

Известия Алтайского государственного университета. 2026. № 1 (147). С. 63–70.

Izvestiya of Altai State University. 2026. No 1 (147). P. 63–70.

Научная статья

УДК 539.89:549.21

[https://doi.org/10.14258/izvasu\(2026\)1-08](https://doi.org/10.14258/izvasu(2026)1-08)

### **Устойчивость к графитизации импактных алмазов Попигайской астроблемы при 6 ГПа и 1600–2250 °С**

*Алексей Анатольевич Чепуров<sup>1</sup>, Егор Игоревич Жимулев<sup>2</sup>,  
Иван Александрович Грязнов<sup>3</sup>, Александр Сергеевич Богданов<sup>4</sup>,  
Денис Григорьевич Богданов<sup>5</sup>, Захар Алексеевич Карпович<sup>6</sup>*

<sup>1</sup>Институт геологии и минералогии СО РАН им. В.С. Соболева, Новосибирск, Россия, [acherurov@gm.nsc.ru](mailto:acherurov@gm.nsc.ru)

<sup>2</sup>Институт геологии и минералогии СО РАН им. В.С. Соболева, Новосибирск, Россия, [ezhimulev@igm.nsc.ru](mailto:ezhimulev@igm.nsc.ru)

<sup>3</sup>Институт геологии и минералогии СО РАН им. В.С. Соболева, Новосибирск, Россия, [gryaznovia@igm.nsc.ru](mailto:gryaznovia@igm.nsc.ru)

<sup>4</sup>ООО «Испытательный центр технических средств железнодорожного транспорта», Барнаул, Россия, [alexandr-bogdanov@mail.ru](mailto:alexandr-bogdanov@mail.ru)

<sup>5</sup>ООО «Сибинтерра», Барнаул, Россия, [bogdanov.d.g@mail.ru](mailto:bogdanov.d.g@mail.ru)

<sup>6</sup>Институт геологии и минералогии СО РАН им. В.С. Соболева, Новосибирск, Россия, [zharpovich@yandex.ru](mailto:zharpovich@yandex.ru)

Original article

### **Resistance to Graphitization of Impact Diamonds from the Popigai Astrobleme under 6 GPa and 1600–2250 °C**

*Alexey A. Chepurov<sup>1</sup>, Egor I. Zhimulev<sup>2</sup>, Ivan A. Gryaznov<sup>3</sup>,  
Alexander S. Bogdanov<sup>4</sup>, Denis G. Bogdanov<sup>5</sup>, Zachar A. Karpovich<sup>6</sup>*

<sup>1</sup>Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia, [acherurov@gm.nsc.ru](mailto:acherurov@gm.nsc.ru)

<sup>2</sup>Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia, [ezhimulev@igm.nsc.ru](mailto:ezhimulev@igm.nsc.ru)

<sup>3</sup>Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia, [gryaznovia@igm.nsc.ru](mailto:gryaznovia@igm.nsc.ru)

<sup>4</sup>LLC "Test Center for Railway Transport Equipment", Barnaul, Russia, [alexandr-bogdanov@mail.ru](mailto:alexandr-bogdanov@mail.ru)

<sup>5</sup>Software Engineer, Sibinterra LLC, Barnaul, Russia, [bogdanov.d.g@mail.ru](mailto:bogdanov.d.g@mail.ru)

<sup>6</sup>Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia, [zharpovich@yandex.ru](mailto:zharpovich@yandex.ru)

**Аннотация.** В работе представлены результаты исследования влияния температуры от 1600 до 2250 °С при давлении 6 ГПа на процесс графитизации лонсдейлитсодержащих импактных алмазов Попигайской астроблемы. Сопоставление термической устойчивости светлых импактных алмазов 1 типа (без включений графита, 0–25 % лонсдейлита) и темноокрашенных 2 типа (40–45 % лонсдейлита с различным соотношением графита и алмаза) импактных алмазов Попигайской астроблемы показывает: импактные

**Abstract.** The paper presents the results of a study of the influence of temperature ranging from 1600 to 2250 °C under pressure of 6 GPa on the graphitization process of lonsdaleite-containing impact diamonds from the Popigai astrobleme. A comparison of the thermal stability of light type 1 impact diamonds (without graphite inclusions, lonsdaleite 0–25 %) and black type 2 impact diamonds (lonsdaleite 40–45 % with different ratios of graphite and diamond) from the Popigai astrobleme shows that type 1 impact diamonds are more

алмазы 1 типа более устойчивы к термобарическому воздействию в условиях высокого давления, чем черные алмазы 2 типа. После экспериментов при высоких P-T параметрах в алмазах 1 типа по данным КР-спектроскопии появляются два основных типа структур графитов: высокоупорядоченный и низкоупорядоченный (аморфный) графиты. Вероятно, присутствие включений (реликтов) исходного графита, трещин и включений других фаз, в том числе флюидной фазы (воздух) в импактных алмазах 2 типа инициирует графитизацию внутри образцов по механизму, аналогичному графитизации на поверхности кристаллов. Учитывая различную термическую устойчивость импактных алмазов, необходима сортировка импактных алмазов по содержанию в них графита для использования в алмазном инструменте.

