

УДК 549.211:548.4:548.75

**В.А. Петровский¹, Е.А. Васильев², В.П. Лютоев¹,
В.И. Силаев¹, А.В. Козлов², А.Е. Сухарев¹, М. Мартинс³**

¹ Институт геологии Коми НЦ УрО РАН
167982, г. Сыктывкар, Россия, ул. Первомайская, 54
E-mail: Vlutoev@geo.komisc.ru

² Санкт-Петербургский государственный горный институт
им. Г.В. Плеханова (Технический университет)
199106, г. Санкт-Петербург, Россия, Васильевский о-в, 21 линия, 2

³ Федеральный университет шт. Минас Жерайс, Бразилия

ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРОСКОПИИ БРАЗИЛЬСКИХ АЛМАЗОВ

Обсуждаются результаты комплексного спектроскопического исследования кривогранных алмазов из бразильских месторождений. Приведены оценки степени агрегации в них структурных дефектов и температуры начала кристаллизации. Полученные данные сопоставлены с данными по кимберлитовым алмазам из Архангельской и Якутской алмазоносных провинций.

Вступление. После открытия в алмазах структурных дефектов, обусловленных, прежде всего, примесью азота [9, 14, 16, 17, 22], спектроскопические свойства стали едва ли не важнейшим источником генетической информации об этих минералах [1, 6, 7, 10]. Было установлено, что к основным азотным центрам в алмазах относятся *C*-, *A*- и *B1*-дефекты, определяемые по спектрам ИК-поглощения. Из них к собственно ростовым по происхождению относятся лишь точечные замещения атомов углерода азотом (*C*-дефекты), агрегатирующиеся при геологически длительном пребывании кристаллов в мантийных условиях в пары соседних атомов азота (*A*-дефекты). В дальнейшем объединение *A*-дефектов приводит к образованию *B1*-центров, состоящих из четырех атомов азота и вакансии углерода. Появившиеся в результате этого интерстициальные атомы углерода стягиваются в плоскостях (100) в сложные азотсодержащие планарные образования нано-микрометрового размера, известные как *B2*-центры или плейтелетс, идентифицируемые по полосе ИК-пог-

лошения в диапазоне 1360—1380 см⁻¹ [26]. В соответствии с другой моделью *B2*-дефекты рассматриваются как двухслойные пластинчатые сегрегации только атомов азота, возникшие в результате объединения *C*-, *A*- и *B1*-дефектов [17]. По ряду причин в настоящее время предпочтение в основном отдают первой модели [8]. Упомянутые выше основные азотные дефекты, в свою очередь, порождают множество производных дефектов, проявляющихся как парамагнитные центры, центры люминесценции и оптического поглощения.

В настоящее время существует громадный фонд экспериментальных данных о композициях структурных дефектов в алмазах различного происхождения, в значительной степени обеспеченный именно российскими и украинскими специалистами: Г.Б. Бокием, Е.В. Соболевым, М.И. Самойловичем, З.В. Бартошинским, Р.М. Минеевой, Ф.В. Каминским, Ю.А. Ключевым, К.П. Аргуновым и др. Однако этот фонд на 70—80 %, а, возможно, и более состоит из результатов изучения плоскогранных кимберлитовых алмазов. Сведения о люминесцентной спектроскопии округлых алмазов бразильско-уральского типа, включая и алмазы из собственно бразильских месторож-

© В.А. ПЕТРОВСКИЙ, Е.А. ВАСИЛЬЕВ,
В.П. ЛЮТОЕВ, В.И. СИЛАЕВ, А.В. КОЗЛОВ,
А.Е. СУХАРЕВ, М. МАРТИНС, 2011

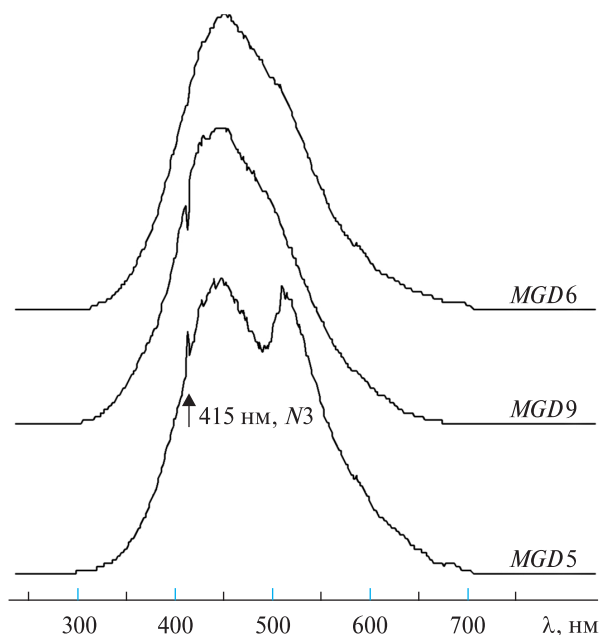


Рис. 1. Основные типы спектров рентгенолюминесценции бразильских алмазов

Fig. 1. Characteristic spectra of X-ray excited luminescence of Brazilian diamonds

дений, пока еще редки и малопредставительны [11, 20, 21, 23, 24]. На таком фоне полученные нами данные о рентгено- и фотолюминесценции, спектрах ЭПР и ИК-поглощения алмазов из россыпей двух важнейших в Бразилии алмазоносных территорий не могут не представлять значительного интереса.

