coated diamonds from Diavik, Slave Craton: Clues to diamond genesis // Lithos, 2009, v. 112, Supplement 2, p. 724—735.
- Bonney T.G.** The parent rock of the diamond in South Africa // Geol. Mag., 1899, v. 6, p. 309—321.
- Boyd S.R., Kiflawi I., Woods G.S.** The relationship between infrared absorption and the A defect concentration in diamond // Phil. Mag. B, 1994, v. 69, p. 1149—1153.
- Boyd S.R., Kiflawi I., Woods G.S.** Infrared absorption by the B nitrogen aggregate in diamond // Phil. Mag. B, 1995, v. 72, p. 351—361.
- Bulanova G.P.** The formation of diamond // J. Geochem. Explor., 1995, v. 53, p. 1—23.
- Bulanova G.P., Wiggers de Vries D.F., Pearson D.G., Beard A., Mikhail S., Smelov A.P., Davies G.R.** An eclogitic diamond from Mir pipe (Yakutia), recording two growth events from different isotopic sources // Chem. Geol., 2014, v. 381, p. 40—54.
- Cartigny P.** Stable isotopes and the origin of diamond // Elements, 2005, v. 1, № 2, p. 79—84.
- Evans T., Qi Z.** The kinetics of aggregation of nitrogen atoms in diamonds // Proc. Roy. Soc. London, 1982, A381, p. 238—242.
- Gréau Y., Huang J.-X., Griffin W.L., Renac C., Alard O., O'Reilly S.Y.** Type I eclogites from Roberts Victor kimberlites: Products of extensive mantle metasomatism // Geochim. Cosmochim. Acta, 2011, v. 75, № 22, p. 6927—6954.
- Ireland T.R., Rudnick R.L., Spetsius Z.V.** Trace elements in diamond inclusions from eclogites reveal link to Archean granites // Earth Planet. Sci. Lett., 1994, v. 128, p. 199—213.
- Kiflawi I., Bruley J.** The nitrogen aggregation sequence and the formation of voidites in diamond // Diamond Relat. Mater., 2000, v. 9, p. 87—93.
- McCandless T.E., Gurney J.J.** Sodium in garnet and potassium in clinopyroxene: criteria for classifying mantle eclogites // Kimberlites and related rocks / Eds. J. Ross, A.L. Jaques, J. Ferguson. Perth, Special Publication, Geological Society of Australia, 1989, v. 14, p. 827—832.
- Meyer H.A.** Genesis of diamond: a mantle saga // Amer. Miner., 1985, v. 70, p. 344—355.
- Navon O.** Diamond formation in the Earth's mantle / Eds. J.J. Gurney, J.L. Gurney, M.D. Pascoe, S.H. Richardson. Proc. 7th Int. Kimb. Conf., v. 2, Cape Town, Red Roof Design, 1999, p. 584—605.
- Pearson D.G., Shirey S.B., Bulanova G.P., Carlson R.W., Milledge H.J.** Dating and paragenetic distinction of diamonds using the Re-Os isotope system; application to some Siberian diamonds // Proc. 7th Int. Kimb. Conf., v. 2, 1999, p. 637—643.
- Pokhilenko N.P., Sobolev N.V., Lavrentev Yu.G.** Xenoliths of diamondiferous ultramafic rocks from Yakutian kimberlites // 2nd Int. Kimb. Conf., Ext. Abstr. Vol., Santa Fe, USA, 1977, 4 p.
- Richardson S.H., Harris J.W., Gurney J.J.** Three generations of diamond from old continental mantle // Nature, 1993, v. 366, p. 256—258.

- Shirey S.B., Richardson S.H., Harris J.W.** Integrated models of diamond formation and craton evolution // *Lithos*, 2004, v. 77, p. 923—944.
- Shirey S.B., Cartigny P., Frost D.J., Keshav S., Nestola F., Nimis P., Pearson D.G., Sobolev N.V., Walter M.J.** Diamonds and the geology of mantle carbon // *Rev. Miner. Geochem.*, 2013, v. 75, p. 355—421.
- Sobolev N.V., Lavrent'ev Yu.G.** Isomorphic sodium admixture in garnets formed at high pressures // *Contr. Miner. Petrol.*, 1971, v. 31, № 1, p. 1—12.
- Spetsius Z.V.** Two generations of diamonds in the eclogite xenoliths // *Proc. 7th Int. Kimb. Conf.*, v. 2, Cape Town, Red Roof Design, 1999, p. 823—828.
- Spetsius Z.V.** Petrology of highly aluminous xenoliths from kimberlites of Yakutia // *Lithos*, 2004, v. 48, p. 525—538.
- Spetsius Z.V., Taylor L.A.** Partial melting in mantle eclogite xenoliths: Connections with diamond paragenesis // *Int. Geol. Rev.*, 2002, v. 44, № 11, 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., DeAngelis M.T., Spicuzza M., Ivanov A.S., Banzeruk V.I.** Diamondiferous xenoliths from crustal subduction: garnet oxygen isotopes from the Nyurbinskaya pipe, Yakutia // *Eur. J. Miner.*, 2008, v. 20, p. 375—385.
- Spetsius Z.V., Wiggers de Vries D.F., Davies G.R.** Combined C-isotope and geochemical evidence for a recycled origin for diamondiferous eclogite xenoliths from kimberlites of Yakutia // *Lithos*, 2009, v. 1125, p. 1032—1042.
- Spetsius Z.V., Kovalchuck O.E., Bogush I.N.** Properties of diamonds in xenoliths from kimberlites of Yakutia: Implication to their origin and exploration // *Ext. Abstr. of 10th Int. Kimb. Conf, Bangalore, India, 2012, № 10IKC-51.*
- Stachel T., Harris J.W.** The origin of cratonic diamonds — Constraints from mineral inclusions // *Ore Geol. Rev.*, 2008, v. 34, № 1—2, p. 5—32.
- Taylor L.A., Milledge H.J., Bulanova G.P., Snyder G.A., Keller R.A.** Metasomatic eclogitic diamond growth: evidence from multiple diamond inclusions // *Int. Geol. Rev.*, 1998, v. 40, p. 663—676.
- Taylor L.A., Keller R.A., Snyder G.A., Wang W.Y., Carlson W.D., Hauri E.H., McCandless T., Kim K.R., Sobolev N.V., Bezborodov S.M.** Diamonds and their mineral inclusions, and what they tell us: A detailed «pull-apart» of a diamondiferous eclogite // *Int. Geol. Rev.*, 2000, v. 42, № 11, p. 959—983.
- Thomassot E., Cartigny P., Harris J.W., Lorand J.P., Rollion-Bard C., Chaussidon M.** Metasomatic diamond growth: A multi-isotope study (C-13, N-15, S-33, S-34) of sulphide inclusions and their host diamonds from Jwaneng (Botswana) // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2009, v. 282, № 1—4, p. 79—90.
- Weerd F., Pal'yanov Y.N., Collins A.T.** Absorption spectra of hydrogen in ¹³C diamond produced by high-pressure, high-temperature synthesis // *J. Phys., Condens. Matter*, 2003, v. 15, p. 3163—3170.
- Williams A.F.** The genesis of diamond. London, Benn Ltd., 1932, 636 p.
- Woods G.S.** Platelets and the infrared absorption of Type Ia diamonds // *Proc. Roy. Soc. London*, 1986, v. 407, p. 219—238.
- Woods G.S., Collins A.T.** Infrared absorption spectra of hydrogen complexes in Type I diamonds // *J. Phys. Chem. Solids*, 1983, v. 44, № 5, p. 471—475.

*Поступила в редакцию
25 марта 2014 г.*