**Ключевые слова:** импактные алмазы, эксперимент, высокое давление и температура, графитизация

**Для цитирования:** Чепуров А.А., Жимулев Е.И., Грязнов И.А., Богданов А.С., Богданов Д.Г., Карпович З.А. Устойчивость к графитизации импактных алмазов Попигайской астроблемы при 6 ГПа и 1600–2250 °C // Известия Алтайского государственного университета. 2026. № 1 (147). С. 63–70. [https://doi.org/10.14258/izvasu\(2026\)1-08](https://doi.org/10.14258/izvasu(2026)1-08).

**Финансирование:** исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-23-00045.

## Введение

В настоящее время импактные алмазы обнаружены в разных астроблемах, но наиболее изученной является Попигайская астроблема, находящаяся в Восточной Сибири, Российская Федерация [1–2]. Образование лонсдейлитсодержащих импактных алмазов Попигайской астроблемы происходило в ходе масштабного взрыва на поверхности Земли в результате падения крупного метеорита. При падении метеорита в районе его кратера на короткое время возникли высокие давления и температуры, которые вызвали прямой переход графита в алмаз. Поэтому импактные алмазы являются параморфозами по графиту, содержавшемуся в породах мишени — графитсодержащих гнейсах [3]. Учитывая эффект сжатия, в качестве механизма превращения графита в алмаз используют представление о мартенситном фазовом переходе [4]. Размеры импактных алмазов в Попигайском месторождении составляют от микронов до нескольких миллиметров, хотя могут достигать и 1 см [5]. Одной из характеристик импактных алмазов является присутствие в них лонсдейлита — гексагональной  $sp^3$  модификации углерода и графита (как первичного, так и новообразованного). По данным ТЭМ установлено детальное строение природных импактных алмазов, причем отмечают интенсивное двойникование наноиндивидов [6].

resistant to thermobaric effects under high pressure conditions than black type 2 diamonds. Experiments at high P-T parameters reveal two main types of graphite structures that appear in type 1 diamonds according to Raman spectroscopy data: newly formed highly ordered and low-ordered (amorphous) graphites. It is likely that the presence of inclusions (relics) of the original graphite, cracks and inclusions of other phases including the fluid phase (air) in type 2 impact diamonds, initiates graphitization inside the samples following a mechanism similar to graphitization on the surface of crystals. It is necessary to sort impact diamonds according to their graphite content for use in diamond tools, considering the different thermal stability of impact diamonds.

**Keywords:** impact diamonds, experiment, high pressure and temperature, graphitization

**For citation:** Chepurov A.A., Zhimulev E.I., Gryaznov I.A., Bogdanov A.S., Bogdanov D.G., Karpovich Z.A. Resistance to Graphitization of Impact Diamonds from the Popigai Astrobleme under 6 GPa and 1600–2250 °C. *Izvestiya of Altai State University*. 2026. No 1 (147). P. 63–70. (In Russ.). [https://doi.org/10.14258/izvasu\(2026\)1-08](https://doi.org/10.14258/izvasu(2026)1-08).

**Funding:** the research was funded by the Russian Science Foundation (project No 25-23-00045).

На зернах импактных алмазов нередко присутствует поверхностный графит при сохранении алмазного ядра, что указывает на природный процесс их поверхностной графитизации [7–9]. В научной литературе недостаточно экспериментальных оценок влияния процесса графитизации импактных алмазов, хотя и предполагается существенное значение этого процесса в природе [1, 10]. Кроме того, интерес к импактным алмазам Попигайской астроблемы обусловлен их высокой твердостью и абразивной устойчивостью, с одной стороны, и, с другой, огромными запасами, многократно превышающими разведанные мировые запасы алмазов в кимберлитовых месторождениях [4, 11]. В работе представлены результаты исследования влияния температуры 1600–2250 °C при давлении 6 ГПа на процесс графитизации лонсдейлитсодержащих импактных алмазов Попигайской астроблемы.

## Методика эксперимента

Эксперименты были проведены на многопуансонном аппарате высокого давления «разрезная сфера» [12]. Точность определения температуры в центре реакционного объема ячейки  $\pm 25$  °C. Давление поднимали в опытах со скоростью 0.1–0.2 ГПа/мин; точность определения давления составляла  $\pm 0.2$  ГПа. До и после опытов образцы исследовали методами оптической, сканирующей электронной микроскопии,

КР-спектроскопии. Спектры комбинационного рассеяния были записаны на спектрометре Horiba Jobin Yvon LabRam HR800 с 1024-многоканальным детектором CCD (Andor).