Предварительные данные. В спектрах ЭПР (радиоспектрометр *SE/X-2547, RadioPAN*) исследованных нами десяти наиболее крупных бразильских алмазов линии агрегатных центров *P2* (три замещающих углерод атома азота и вакансия) сильно преобладают над линиями точечных центров *P1* (одиночные замещающие атомы азота — *C*-дефекты), т. е. структурный азот в этих минералах присутствует в основном в виде агрегаций. Спектры рентгенолюминесценции тех же алмазов были получены Ю.В. Глуховым в диапазоне 230—800 нм при комнатной температуре с использованием рентгеновского аппарата УРС-1.0, монохроматора *AAS-1*. Во всех РЛ-спектрах (рис. 1) была зафиксирована доминирующая *A*-полоса рекомбинационного свечения с максимумом в области 450 нм, сильно варьирующая по интенсивности от 30 до 500 у. е. Как известно, эта полоса обуславливается возбуждением сегрегированных азотных дефектов. Срезание ее коротковолнового крыла линией 415 нм го-

ворит о реабсорбции на центрах системы *N3* (*P2*-центры ЭПР, производные *B1*-дефектов). Иногда спектр излучения на таких центрах проявляется лучше, отчетливо накладываясь на основную полосу люминесценции. В некоторых спектрах РЛ в желто-зеленой области наблюдается либо изгиб длинноволнового крыла *A*-полосы, либо дополнительная полоса с максимумом 500—520 нм. Все это обычно приписывается излучению на центрах систем *H3* (производные *A*-дефектов) и *H4* (производные *B1*-дефектов).

Спектры фотолюминесценции для нескольких уральских и десяти бразильских округлых алмазов были получены С.И. Исаенко при температуре образца около 80 К с использованием монохроматора *SPM-2* и возбуждающего излучения с $\lambda = 365$ нм ртутной лампы ДРШ-250. В спектрах проявились две основные полосы свечения в интервалах 400—490 и 490—570 нм (рис. 2). Коротковолновая полоса обусловлена голубым излучением на центрах системы *N3* — бесфонная линия 415,5 нм и фонные ее повторения при 428,7, 438,8, 451 нм. Длинноволновая полоса образована линиями желто-зеленого излучения на центрах систем *H3* и *H4*. При этом центрам *H3* отвечают бесфонная линия 503,2 нм и фонные повторения при 512,3, 520,1 нм и др., а центрам *H4* — бесфонная линия 496 нм. Соотношение упомянутых полос варьируется в широких пределах — от резкого преобладания коротковолновой до доминирования длинноволновой. В одном спектре была зафиксирована широкая неструктурированная полоса в области 550—700 нм, отвечающая за красное свечение. Считается, что она обусловлена центрами деформационной природы [12].

Методика и объекты ИК-спектроскопического исследования. Спектры ИК-поглощения были зарегистрированы в проходящем свете на микроскопе *Hyperion 1000*, совмещенном с Фурье спектрометром *VERTEX-70, Bruker*. Заданная локальность исследования составляла 100 мкм, однако при апертуре объектива около 30 градусов область регистрации спектра в конкретном кристалле определялась и его толщиной. Для изучения выбирались наиболее прозрачные участки кристаллов, для округлых форм — их центральные части. По возможности регистрировали несколько спектров разных участков кристалла, например, центра и краев. Данные получались после усреднения

