

УДК 549.211

СТРУКТУРНО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ АЛМАЗА МЕСТОРОЖДЕНИЯ М.В. ЛОМОНОСОВА (АРХАНГЕЛЬСКАЯ ПРОВИНЦИЯ): НОВЫЕ ДАННЫЕ И ИХ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Г. Ю. Криулина¹, Е. А. Васильев², В. К. Гаранин³

Представлено академиком РАН Д. Ю. Пушаровским 27.06.2017 г.

Поступило 29.06.2017 г.

В месторождении имени М.В. Ломоносова выделены три группы кристаллов алмаза, отличающихся по морфологии, фотолюминесценции, поглощению в инфракрасном диапазоне, термической истории. Кристаллы первой группы, в основной массе октаэдрического габитуса с незначительными признаками растворения, имеют высокую долю азота в форме *B*-дефектов. Кристаллы второго типа — это сильно растворённые додекаэдровиды с низкой долей *B*-дефектов. Третья группа включает кристаллы с низкотемпературными *C*-дефектами, к ней принадлежат кубоиды, часто без следов растворения, и тетрагексаэдровиды. Выявленное разделение указывает на полигенность алмаза в месторождении имени М.В. Ломоносова.

Ключевые слова: алмаз, месторождение им. М.В. Ломоносова, ИК-спектроскопия, фотолюминесценция.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524866695-698>

В месторождениях Архангельской алмазоносной провинции (ААП) до 70% сильно растворённых кристаллов — додекаэдровидов и тетрагексаэдровидов [1, 2], что сближает их с кристаллами из россыпей неустановленного генезиса севера Якутской алмазоносной провинции и Урала [3–5]. В месторождениях ААП также высока доля жёлтых кристаллов кубического и додекаэдрического габитуса ювелирного качества [2] с *C*-центрами — самой низкотемпературной формой примесного азота. Алмазы этого типа ювелирного качества редки в известных коренных месторождениях не только России, но и Мира. Несмотря на уникальность, алмаз из месторождений ААП недостаточно исследован методом инфракрасной (ИК) спектроскопии, а исследование фотолюминесценции (ФЛ) на современном уровне ещё не проводилось.

Мы изучили кристаллы алмаза массой от 0,06 до 0,5 карата (фракция крупности $-4+2$ мм) из промышленной добычи кимберлитовых трубок Архангельская (63 шт.), Карпинского-1 (44 шт.) и перспективной для разработки трубки Пионерская (43 шт.). Спектры ИК-поглощения регистрировали на Фурье-спектрометре VERTEX-70 с микроскопом Nuregon1000 с разрешением 2 см^{-1} . Спектры ФЛ регистрировали при 300 К на спектрометре Horiba FL-3

с возбуждением Хе-лампой мощностью 450 Вт, лазерами 405 и 450 нм при 77 К и на спектрометре Renishaw in Via с возбуждением лазерами 785 и 488 нм при 77 К.

Морфология кристаллов соответствует опубликованным данным [4, 5]: среди целых кристаллов около 70% додекаэдровидов, 15% октаэдров и октаэдровидов, 15% кубоидов и тетрагексаэдровидов. В трубке Пионерская немного выше доля октаэдров, особенно в мелких классах. Максимальная концентрация азота $N_{\text{общ}}$ в кристаллах достигает 2400 ppm, доля азота в форме *B* дефектов (N_B) меняется от 0 до 97%. По параметру N_B , определяемому термической историей [6] и лежащему в основе физической классификации, кристаллы разделяются на три группы: 1) тип IaAB с высокой модельной температурой, 2) превалирующий в коллекции тип IaA, 3) тип Ib и IaA+Ib с низкой модельной температурой. Кристаллы типа IaAB подверглись наиболее длительному или высокотемпературному отжигу в естественных условиях, а кристаллы типа Ib претерпели, соответственно, самый кратковременный или относительно низкотемпературный отжиг. Оказалось, что эти группы чётко отличаются также по морфологии (рис. 1) и по ФЛ. По отдельным кимберлитовым трубкам меняется соотношение кристаллов в этих группах, но характеристики внутри групп не меняются, поэтому далее разделение кристаллов по трубкам не приводится.