Образцы лонсдейлитсодержащих паракристаллов импактного алмаза Попигайской астроблемы

1 типа (рис. 1) представляли собой светлые, прозрачные образцы размером 0.1–1 мм. По данным КР-спектроскопии, графит в импактных алмазах 1 типа отсутствовал или присутствовал в незначительных количествах [12].

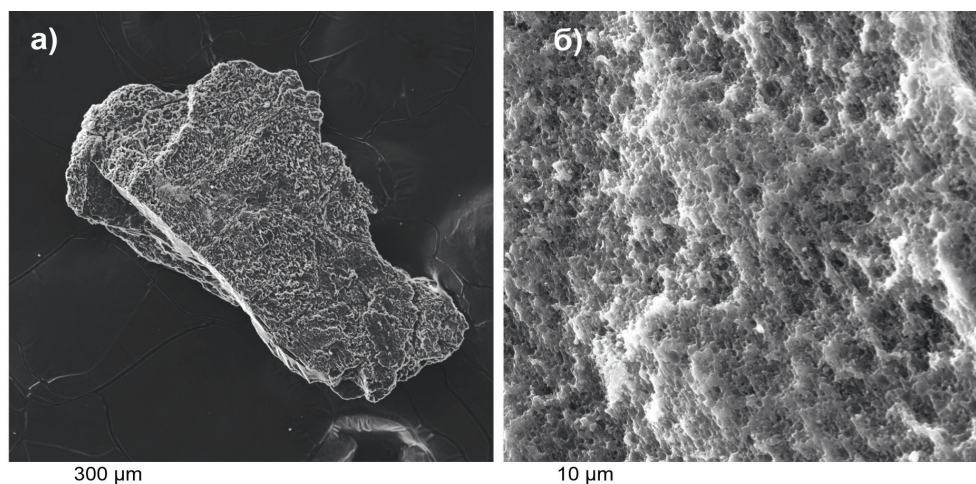


Рис. 1. а) Паракристалл импактного алмаза 1 типа; б) деталь мелкоячеистой поверхности паракристалла импактного алмаза 1 типа

Исследование исходных кристаллов импактного алмаза методом КР-спектроскопии показало, что по соотношению интенсивности полос КР-спектров лонсдейлита и алмаза содержание лонсдейлита в затравках 1 типа варьировало от 0 до 25 %. КР-спектр импактного алмаза 1 типа характеризуется полосами КР 1-го порядка, расположенными в области  $1328\text{--}1333\text{ см}^{-1}$  с максимумами при  $1329.8\text{ см}^{-1}$  (5-1) и  $1327.7\text{ см}^{-1}$  (5-2). Кроме основной полосы на КР-спектре импактного алмаза типа 1, характерной для кубической фазы, присутствует небольшая полоса лонсдейлита, находящаяся на спектрах Попигайских алмазов в интервале  $1292\text{--}1303\text{ см}^{-1}$ .

Образцы импактного алмаза типа 2 — темноокрашенные кристаллы и их фрагменты лонсдейлитсодержащих импактных алмазов размером 0.2–0.5 мм. Важной особенностью импактных алмазов типа 2 является присутствие в них одновременно наряду с алмазом лонсдейлита и графита. Лонсдейлит с графитом присутствует в разном количестве (от нескольких до десятков процентов), но как самостоятельная фаза он не обнаружен [10]. На КР-спектре темноокрашенного алмаза типа 2 присутствует хорошо выраженная полоса G графита, который находится в виде включений в алмазе, вследствие чего алмазы имеют темную окраску.

Исследование кристаллической структуры и фазового состава исходных образцов проводили методом рентгеноструктурного и рентгенофазового анализов на дифрактометре ДРОН-3 с медным анодом рентгеновской трубки. Рентгенограммы образцов снимали в угловом интервале  $2\theta=38^\circ\text{--}100^\circ$  в дискретном режи-

ме с шагом сканирования  $0,01^\circ$  и временем экспозиции в каждой точке 3.6 сек.

### Результаты и их обсуждение

#### Рентгеновские данные импактных алмазов

Как известно, положение некоторых рефлексов алмаза и лонсдейлита (гексагонального алмаза) практически полностью совпадает [13, 14]. Для диагностики лонсдейлита служат наиболее сильные рефлексы, расположенные в диапазоне углов  $37\text{--}50$ : (100), (002), (101). Для алмаза в этом диапазоне имеется один наиболее интенсивный рефлекс (111). Поэтому на рентгенограмме образцов, содержащих как кубический, так гексагональный алмаз, в области указанных углов будет наблюдаться один широкий асимметричный рефлекс с перегибом или при значительном содержании лонсдейлита в образце дополнительный рефлекс на малоугловом крыле около  $41$  углов  $2\theta$  [15].