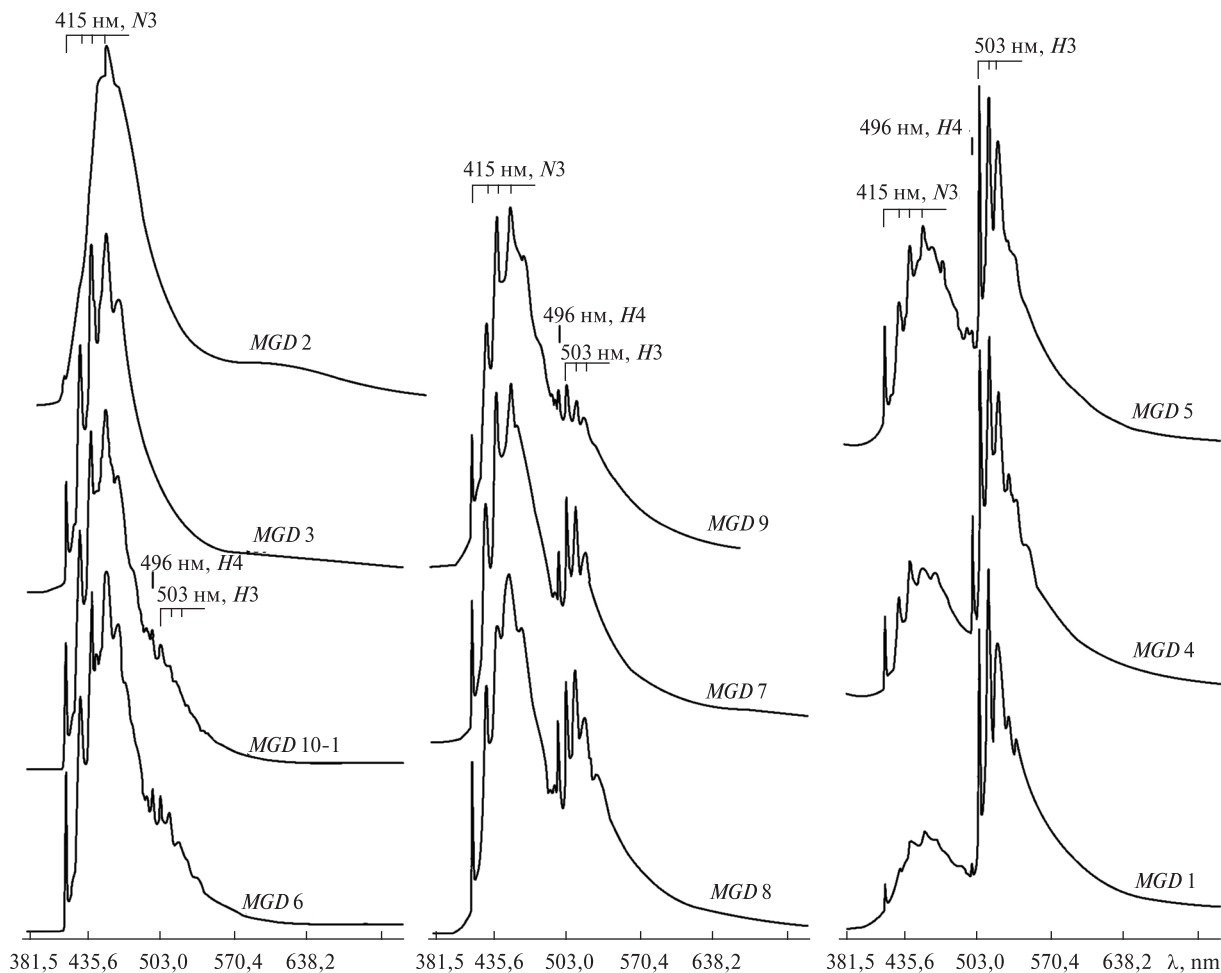


Рис. 2. Типичные спектры фотолуминесценции бразильских алмазов. Приведены в последовательности снижения интенсивности излучения на центрах системы $N3$ и возрастания интенсивности излучения на центрах систем $H3$ и $H4$

Fig. 2. Typical photoluminescence spectra of Brazilian diamonds. The spectra are assembled in succession of decreasing of $N3$ -system emission and increasing of $H3$ -, $H4$ -system emission

32—500 сканов (в зависимости от формы и прозрачности образцов). Достигнутое разрешение 4 см^{-1} было достаточным для достоверной регистрации и оценки по интенсивности полос поглощения на основных азотных дефектах — A , $B1$, а также $B2$. Полосы C -дефектов в ИК-спектрах изученных кристаллов не проявились.

Полученные спектры ИК-поглощения были нормированы на толщину кристалла 1 см по двух- и трехфононному поглощению таким образом, чтобы коэффициент поглощения при частотах 2030, 2490 и 4000 см^{-1} составлял, соответственно, 12,5, 4,6 и 0 см^{-1} (рис. 3). Для характеристики $B2$ -дефектов были определены положение максимума их ИК-полосы в диапазоне 1360 — 1380 см^{-1} и коэффициент соответствующего поглощения. Выделение вкла-

да индивидуальных систем поглощения на A и $B1$ дефектах проводилось с помощью программы, использующей эталонные спектры. Концентрации азота, приходящегося на конкретные дефекты, получались по уравнениям коэффициентов пропорциональности [18, 19]: N_A (ат. %) = $0,00165 \alpha_{1282}^A$ (см^{-1}) и N_{B1} (ат. %) = $0,0079 \alpha_{1282}^{B1}$ (см^{-1}), в которых α_{1282}^A и α_{1282}^{B1} — коэффициенты поглощения при 1282 см^{-1} на, соответственно, A - и $B1$ -дефектах. Степень агрегации азота определялась в соответствии с [25] как процентная доля концентрации азота в форме $B1$ -дефектов от его суммарной концентрации в формах A - и $B1$ -дефектов: $\% B1 = 100 N_{B1} / (N_A + N_{B1})$. Относительная погрешность определения этих коэффициентов не превышала 10 %, несколько колеблясь в зависимости от формы, толщины образцов и на-

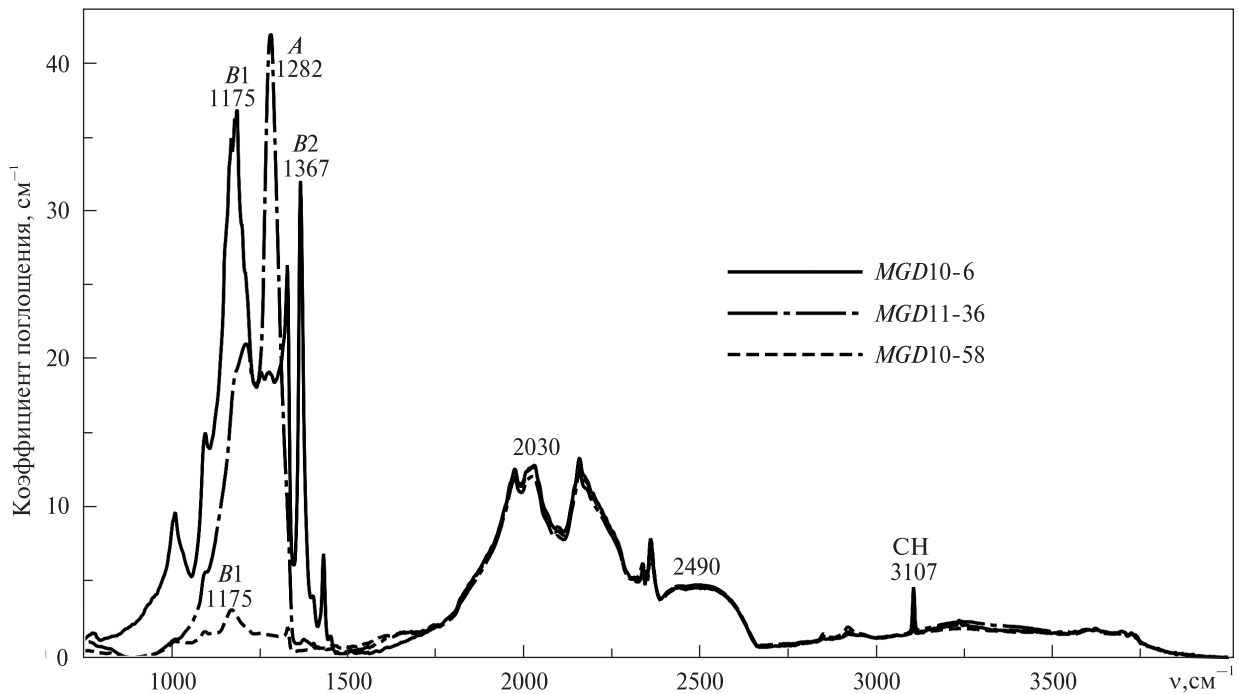


Рис. 3. Типичные спектры ИК-поглощения алмазов в области проявления азотных дефектов: обр. *MGD* 10-58 и *MGD* 10-6 — примесный азот в формах *B1*- и *B2*-дефектов (степень агрегации *B1* = 100 %); обр. *MGD* 11-36 — примесный азот в форме *A*-дефектов (*B1* = 13 %). Для калибровки коэффициентов поглощения использованы полосы в диапазоне 1600—2700 см⁻¹, обусловленные собственным двухфононным поглощением решетки алмаза