К первой группе принадлежат плоскогранные октаэдры, кристаллы с полицентрическим строением, октаэдры с признаками растворения, к ним

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва

² Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург

³ Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана Российской Академии наук, Москва

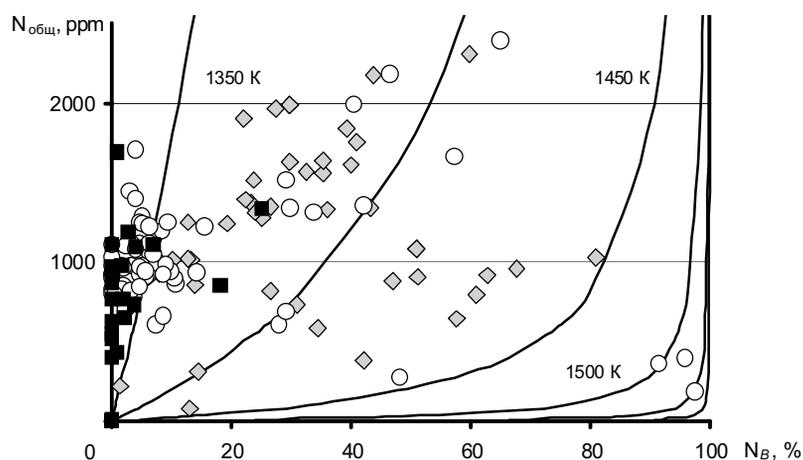


Рис. 1. Распределение кристаллов по концентрации азота и доле в форме *B*-дефектов, изотермы соответствуют 3Ga [6]:
 ◆ — кристаллы I группы: октаэдры плоскогранные, полицентрические, октаэдровиды, комбинационные формы;
 ○ — II группа: додекаэдровиды; ■ — III группа: кубовиды, тетрагексаэдровиды.

близки уплощённые тригонтриоктаэдровиды. В этой группе N_B выше 15 %, в спектрах регистрируется полоса *B'*, это тип IaAB либо низкоазотные индивиды. Коэффициент поглощения полосы на 3107 см^{-1} центра N_3VN (α_{3107}) в среднем составляет $4,5\text{ см}^{-1}$, в отдельных кристаллах достигает 16 см^{-1} . В спектре ФЛ таких кристаллов при комнатной температуре доминирует система *N3* или *N3* и *S3*, регистрируется система *S2* [7]. Жёлтая окраска таких кристаллов обусловлена системой *N3*. При возбуждении (λ_B) 785 нм в спектре ФЛ части кристаллов регистрируются полосы с максимумами 912, 933 нм и отмечаемые в кристаллах всех типов полосы 804, 814, 826 нм — сателлиты линии 787 нм. В одном октаэдре, близком к типу типа IIa обнаружены полосы ФЛ 883,5 и 885 нм Ni-содержащего дефекта [8]. При λ_B 488 нм регистрируются системы *H3*(503), *S3*(503,4), 536, 612,5, 641, 644, 655, 700 нм. Есть кристаллы, в которых интенсивность ФЛ ниже комбинационного рассеяния (КР) второго порядка при λ_B 785 нм, а в некоторых и при 488 нм.