Рассмотрим рисунок 2, на котором представлены рентгенограммы образцов K04-6 и K04-9. Как видно, наиболее четко проявляются рефлексы от плоскостей (111), (220) и (311) в структуре кубического алмаза. Ярко выраженные рефлексы лонсдейлита отсутствуют. Однако в области углов  $40\text{--}50$  (участки на рисунке выделены прямоугольной областью) мы наблюдаем вышеописанный широкий асимметричный рефлекс, который свидетельствует о присутствии лонсдейлита в структуре импактных алмазов. Анализ асимметрии используется для диагностики и содержания лонсдейлита.

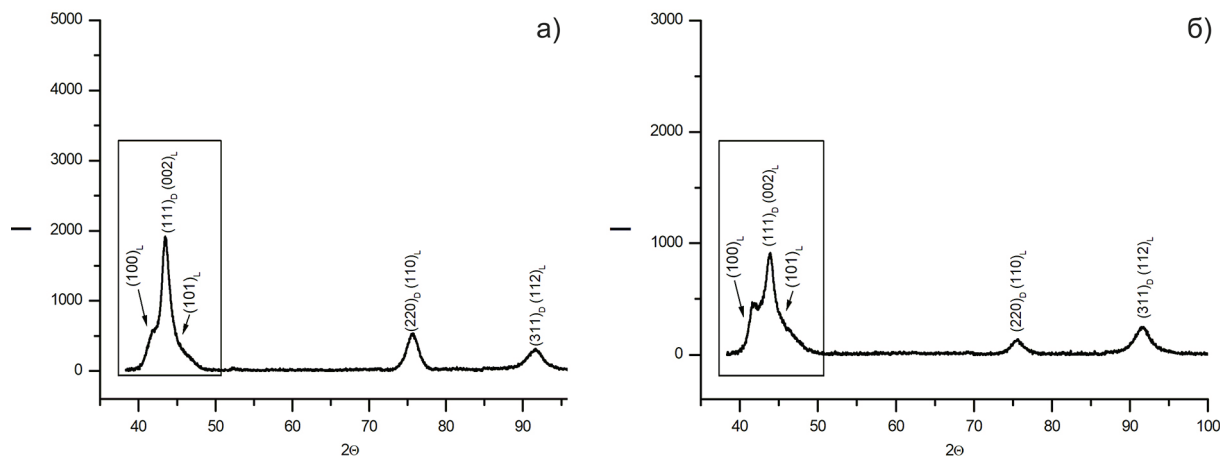


Рис. 2. Рентгенограммы импактного алмаза K04-6 (а) и K04-9 (б)

Качественный фазовый анализ показал, что все образцы импактных алмазов состоят из двух фаз: кубического алмаза и гексагонального алмаза. По рентгенограммам образцов можно предположить, что значительная часть углерода находится в кубической алмазной фазе. В этой связи предпочтитель-

нее для анализа уширения рефлексов лонсдейлита использовать наиболее яркие рефлексы (100), (002) и (101), находящиеся в диапазоне углов 40–50 градусов. Рефлексы как кубического, так и гексагонального алмазов сильно уширены. В таблице 1 представлены данные рентгеноструктурного анализа образцов.

Таблица 1

Положение рентгеновских рефлексов 2θ и значения физического уширения

Образец	Алмаз			Лонсдейлит		
	(hkl)	2θ, гр	β, гр	(hkl)	2θ, гр	β, гр
K04-6	111	43.55	1.28	100	41.51	0.79
	220	75.6	1.44	002	42.6	0.83
	311	91.6	1.97	101	47.2	1.06
K04-9	111	43.9	2.08	100	41.58	0.85
	220	75.37	2.18	002	44.1	1.02
	311	91.64	2.03	101	47.39	0.94

Для определения размеров кристаллов использовалась упрощенная формула, согласно которой физическое уширение рентгеновских линий β связано только с эффектом дисперсности выражением:

$$\beta = \frac{\lambda}{D \cos \theta}$$

В случае, когда пик лонсдейлита (100) может быть полностью идентифицирован, для количественной

оценки содержания лонсдейлита в импактных алмазах может быть использована формула:

$$KL = 100IL100 / I0 [16],$$

где I0 — интенсивность суммарного пика Ia111 + IL002; IL100 — полная интенсивность пика (100) лонсдейлита.

В таблице 2 представлены данные рентгеноструктурного и рентгенофазового анализа различных образцов импактных алмазов.