Fig. 3. Spectra of IR-absorption of diamonds in the spectral region of vibration bands of nitrogen defects: samples *MGD* 10-58 and *MGD* 10-6 — impurity nitrogen in form of *B1*-, *B2*-defects (aggregation stage *B1* = 100 %); sample *MGD* 11-36 — impurity nitrogen in form of *A*-defects (*B1* = 13 %). The bands of two-phonon IR-absorption of diamond lattice in the region of 1600—2700 cm⁻¹ were used for calibration of absorption coefficients of the impurity-related bands

личия в них включений. Погрешность определения общей концентрации азота ($N = N_A + N_{B1}$) и степени агрегации его атомов в форме *B1* достигала 20 %.

В области 3000—4000 см⁻¹, где проявляется собственное трехфононное поглощение алмаза, регистрируются широкие плохо структурированные полосы. Они могут иметь также ксеногенное происхождение, обуславливаясь примазками на поверхности алмазных кристаллов глинистых минералов, гидроксидов железа, а также сорбированными на стенках микротрещин водными группами. Почти во всех полученных нами ИК-спектрах на фоне широких малоинтенсивных полос выделяется узкая одиночная линия 3107 см⁻¹ (рис. 3), отражающая валентные колебания химической связи в СН-группах, хемосорбированных на поверхности внутренних октаэдрических микропустот алмаза [13]. Отметим, что интенсивность упомянутой линии вследствие ее малой ширины (около 5 см⁻¹) при спектральном разрешении 4 см⁻¹ занижается примерно вдвое относительно истинного значения.

Результаты исследований. Зарегистрированы спектры поглощения в 128 кристаллах размером —4 + 2 и —2 + 1 мм из россыпей бассейна р. Макаубас (шт. Минас Жерайс) и 50 кристаллов размером —2 + 1 мм из района Жуина (шт. Мато-Гроссу). Подавляющее число изученных нами бразильских алмазов оптически прозрачны. Исключение составили лишь четыре алмаза (*MGD* 10/22, *MGD* 10/21, *MGD* 11/24, *MGD* 11/25) с очень интенсивной зеленой окраской, имеющей, вероятно, радиационное происхождение.

В целом кристаллы характеризуются довольно высокой концентрацией примесных атомов азота (азотностью) и высокой степенью их агрегации. Для большей части алмазов проявляется прямая корреляция концентрации дефектов *B2* с общим содержанием структурного азота в формах *A* + *B1* и с содержанием дефектов *B1* (рис. 4). Согласно Г.С. Вудсу [26], такая популяция алмазов относится к "упорядоченному" типу кристаллов, в которых образование *B1*-центров сопровождается формированием за счет высвобождающегося меж-

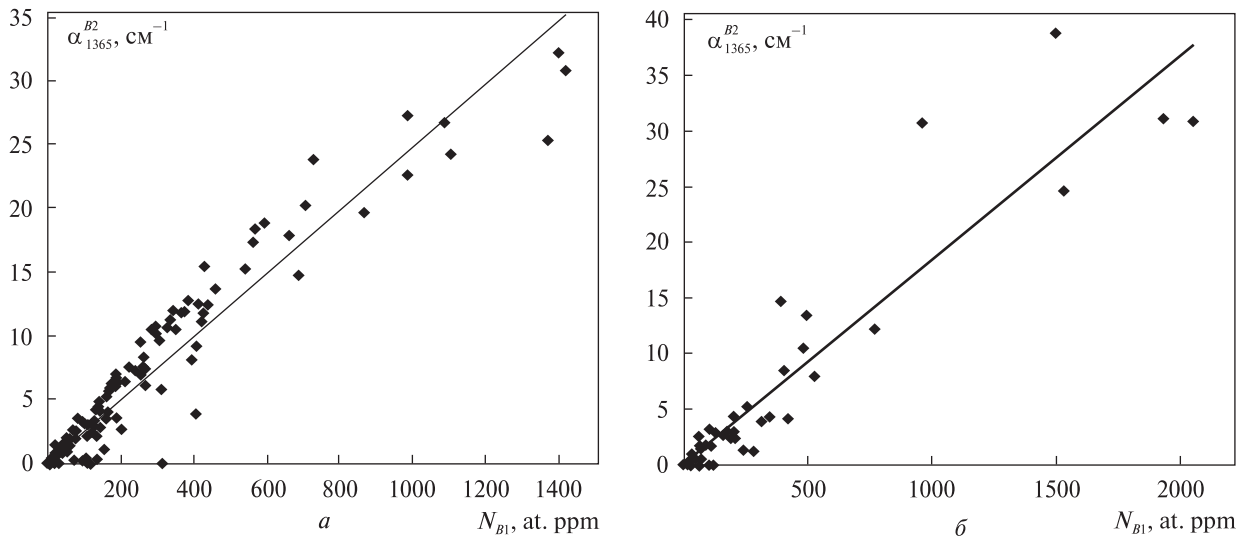


Рис. 4. Корреляция концентраций примеси азота в форме структурных дефектов $B1$ и коэффициента поглощения на $B2$ -дефектах (α_{1365}^{B2}) в бразильских алмазах: a — бассейн р. Макаубас; b — район Жуина

Fig. 4. Correlation between concentrations of impurity nitrogen in form of $B1$ structural defects: and absorption coefficient (α_{1365}^{B2}) of $B2$ -defects in Brazilian diamonds: a — the river Macaebas basin; b — Juina area

доузельного углерода планарных $B2$ -дефектов. Однако в некоторых изученных нами кристаллах было зафиксировано относительно низкое содержание плейтелетс, что можно объяснить их деградацией вследствие перехода в дислокационные петли и пустоты.