Вторая группа включает бесцветные или жёлтые индивиды — типичные “уральские” додекаэдровиды, тетрагексаэдровиды, которые рассматриваются как предельная форма растворения [9]. Большая часть кристаллов содержит азот преимущественно в форме *A*-дефектов, N_B менее 15%. Около 20% додекаэдровидов характеризуется N_B в диапазоне 20—97% (тип IaAB), по особенностям ФЛ они аналогичны кристаллам первой группы. В спектрах ИК-поглощения некоторых алмазов типа IaA регистрируется набор полос с максимумами 3050, 3144, 3154, 3189, 3311 см^{-1} , совместно с известными полосами дефекта N_3IN : 1405, 2786, 3107, 3237, 4496 см^{-1} . Эти полосы обнаружены в спектрах кристаллов типа Ib

[10] и приписываются колебаниям *CH*-групп. В исследованных кристаллах эти полосы регистрируются как в жёлтых индивидах с низкой, не детектируемой по ИК-спектрам концентрацией *C*-дефектов, так и в бесцветных типа IaA, но в образцах типа Ib такие полосы отсутствуют. Коэффициент поглощения α_{3107} в среднем $4,7\text{ см}^{-1}$, в отдельных кристаллах до 24 см^{-1} . В спектрах ФЛ алмазов типа IaA при возбуждении (λ_B) в ультрафиолетовом диапазоне регистрируются системы *N3*, *H3*, *S1*, *S2*, *S3*, 575 нм. В спектрах алмаза типа IaA+Ib системы *S1*, *S3*, 575 нм. Сопутствующие полосе *S3* линии 787, 718 нм регистрируются при λ_B 450 нм, а линия 793 нм при λ_B 350, 405 нм. При λ_B 785 нм в спектрах ФЛ алмазов типа IaA регистрируются полосы с максимумами 804, 814, 824, 903, 926, 945. Для кристаллов с признаками пластической деформации характерны полосы 948, 962, 980–985, 1020 нм. При λ_B 488 нм регистрируются полосы с максимумами 527,5; 530; 536; 603,5; 612; 667; 687,5; 689; 694; 700; 729 нм.

Третья группа включает кристаллы типа Ib и IaA+Ib по физической классификации. По морфологии к ней относятся кубовиды, тетрагексаэдровиды, в том числе переходные к додекаэдроидам формы, скелетные кубовиды. В таких кристаллах концентрация азота в форме *C*-дефектов достигает 600 ppm, доля азота в этой форме изменяется соответственно от первых долей до 100%. В спектрах поглощения кристаллов типа IaA и IaA+Ib проявляются также системы поглощения с набором узких полос (рис. 2): 1406, 1430, 1447, 1456, 1465, 1387, 1503 1550, 1564, 1575 см^{-1} , с коэффициентом поглощения до $0,9\text{ см}^{-1}$ и шириной на половине высоты 4 см^{-1} .

Набор этих полос не постоянен: полоса 1363 см^{-1} может присутствовать индивидуально, полосы 1353,