Таблица 2

Данные рентгеновских исследований якутитов

Маркировка образца	Фаза	Размеры ОКР, нм	Содержание, вес. %
K04-6	Алмаз	6.7	92
	Лонсдейлит	10.1	8
K04-9	Алмаз	4.9	83
	Лонсдейлит	9.6	17

**Кристаллы импактного алмаза Попигайской астроблемы 1 типа**

Поверхностная графитизация импактных алмазов типа 1 при 6 ГПа начинается при температуре

выше 1650 °С с появления отдельных мелких чешуек графита. Далее с повышением температуры (1800–1900 °С) поверхность образцов алмаза покрывается сплошным слоем графита (рис. 3), который продви-

гается по толщине в глубь образца. Установлено сохранение алмазного ядра при утолщении графитового слоя с увеличением температуры. По данным КР-спектроскопии [12], присутствует два графита: преобладает хорошо раскристаллизованный, к кото-

рому относятся G-полоса при  $1581\text{ см}^{-1}$  (рис. 4), и незначительное количество аморфного, неупорядоченного графита с D1-полосой при  $1420\text{ см}^{-1}$ . Полоса КР 1-го порядка термообработанного импактного алмаза 1 типа расположена при  $1329\text{ см}^{-1}$ .

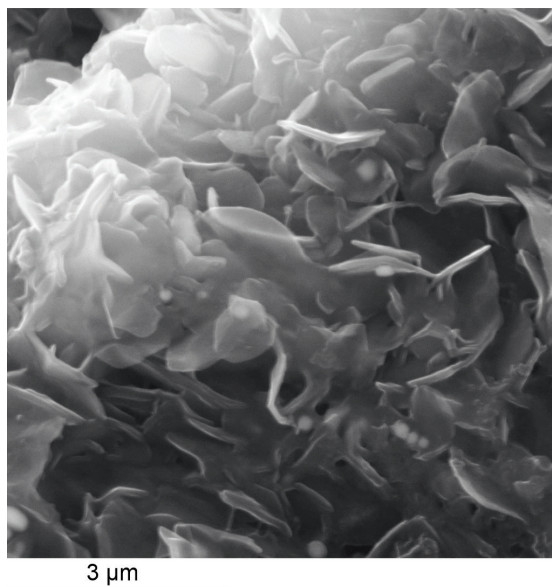


Рис. 3. Мелкие чешуйки хорошо раскристаллизованного графита на поверхности пластины импактного алмаза 1 типа после НРНТ-отжига

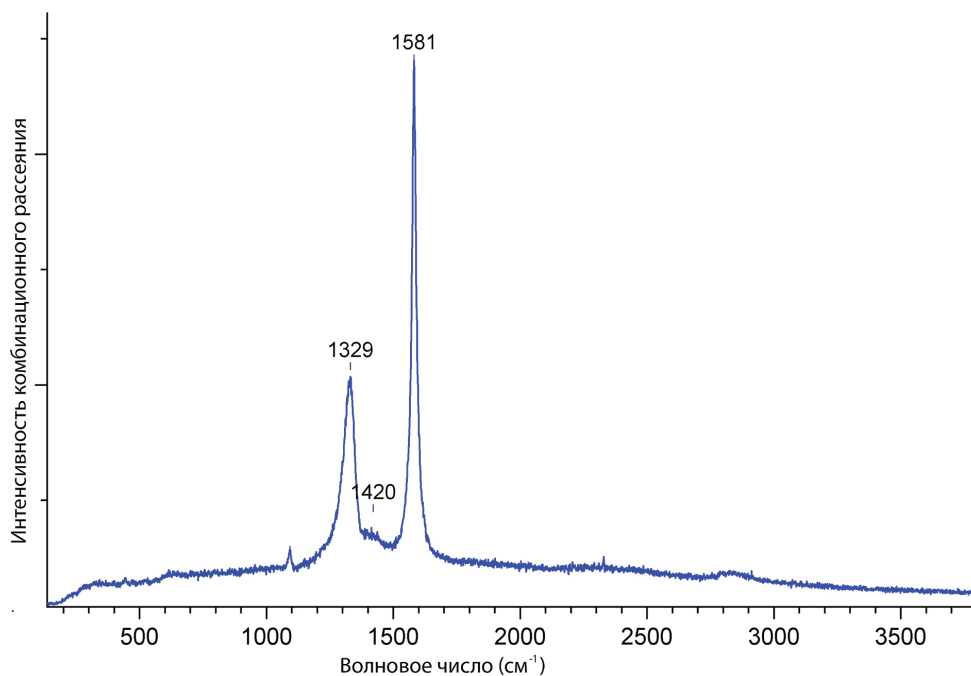


Рис. 4. КР-спектры импактного алмаза 1 типа после НРНТ-отжига

После опытов при  $2040\text{--}2100\text{ °C}$  увеличилась толщина графитовой оболочки образцов. Алмазное ядро (внутренняя часть кристаллов) не было за-

тронуто графитизацией, что наблюдалось после растворения в окислительной смеси внешней графитовой оболочки. Отмечается значительное уси-

ление пиков структурированного графита, неупорядоченный графит присутствует в относительно небольшом количестве.