В ИК-спектрах бразильских алмазов типичное положение максимума полосы $B2$ -дефектов приходится на $1366,5 \text{ см}^{-1}$, что соответствует линейным размерам большей части плейтелетс в $70\text{—}80 \text{ нм}$ (рис. 5). Согласно полученным результатам, содержание таких дефектов в алмазах из бассейна р. Макаубас отвечает коэффициентам поглощения в их ИК-полосе от 0 до 32 см^{-1} при среднем значении в $7,0 \text{ см}^{-1}$. Аналогичные значения были получены и для алмазов из района Жуина — от 0 до 39 см^{-1} при среднем значении $5,6$. Верхний предел примесного азота в составе $B2$ -дефектов может быть оценен в предположении исключительно азотной природы плейтелетс по [17]. Пересчет коэффициентов поглощения на атомную концентрацию азота с использованием соотношения $N_{B2, \text{ ат. \%}} = 0,002\alpha_{1365}^{B2} \text{ см}^{-1}$, предложенного для данной модели дефектов в работе [13], приводит к выводу о том, что в изученных кристаллах в составе $B2$ -дефектов может находиться до 20% примесного азота.

Коэффициент поглощения на водородных центрах в полосе 3107 см^{-1} в алмазах из россыпей бассейна р. Макаубас колеблется от



Рис. 5. Частота встречаемости положений (см^{-1}) максимума ИК-поглощения на дефектах $B2$ в бразильских алмазах: 1 — бассейн р. Макаубас; 2 — район Жуина

Fig. 5. Strip diagram of spectral position (см^{-1}) of maximum of IR-absorption of $B2$ -defects in Brazilian diamonds: 1 — the river Macaebas basin; 2 — Juina area

от 0 до $3,5 \text{ см}^{-1}$, составляя в среднем $0,5$. В кристаллах из района Жуина эти значения заметно выше: $0,03\text{—}11,4 \text{ см}^{-1}$ при среднем значении $1,9$. Как известно, такие центры в алмазах прямо коррелируются с $B1$ -дефектами, что расценивается как доказательство совместного участия азота и водорода в мантийном минералообразовании [2, 3]. Однако в исследованных нами коллекциях алмазов такая зависимость проявляется нечетко, возможно, по

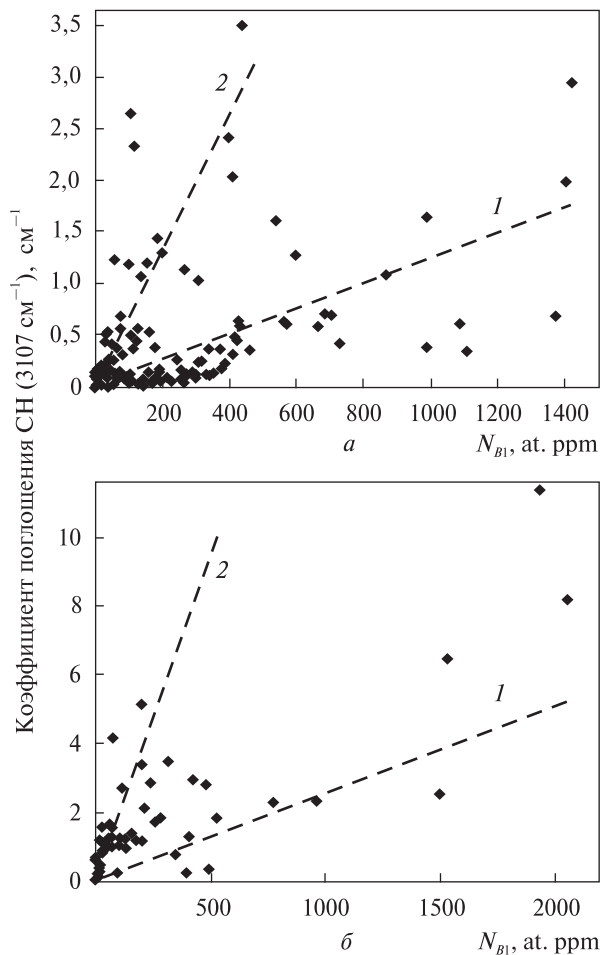


Рис. 6. Два варианта корреляции в бразильских алмазах интенсивности поглощения на водородных центрах с концентрацией азота в форме дефекта *B1* — с малым (1) и большим (2) коэффициентами регрессии: *a* — бассейн р. Макаубас; *б* — район Жуина

Fig. 6. Two modes of correlation of intensities of absorption of hydrogen centers and concentration of nitrogen in *B1*-form with small (1) and large (2) regression coefficients: *a* — the river Macaubas basin; *б* — Juina area

причине реализации не одной, а двух прямых зависимостей между концентрацией азота в форме *B1* и количеством *H*-центров (рис. 6). Нами установлено, что водородных центров в алмазах из района Жуина больше именно в тех алмазах, в которых выше содержание дефектов *B2* (коэффициент корреляции 0,6 при $n = 51$). В алмазах из россыпей бассейна р. Макаубас, характеризующихся более низким содержанием водородных дефектов, такая корреляция не проявлена. Из этого мы делаем вывод, что образование *H*-центров в исследованных алмазах произошло не только за счет дефектов *B1*, но и при купировании протонами оборванных *C—C* связей на границах пла-

нальных дефектов. Именно поэтому точки на рис. 6 распались на две группы, отражающие относительно низкую и высокую степени протонизации в зависимости от содержания в алмазах планальных дефектов.