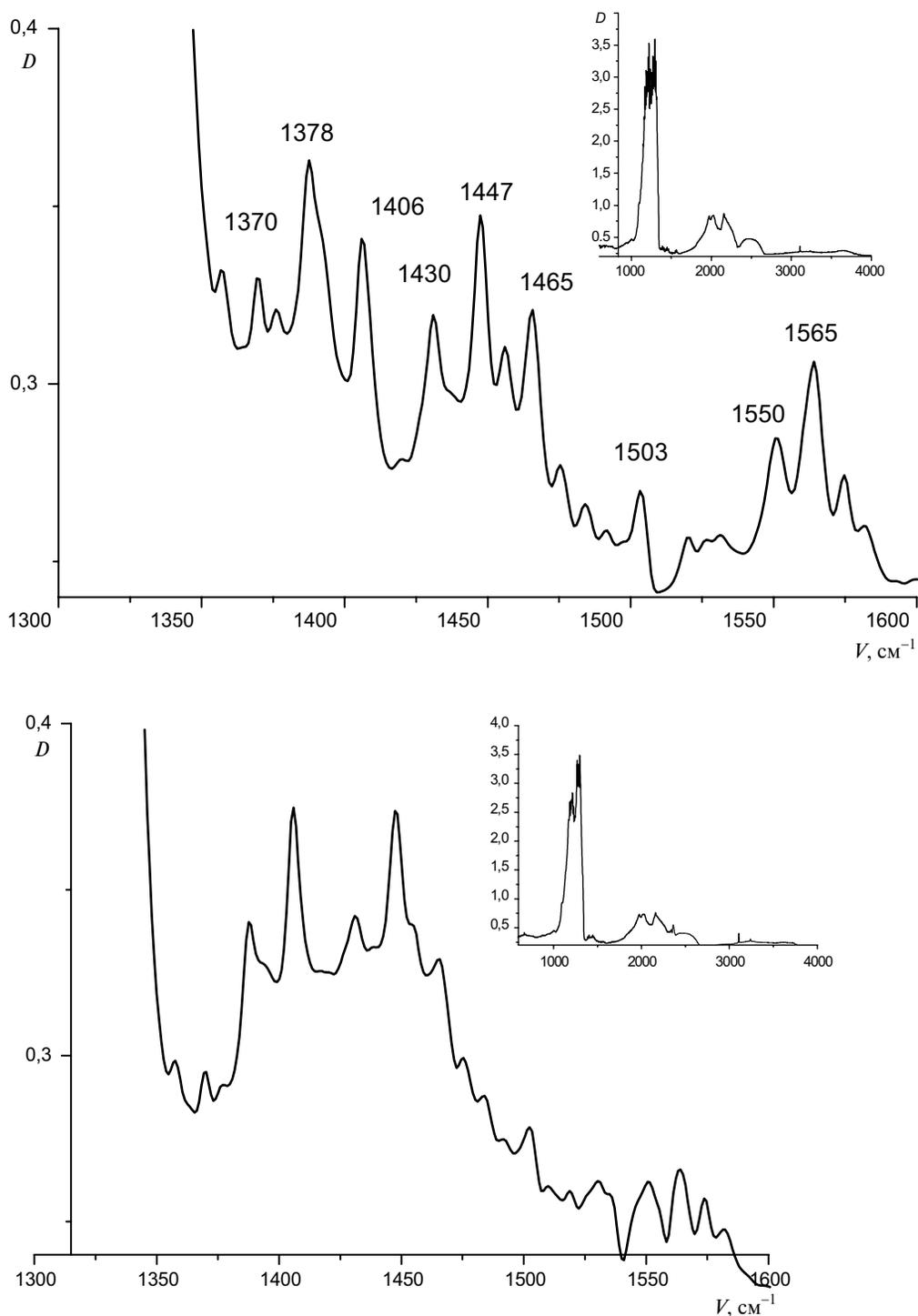


Рис. 2. Особенности спектров поглощения кристаллов III группы типа IaA+Ib в области 1300–1500 cm^{-1} . На вставках приведены спектры во всём диапазоне.

1361, 1374 cm^{-1} регистрируются вместе, так же вместе регистрируется и набор 1386, 1432, 1445, 1465 cm^{-1} . В кристаллах типа Ib эти полосы не регистрируются, в них α_{3107} менее 1 cm^{-1} . Спектры ФЛ этой группы наиболее разнообразны. При $\lambda_{\text{в}}$ 488 нм регистрируются системы H3, 575, 638 нм, полоса с максимумом

503,4 (спутники при 540,6; 524), 525; 612; 582 и 587; 624,3; 689; 697; 705 нм и много слабых полос. При $\lambda_{\text{в}}$ 785 нм в спектрах ФЛ алмазов этого типа отмечаются полосы с максимумами 926, 985 (H2), а также полоса 904 нм, которая может быть на два порядка интенсивнее линии КР. В спектрах двух кристаллов

зарегистрированы полосы 883,5; 885 нм. Детальное описание обнаруженных особенностей люминесценции, многие из которых не наблюдались при исследовании аналогичных кристаллов [11], будет приведено в отдельной работе.