**Кристаллы импактного алмаза Попигайской астроблемы 2 типа**

Спектры КР исходного темноокрашенного импактного алмаза 2 типа после НРНТ-отжига (рис. 5)

демонстрируют присутствие двух основных фаз графита: хорошо раскристаллизованного графита (с сильной узкой полосой G при  $1582\text{ см}^{-1}$ ) и неупорядоченного аморфного графита (с сильной широкой полосой G при  $1610\text{ см}^{-1}$ ). При термообработке темноокрашенных импактных алмазов 2 типа Попигайской астроблемы установлено, что они полностью переходят в графит при температуре около  $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

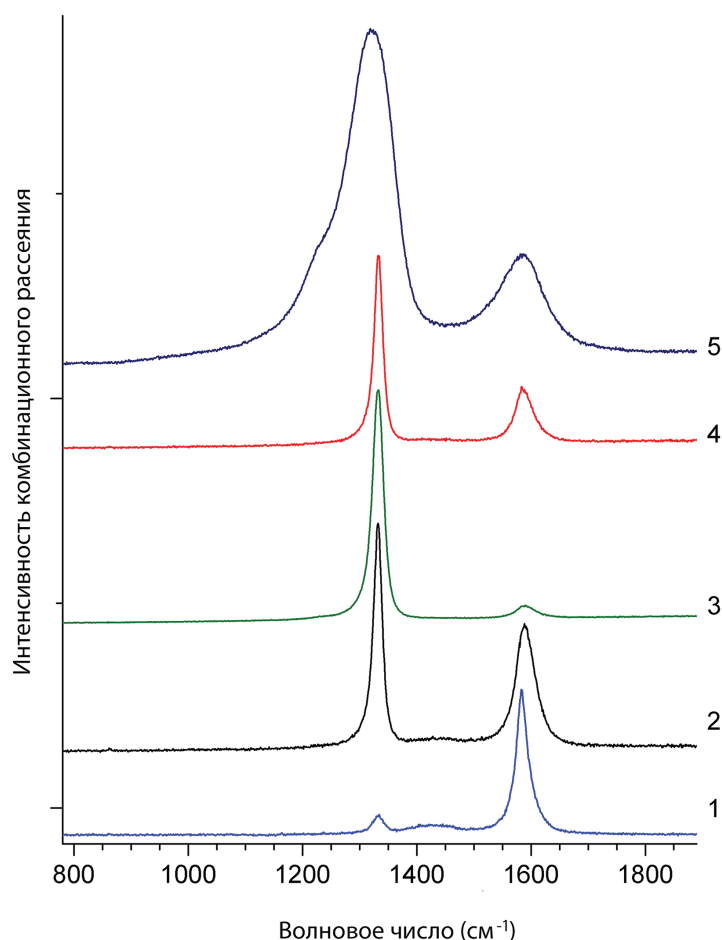


Рис. 5. КР-спектры НРНТ обработанных импактных алмазов 2 типа при разных температурах: от  $1800$  до  $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$  (спектры 1–4). Для сравнения приведен спектр КР исходного образца (5) — темноокрашенного импактного алмаза [12]

**Заключение**

Сопоставление термической устойчивости светлых импактных алмазов 1 типа (без графита, 0–25 % лонсдейлита) и темноокрашенных типа 2 (40–45 % лонсдейлита с различным соотношением графита и алмаза) импактных алмазов Попигайской астроблемы показывает: импактные алмазы 1 типа более устойчивы к термобарическому воздействию в условиях высокого давления, чем темноокрашенные алмазы 2 типа. Темноокрашенные алмазы 2 типа полностью графитизировались при давлении 6 ГПа

до температуры  $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение 3–5 минут, а светлые типа 1 при тех же Р-Т параметрах были графитизированы только с поверхности, и сохранилось «алмазное ядро». Вероятной причиной более высокой термической устойчивости алмазов 1 типа относительно алмазов 2 типа является меньшее содержание лонсдейлита и присутствие внутри последних реликтов исходного графита.

После экспериментов при высоких Р-Т параметрах в алмазах 1 типа, по данным КР-спектроскопии, появляются два основных типа структур графити-

тов: высокоупорядоченный и низкоупорядоченный (аморфный) графиты. Количественно преобладающий высокоупорядоченный графит представлен мелкочешуйчатым агрегатом кристаллов, а аморфный углерод присутствует в незначительном количестве.

Вероятно, низкоупорядоченный графит является промежуточным продуктом в процессе разрушения алмазной структуры и затем роста кристаллов высокоупорядоченного графита: алмаз → аморфный углерод → высокоупорядоченный графит.