В исследованных нами алмазах из россыпей бассейна р. Макаубас установлен широкий диапазон значений суммарной концентрации азота в *A*- и *B1*-дефектах и степени его агрегации (% *B1*), что отчетливо проявляется на соответствующих диаграммах (рис. 7). Последние обычно используются для оценки термодинамических параметров пребывания алмазов в мантии. Нами использован вариант диаграммы У. Тейлора [25] с изотермами, соответствующими пребыванию алмазов в мантии в течение 3 млрд лет, с помощью которого ранее были проанализированы алмазы из речных россыпей из района Жуина [21, 23]. Полученные новые данные показывают, что значимых различий между изученными пробами не имеется, контрастного обособления кристаллов на диаграммах также не происходит. В целом доля алмазов со значением *B1* более 90 % составляет 0,12, а со значением менее 20 % — 0,13. Доминируют, следовательно, камни со значением этой характеристики около 50 %. Средняя величина общей концентрации примесного азота оценивается в 500 ppm. Доля кристаллов с *N* менее 100 ppm составляет 0,24, более 600 ppm — 0,35. При всей стохастичности распределения по концентрации азота и степени его агрегации алмазы из бассейна р. Макаубас все же можно подразделить на несколько статистических флуктуаций: 1 — среднеазотную с началом кристаллизации ближе к 1150 °С; 2 — высокоазотную с началом кристаллизации при 1100—1150 °С; 3 — высоко- и среднеазотную с началом кристаллизации ближе к 1150 °С; 4 — высоко- и среднеазотную с началом кристаллизации около 1200 °С. В целом алмазы из бассейна р. Макаубас характеризуются средней степенью агрегации азота, превышающей таковую в алмазах Архангельской провинции и примерно совпадающей со степенью агрегации азота в кимберлитовых алмазах Якутской провинции. Следует отметить, что полученные нами результаты заметно расходятся с ранее опубликованными данными, согласно которым в алмазах бассейна р. Макаубас средние значения *N* и % *B1* составляют, соответственно, только 370 ppm и 17 % [20], что соответствует замет-

но более низкой степени агрегации структурной примеси азота.

В коллекции из района Жуина доля алмазов с высокой степенью агрегации азотных дефектов увеличивается до 0,34, а доля кристаллов с очень низкой степенью агрегации не превышает 0,10. Остальная часть выборки равномерно распределена по интервалу промежуточных значений этой характеристики. Среднее значение общей концентрации азота достигает 390 ppm, доля кристаллов $N < 100$ ppm оценивается в 0,36. Точки алмазов из района Жуина на диаграмме $\% B1 - N$ тоже широко рассеяны, но при этом их совокупное поле в сравнении с полем точек алмазов из бассейна Макаубас явно сдвинуто в сторону больших значений степени агрегации азота. Среди алмазов района Жуина можно выделить следующие статистические флуктуации: 1 — высоко- и среднеазотную относительно низкотемпературную (1100—1150 °С), статистически похожую на вторую флуктуацию в коллекции алмазов из бассейна р. Макаубас; 2 — средне- и низкоазотную с началом кристаллизации 1100—1150 °С; 3 — высоко- и среднеазотную с началом кристаллизации 1200—1250 °С; 4 — низкоазотную с температурой начала кристаллизации 1250—1300 °С. Именно последняя флуктуация, вероятно, и соответствует ранее полученным данным по предположительно кимберлитовым алмазам района Жуина [21]. В целом полученные нами для района Жуина результаты тоже заметно отличаются от имеющих в литературе данных, во-первых, большим значением N , во-вторых, наличием значительного количества низких и средних значений степени агрегации азота. Последнее, возможно, говорит о гетерогенности алмазов в изученной нами жуинской коллекции.

Выводы. Результаты проведенных исследований указывают на принципиальные отличия бразильских алмазов от кимберлитовых камней. Большинство изученных нами кристаллов относится к подтипу $IaB1$, не характерному для кимберлитовых трубок [4], имеют очень широкие вариации параметров ИК-поглощения, обладают высокой концентрацией планарных дефектов $B2$ — в среднем на уровне 20 % от общей концентрации структурного азота. Последнее весьма значительно превышает относительную концентрацию плейтелетс в кимберлитовых алмазах, особенно в преобладающих среди них плоскогран-

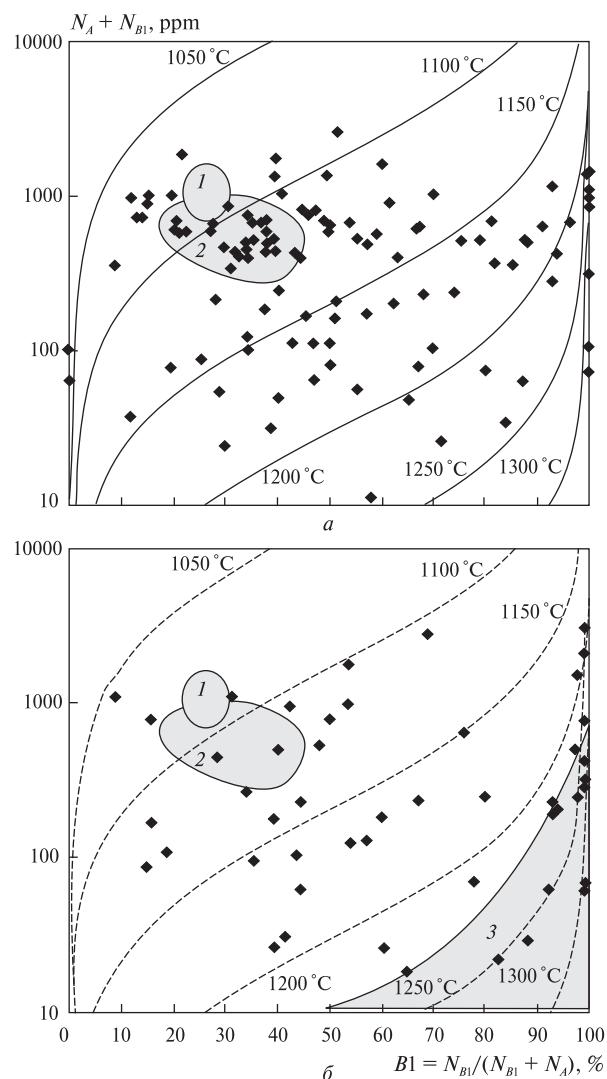


Рис. 7. $B-N$ параметры алмазов из бассейна р. Макаубас (а) и района Жуина (б). Очерченные поля 1—3 — экспертные оценки для кимберлитовых алмазов из Архангельской (1), Якутской (2) провинций, района Жуина (3) по [28, 30]. Температурные изолинии соответствуют времени пребывания алмазов в мантийных условиях 3 млрд лет