Три выделенные группы перекрываются, что обусловлено сложной зональностью отдельных кристаллов [2, 4, 12] и вариативностью ростовых систем. Доля кристаллов из разных групп с пересекающимися характеристиками составляет до 20%. Вариации характеристик додекаэдрических кристаллов второй группы указывают на вторичную природу морфологических отличий, вызванных растворением первично разных по термической истории кристаллов алмаза, что подтверждается исследованиями внутреннего строения [5, 7].

Таким образом, в месторождении им. М.В. Ломоносова ААП выделяются три группы кристаллов, отличающиеся по морфологии, ФЛ, ИК-поглощению и, соответственно, термической истории. Выявленные закономерности не соответствуют концепции эволюционного дискретного развития одной алмазогенерирующей системы и указывают на полигенность алмаза в месторождении имени М.В. Ломоносова.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках ГК № 2013/188 от 10.04. 2013г., при финансовой поддержке гранта РФФИ 19-17-00131.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кудрявцева Г.П., Посухова Т.В., Вержак В.В., и др. Атлас: морфогенез алмаза и минералов-спутников в кимберлитах и родственных породах Архангельской алмазоносной провинции М.: Полярный круг, 2005. 607 с.
2. Палажченко О.В. // Вестн. МГУ. Сер. 4. Геология. 2008. № 2. С. 68–75.
3. Зинчук Н.Н., Коптиль В.И. Типоморфизм алмазов Сибирской платформы. М.: Недра-Бизнесцентр., 2003. 603 с.
4. Хачатрян Г.К., Палажченко О.В., Гаранин В.К., и др. // Вестн. МГУ. Сер. 4. Геология. 2008. № 2. С. 38–45
5. Васильев Е.А., Козлов А.В., Нефедов Ю.В., Петровский В.А. // Зап. Горн. Ун., 2013. Т. 200. С. 167–171.
6. Taylor W.R., Jaques A.L., Ridd M. // Amer. Mineral. 1990. V. 75. P. 1290–1310.
7. Dishler B. Handbook of Spectral Lines in Diamond. B.: Springer. 2012. 467 p.
8. Yelisseyev A., Kanda H. // New Diam. Front. C Tech. 2007. V. 17. № 3. P. 127–178.
9. Khokhryakov A.F., Pal'yanov Yu.N. // Amer. Miner. 2007. V. 92. P. 909–917.
10. Fritsch E., Hainschwang T., Massi L., Rondeau B. // New Diam. Front. C Tech. 2007. V. 17. № 2. P. 63–89.
11. Titkov S.V., Mineeva R.M., Zudina N.N., et al. // Phys. Chem. Minerals. 2015. V. 42. P. 131–141.
12. Криулина Г.Ю., Гаранин В.К., Васильев Е.А., и др. // Вестн. МГУ. Сер. 4. Геология. 2012. № 5. С. 12–18.

STRUCTURAL AND MINERALOGICAL FEATURES OF DIAMOND FROM M. V. LOMONOSOV DEPOSIT (ARKHANGELSK PROVINCE): NEW DATA AND THEIR INTERPRETATION

G. Yu. Kriulina¹, E. A. Vasilev², V. K. Garanin³

¹ Geological faculty of Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

² Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russian Federation

³ Fersman mineralogical museum RAS, Moscow, Russian Federation

Presented by Academician of the RAS

D. Yu. Pushcharovsky June 27, 2017

Received June 29, 2017

In the deposit n.a. Y. M. Lomonosov three groups of diamond crystals were distinguished on the base of morphology, photoluminescence, infrared absorption features and the thermal history. The crystals of the first group are octahedrons with minor signs of dissolution. In the first group, crystals have a high proportion of nitrogen in the *B* form and the high model temperature. The crystals of the second type is highly resorbed dodecahedroids, they has low proportion of nitrogen in *B* form. The third group consists of crystals with the low temperature *C* defects, they are cuboids and resorbed tetrahexahedroids. These patterns indicate the polygenicity of the diamond in the deposit after M.V. Lomonosov.

Keywords: diamond, deposit n.a. Y. M. Lomonosov, FTIR, photoluminescence.