### Библиографический список

1. Вишневыи С.А., Афанасьев В.П., Аргунов К.П., Пальчик Н.А. Импактные алмазы: их особенности, происхождение и значение. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1997.
2. Масайтис В.Л., Футергендлер С.И., Гневушев М.А. Алмазы в импактигах Попигаийского кратера // Зап. ВМО. 1972. № 101. Вып. 1. С. 108–113.
3. Шафрановский Г.И. Кристалломорфология алмазов по графиту // Зап. ВМО. 1985. № 114. С. 30–34.
4. Masaitis V.L. Impact Diamonds of the Popigai Astrobleme: Main Properties and Practical Use // *Geology of Ore Deposits*. 2013. Vol. 55. № 8. P. 607–612. <https://doi.org/10.1134/S1075701513080084>
5. Afanasiev V., Gromilov S., Sonin V., et al. Graphite in Rocks of the Popigai Impact Crater: Residual or Retrograde? // *Turkish Journal of Earth Sciences*. 2019. Vol. 28. P. 470–477. <https://doi.org/10.3906/yer-1808-6>
6. Kvasnytsya V., Wirth R. Micromorphology and Internal Structure of Apographitic Impact Diamonds: SEM and TEM study // *Diamond and Related Materials*. 2013. Vol. 32. P. 7–16. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2012.11.010>
7. Масайтис В.Л., Мащак М.С., Райхлин А.И. и др. Алмазоносные импактиты Попигаийской астроблемы // СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ. 1998. 178 с.
8. Вальтер А.А., Квасница В.Н., Еременко Г.К. Структура, состав и оптические свойства параморфоз алмаза по графиту // *Минералогический журнал*. 1990. Т. 12. № 3. С. 3–16.
9. Масайтис В.Л., Шафрановский Г.И., Федорова И.Г. Апографитовые импактные алмазы из астроблем Рис и Попигаий // *Записки ВМО*. 1995. Ч. 124/ № 4. С. 12–19.
10. Вальтер А.А., Еременко Г.К., Квасница В.Н., Полканов Ю.А. Ударно-метаморфогенные минералы углерода // Киев: Наукова думка. 1992.
11. Похиленко Н.П. Минерально-сырьевые ресурсы арктической зоны Неспублики Саха (Якутия) // *Экономика востока России*. 2015. № 2. С. 12–20.
12. Cherpurov A., Goryainov S., Gromilov S., et al. HPHT-Treated Impact Diamonds from the Popigai Crater (Siberian Craton): XRD and Raman Spectroscopy Evidence // *Minerals*. 2023. № 13. 154 p. <https://doi.org/10.3390/min13020154>
13. Denisov V.N., Mavrin B.N., Serebryanaya N.R., et al. First-principles, UV Raman, X-ray diffraction and TEM study of the structure and lattice dynamics of the diamond-lonsdaleite system // *Diamond & Related Materials*. 2011. № 20. P. 951–953.
14. Isobe F., Ohfuji H., Sumiya H., Irifune T. Nanolayered Diamond Sintered Compact Obtained by Direct Conversion from Highly Oriented Graphite under High Pressure and High Temperature // *Journal of Nanomaterials Volume*. 2013. Article ID 380165, 6 p. <https://doi.org/10.1155/2013/380165>
15. Шульженко А.А., Ашкинази Е.Е., Соколов А.Н. и др. Структура и свойства импактных алмазов Попигаийского месторождения и изготовленных на их основе поликристаллов // *Сверхтвердые материалы*. 2014. № 3. С. 18–28.
16. Петровский В.А., Филоненко В.П., Силаев В.И. и др. Рентгеновский анализ якутитов и оценка содержания в них примеси лонсдейлита // *Вестник Пермского университета. Геология*. 2013. № 3. С. 43–60.

### References

1. Vishnevsky S.A., Afanasyev V.P., Argunov K.P., Palchik N.A. *Impact Diamonds: Their Features, Origin and Significance*. Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1997. (In Russ.).
2. Masaitis V.L., Futergendler S.I., Gnevushev M.A. Diamonds in Impactites of the Popigai Crater. *Zapiski VMO (Proceedings of the All-Union Mineralogical Society)*. 1972. No 101. Iss. 1. P. 108–113. (In Russ.).
3. Shafranovsky G.I. Crystal Morphology of Diamonds after Graphite. *Zapiski VMO (Proceedings of the All-Union Mineralogical Society)*. 1985. No 114. P. 30–34. (In Russ.).
4. Masaitis V.L. Impact Diamonds of the Popigai Astrobleme: Main Properties and Practical Use. *Geology of Ore Deposits*. 2013. Vol. 55. № 8. P. 607–612. <https://doi.org/10.1134/S1075701513080084>
5. Afanasiev V., Gromilov S., Sonin V., et al. Graphite in Rocks of the Popigai Impact Crater: Residual or Retrograde? *Turkish Journal of Earth Sciences*. 2019. Vol. 28. P. 470–477. <https://doi.org/10.3906/yer-1808-6>
6. Kvasnytsya V., Wirth R. Micromorphology and Internal Structure of Apographitic Impact Diamonds: SEM and TEM Study. *Diamond and Related Materials*. 2013. Vol. 32. P. 7–16. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2012.11.010>
7. Masaitis V.L., Maschak M.S., Raikhlin A.I., et al. *Diamond-Bearing Impactites of the Popigai Astrobleme*. St. Petersburg: VSEGEI Publish. House. 1998. 178 p. (In Russ.).
8. Walter A.A., Kvasnitsa V.N., Eremenko G.K. Structure, Composition and Optical Properties of Diamond Paramorphoses on Graphite. *Mineralogical Journal*. 1990. Vol. 12. No 3. P. 3–16. (In Russ.).