Fig. 7. $B-N$ parameters of diamonds from the river Macauba basin (a) and Juina area (b). Marked fields 1—3 — are expert estimations for kimberlite diamonds from Arkhangelsk (1), Yakutia (2), Juina (3) according to [28, 30]. Thermal isolines correspond to 3000 Ma mantle residence of diamonds

ных октаэдрических кристаллах [3]. Следует отметить и заметно больший в бразильских алмазах размер $B2$ -дефектов, превышающий таковой, например, в якутских кимберлитовых алмазах [5] в среднем на 15—30 %. Установленный нами в бразильских алмазах уровень агрегации азотных дефектов может свидетельствовать о начальной температуре их

кристаллизации в 1150—1200 °С и весьма значительной длительности отжига. Еще одна особенность бразильских алмазов — их обогащение водородными центрами, повышение концентрации которых, вероятно, связано с массовым образованием именно планарных дефектов. Кроме того, во всех изученных бразильских алмазах установлены центры систем *N3* и *N4*, часто преобладающие над центрами системы *N3*, что свойственно и для округлых уральских алмазов [15], но не типично для алмазов из кимберлитов. Как уже отмечалось выше, центры *H*-систем — это производные от *A*- и *B1*-дефектов, образующихся в условиях высокой температуры, сильных пластических деформаций и естественной радиации.

Вся картина вариации спектроскопических свойств бразильских алмазов свидетельствует об их мантийном происхождении и образовании в неустойчивой термодинамической обстановке. Наиболее аномальными в ряду исследованных нами алмазов оказались алмазы из района Жуина, часть из которых (низкоазотные с максимальной степенью агрегации) может иметь астеносферное происхождение, т. е. могла образоваться на экстремальной глубине более 200 км [7].

Работа выполнена при поддержке программы Президиума РАН № 27 (09-Р-5-1028) и ОНЗ РАН (09-С-5-1022), федеральной целевой программы "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009—2013 гг., а также гранта Президента РФ для поддержки ведущих научных школ НШ 7198.2010.5.

1. *Аргунов К.П.* Дефектные алмазы и их диагностика. — Якутск : ЯФ ГУ "Изд-во СО РАН", 2004. — 216 с.
2. *Блинова Г.К.* Структурные примеси как индикаторы механизма роста природных кристаллов алмаза // Докл. АН СССР. — 1987. — **294**, № 4. — С. 868—871.
3. *Блинова Г.К.* Распределение структурных примесей в алмазах различного генезиса // Там же. — 1989. — **304**, № 1. — С. 184—186.
4. *Богуш И.Н., Васильев Е.А., Помазанский Б.С. и др.* Сравнение алмазов типа IaB1 из некоторых месторождений Якутии и Бразилии // Кристаллогенезис и минералогия : Материалы II Междунар. конф. — СПб., 2007. — С. 230—232.
5. *Богуш И.Н., Ротман А.Я., Ковальчук О.Е. и др.* Физические свойства и примесный состав алмазов : новые возможности углубленного изучения // Геология алмазов — настоящее и будущее. — Воронеж : Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 2005. — С. 1499—1520.
6. *Бокий Г.Б., Безруков Г.Н., Клюев Ю.А. и др.* Природные и синтетические алмазы. — М. : Наука, 1986. — 222 с.
7. *Васильев Е.А.* Планарные оптически активные центры алмазов как индикаторы условий алмазообразования : Автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. — СПб., 2007. — 20 с.
8. *Васильев Е.А., Иванов-Омский В.И., Богуш И.Н.* Проявление межзельного углерода в спектрах поглощения природных алмазов // Журн. техн. физики. — 2005. — **31**, № 6. — С. 38—41.
9. *Клюев Ю.А.* Интенсивность полос в ИК-спектре поглощения природных алмазов // Алмазы. — 1971. — № 6. — С. 9—12.
10. *Клюев Ю.А., Дуденков Ю.А., Неница В.М.* Некоторые особенности условий образования алмазов по формам их роста и распределению примесных оптически активных центров // Геохимия. — 1973. — № 7. — С. 1029—1036.
11. *Петровский В.А., Ракин В.И., Карфункель И. и др.* Алмазы современных россыпей в бассейне реки Макаубас (Бразилия) // Сыктывкар. минерал. сб. — 2003. — № 33. — С. 13—40.
12. *Плотникова С.П., Клюев Ю.А., Парфианович К.А.* Длинноволновая фотолюминесценция природных алмазов // Минерал. журн. — 1980. — **2**, № 4. — С. 75—80.
13. *Природные алмазы России.* — М. : Полярон, 1997. — 304 с.
14. *Самойлович М.И., Бутузов В.П., Безруков Г.Н.* Исследование вхождения структурной примеси азота в кристаллы синтетического алмаза // Синтет. алмазы. — 1970. — № 2. — С. 30—34.
15. *Силаев В.И., Чайковский И.И., Ракин В.И. и др.* Алмазы из флюидизатно-эксплозивных брекчий на Среднем Урале. — Сыктывкар : Геопринт, 2004. — 114 с.
16. *Соболев Е.В.* Азотные центры и рост кристаллов природного алмаза // Проблемы петрологии земной коры и верхней мантии. — Новосибирск : Наука, 1978. — С. 245—255.
17. *Соболев Е.В., Ленская С.В., Лисойван В.И.* О пластинчатых образованиях в структуре природных алмазов // Журн. структур. химии. — 1968. — **9**, № 6. — С. 29—33.
18. *Boyd S.R. et al.* The relationship between infrared absorption and the A defect concentration in diamond // Phil. Mag. B. — 1994. — **69**. — P. 1149—1153.
19. *Boyd S.R. et al.* Infrared absorption by the B nitrogen aggregate in diamond // Ibid. — 1995. — **72**. — P. 351—361.
20. *Chaves A.O. et al.* Nitrogen centres and mineral inclusions of diamonds from Minas Gerais (Brazil) as revealed by vibrational spectroscopy // II South Amer. Symp. on diamond geology. — 2005. — P. 43—48.
21. *Hayman P., Kopylova M., Kaminsky F.V.* Alluvial diamonds from the Rio Soriso (Juina, Brazil) // Ext. abstr. 8 Int. Kimberlite Conference. — 2003. — P. art FLA_0320.
22. *Kaiser W., Bond W.* Nitrogen, a major impurity in common type I diamond // Phys. Rev. — 1959. — **115**. — P. 857.
23. *Kaminsky F.V., Khachatryan G.K.* Characteristics of nitrogen and other impurities in diamond as revealed

- by infrared absorption data // *Can. Miner.* — 2001. — **39**. — P. 1733—1745.
24. *Karfunkel J., Martins M., Scholz R. et al.* Diamonds from the Macaubas river basin (MG. Brazil) : characteristics and possible source // *Rev. Brazil. Geocienc.* — 2001. — **31**. — P. 445—450.
25. *Taylor W.R., Jaques A.L., Ridd M.* Nitrogen-defect aggregation characteristics of some Australian diamonds : Time-temperature constraints on the source regions of pipe and alluvial diamonds // *Amer. Miner.* — 1990. — **75**. — P. 1290—1310.
26. *Woods G.S.* Platelets and the infrared absorption of type Ia diamonds // *Proc. Roy. Soc. London. A.* — 1986. — **407**. — P. 219—238.

Поступила 05.10.2010

*В.О. Петровський, Є.О. Васильєв, В.П. Лютосєв,
В.І. Сілаєв, О.В. Козлов, О.Є. Сухарєв, М. Мартинс*

ОСОБЛИВОСТІ СПЕКТРОСКОПІЇ БРАЗИЛЬСЬКИХ АЛМАЗІВ

Обговорюються результати комплексного спектроскопічного дослідження кривограничних алмазів із бразильських родовищ. Наведено оцінки ступеня агрегації в них структурних дефектів і температури початку кристалізації. Отримані дані зіставлені з даними щодо кімберлітових алмазів Архангельської та Якутської алмазоносних провінцій.

*V.A. Petrovsky, E.A. Vasilyev, V.P. Lutoev,
V.I. Silaev, A.V. Kozlov, A.E. Sukharev, M. Martins*

PECULIARITIES OF SPECTROSCOPY OF THE BRAZILIAN DIAMONDS

Collection of diamonds from the river Macaubas basin (state Minas Gerais) includes 122 crystals. 17 % of crystals have curvilinear surface of the primary dissolving, 65 % of crystals have the post-regeneration relief with curvilinear surface of secondary dissolving, and 18 % of crystals bear indices of mechanical erosion. The river Macaubas diamonds are uniformly distributed by total nitrogen concentration ($N = N_A + N_{B1}$) and nitrogen aggregation stage (% B1). There were not revealed any significant differences between selections of crystals from different spots along the river Macaubas. Despite the wide variations of defined

parameters, no isolated groups of crystals were detected also. Their part with the % B1 value more than 90 % is 0.12, and with the value lesser than 20 % — 0.13; the average value of this parameter is 50 %. Share of crystals with N lesser than 100 ppm makes 24 %, crystals with N more than 600 ppm — 35 %, the mean value of this parameter fixed at 500 ppm. The average coefficient of the platelets absorption band (α_{B2}) for this selection is 6.8 cm^{-1} , the average value of the band maximum position is 1366 cm^{-1} , the absorption coefficient of the band 3107 cm^{-1} is 0.5 cm^{-1} ; for crystals with high aggregation stage the same parameters make 18.5 cm^{-1} , 1364.5 cm^{-1} and 1.2 cm^{-1} . Among crystals with high aggregation degree, the high nitrogen-containing ones are characterised by the proportionality N_{B1} and N_{B2} . In the low-nitrogen crystals the B2 IR-band is absent or, if present, is quite below its possible value. Also was investigated collection of diamonds from Juina area (state Mato Grosso). It includes 55 crystals of $-2 + 1 \text{ mm}$ size. They are represented by chips and splinters with fragments of rounded natural surface (18 %), by rounded chips and splinters (14 %), fresh splinters (24 %), rounded intergrowths and polycrystals saturated with gray inclusions (44 %). Collection from Juina area, as compared with diamonds from the Macaubas river, contains a bit more of crystals with high degree of aggregation (34 %), 10 % of specimens have the low aggregation degree, and the remaining part of selection is quite uniformly distributed by this parameter, with its mean value 65 %. The average C_N value is 390 ppm, the share of crystals with N lesser than 100 ppm is 36 %. Obtained results for diamonds from Juina area differs from data published about any known sources of this region, firstly — by the greater N value, secondly — by the presence of significant amount of crystals with low and intermediate degree of the nitrogen aggregation, corresponding, in traditional interpretation, to temperatures $1100\text{—}1150 \text{ }^\circ\text{C}$. Comparison of new data on the Macaubas river diamonds with results of previous investigations shows the greater values of the nitrogen aggregation degrees (17 and 50 %) and the higher average concentrations of nitrogen (370 and 500 ppm). The newly-obtained data indicate that in alluvial placers of Juina area there are not only diamonds with high and intermediate value of nitrogen aggregation degree, but also there are the relatively "low-temperature" crystals. It means the polygenetic nature of diamonds in Juina area and river Macaubas basin.