9. Masaitis V.L., Shafranovskiy G.I., Fedorova I.G. Apographite Impact Diamonds from the Ris and Popigai Astroblemes. *Zapiski RMO (Proceedings of the Russian Mineralogical Society)*. 1995. Part 124. No 4. P. 12–19. (In Russ.).
10. Walter A.A., Eremenko G.K., Kvasnitsa V.N., Polkanov Yu.A. *Shock-Metamorphogenic Carbon Minerals*. Kyiv: Naukova Dumka. 1992. (In Russ.).
11. Pokhilenko N.P. Mineral Resources of the Arctic Zone of the Republic of Sakha (Yakutia). *Economy of Eastern Russia*. 2015. No 2. P. 12–20. (In Russ.).
12. Chepurov A., Goryainov S., Gromilov S., et al. HPHT-Treated Impact Diamonds from the Popigai Crater (Siberian Craton): XRD and Raman Spectroscopy Evidence. *Minerals*. 2023. № 13. 154 p. <https://doi.org/10.3390/min13020154>
13. Denisov V.N., Mavrin B.N., Serebryanaya N.R., et al. First-Principles, UV Raman, X-ray Diffraction and TEM Study of the Structure and Lattice Dynamics of the Diamond-Lonsdaleite System. *Diamond & Related Materials*. 2011. № 20. P. 951–953. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2011.05.013>
14. Isobe F., Ohfuji H., Sumiya H., Irifune T. Nanolayered Diamond Sintered Compact Obtained by Direct Conversion from Highly Oriented Graphite under High Pressure and High Temperature. *Journal of Nanomaterials Volume*. 2013. Article ID 380165. 6 p. <https://doi.org/10.1155/2013/380165>
15. Shulzhenko A.A., Ashkinazi E.E., Sokolov A.N., et al. Structure and Properties of Impact Diamonds from the Popigai Deposit and Polycrystals Made from Them. *Superhard Materials*. 2014. No 3. P. 18–28. (In Russ.).
16. Petrovsky V.A., Filonenko V.P., Silaev V.I., et al. X-ray Analysis of Yakutites and Assessment of the Content of Lonsdaleite Impurity in Them. *Bulletin of Perm University. Geology*. 2013. No 3. P. 43–60. (In Russ.).

#### **Информация об авторах**

**А.А. Чепуров**, доктор геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории экспериментальной петрологии и геодинамики, Институт геологии и минералогии СО РАН им. В.С. Соболева, Новосибирск, Россия;

**Е.И. Жимулев**, доктор геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории экспериментальной петрологии и геодинамики, Институт геологии и минералогии СО РАН им. В.С. Соболева, Новосибирск, Россия;

**И.А. Грязнов**, младший научный сотрудник лаборатории экспериментальной петрологии и геодинамики, Институт геологии и минералогии СО РАН им. В.С. Соболева, Новосибирск, Россия;

**А.С. Богданов**, специалист по испытаниям, Испытательный центр технических средств железнодорожного транспорта, Барнаул, Россия;

**Д.Г. Богданов**, кандидат физико-математических наук, инженер-программист, Сибинтерра, Барнаул, Россия;

**З.А. Карпович**, кандидат геолого-минералогических наук, младший научный сотрудник лаборатории экспериментальной петрологии и геодинамики, Институт геологии и минералогии СО РАН им. В.С. Соболева, Новосибирск, Россия.

#### **Information about the authors**

**A.A. Chepurov**, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Experimental Petrology and Geodynamics, Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia;

**E.I. Zhimulev**, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Experimental Petrology and Geodynamics, Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia;

**I.A. Gryaznov**, Junior Researcher, Laboratory of Experimental Petrology and Geodynamics, Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia;

**A.S. Bogdanov**, Test Engineer, LLC "Test Center for Railway Transport Equipment", Barnaul, Russia;

**D.G. Bogdanov**, Candidate of Sciences in Physics and Mathematics, Software Engineer, Sibinterra LLC, Barnaul, Russia;

**Z.A. Karpovich**, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Junior Researcher, Laboratory of Experimental Petrology and Geodynamics, Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia.