



УДК 549.2116 535.375.54

## ПОЛИГЕНЕЗ И ТИПОМОРФИЗМ ЛОНСДЕЙЛИТА

Т. Г. Шумилова<sup>1</sup>, В. Л. Масайтис<sup>2</sup>, С. И. Исаенко<sup>1</sup>, Е. Майер<sup>3</sup>, В. К. Кис<sup>4</sup>, Б. А. Макеев<sup>1</sup><sup>1</sup>Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, [shumilova@geo.komisc.ru](mailto:shumilova@geo.komisc.ru)<sup>2</sup>Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского (ВСЕГЕИ), Санкт-Петербург, [vcnsts@mail.ru](mailto:vcnsts@mail.ru)<sup>3</sup>Центр электронной микроскопии Ахенского университета, Ахен;Центр электронной микроскопии и спектроскопии им. Эрнста Руска, Юлих, Германия, [mayer@gfe.rwth-aachen.de](mailto:mayer@gfe.rwth-aachen.de)<sup>4</sup>Институт технической физики и материаловедения,Научный центр естественных наук Венгерской академии наук, Будапешт, Венгрия, [kis@mfa.kfki.hu](mailto:kis@mfa.kfki.hu)

Приводятся результаты исследований лонсдейлита в импактных алмазах Попигайской астроблемы и в составе углеродной минерализации метасоматически измененных регионально-метаморфизованных пород Кокчетавского массива (Кумдыкольское месторождение). Сравняются минералогические особенности лонсдейлита разного происхождения.

Ключевые слова: лонсдейлит, кубический алмаз, гексагональный алмаз

## LONSDALEITE POLYGENESIS AND TYPMORPHISM

T. G. Shumilova, V. L. Masaitis, S. I. Isaenko, J. Mayer, V. K. Kis, B. A. Makeev

The results of study of lonsdaleite occurring within impact diamond of the Popigai astrobleme and among the carbon mineralization in metasomatically altered regionally metamorphosed rocks of the Kokchetav massif (Kumdykol deposit) are presented. Mineralogical features of lonsdaleite of different origin are compared.

Keywords: lonsdaleite, cubic diamond, hexagonal diamond

Несмотря на более чем 40-летнюю историю изучения лонсдейлита (гексагонального алмаза), обособленно от кубического алмаза он до сих пор так и не был ни синтезирован, ни найден в природе [1–5 и др.]. В связи с этим у ряда исследователей все чаще стало возникать сомнение в возможности реального существования лонсдейлита как самостоятельной фазы.

Нами были проведены детальные исследования алмазов двух классических генетически разных объектов — Попигайской астроблемы в Восточной Сибири [5] и Кумдыкольского месторождения алмазов в метасоматически переработанных метаморфических породах Кокчетавского массива в Казахстане [6]. В ударно-метаморфизованных гнейсах и импактиках Попигайской астроблемы лонсдейлит находится в составе агрегатов с поликристаллами кубического алмаза. В метаморфических породах Кумдыкольского месторождения он обнаружен не только в сростании с микрокристаллами кубического алмаза скелетного габитуса, но и в виде самостоятельных кристаллов и частиц размером до 5 мкм.

Идентификация и детальное изучение углеродных фаз проведены с применением обширного комплекса высокоразрешающих микроскопических и спектроскопических мето-

дов, включая просвечивающую электронную микроскопию атомарного разрешения, рамановскую спектроскопию, спектроскопию потерь энергии электронов. В результате были впервые получены комплексные данные, подтверждающие существование лонсдейлита, в том числе в виде обособленных монокристаллических частиц и когерентных структур с кубическим алмазом в породах Кумдыкольского месторождения (см. рисунок) [7].

Проведенные нами исследования дают основание сделать заключение о достаточно высокой устойчивости минерала, выдерживающего нагревание как минимум до 500 °С в атмосфере кислорода воздуха при атмосферном давлении, обработку концентрированными кислотами и щелочами, сохраняющего монокристаллическое строение после извлечения из сростков с другими фазами в течение нескольких месяцев (период распада кристаллической структуры экспериментально не был установлен).

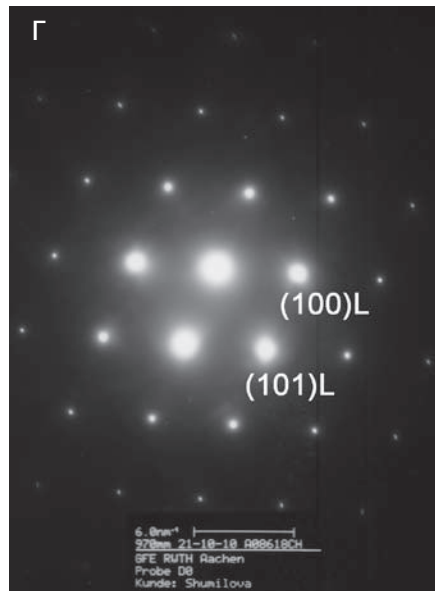
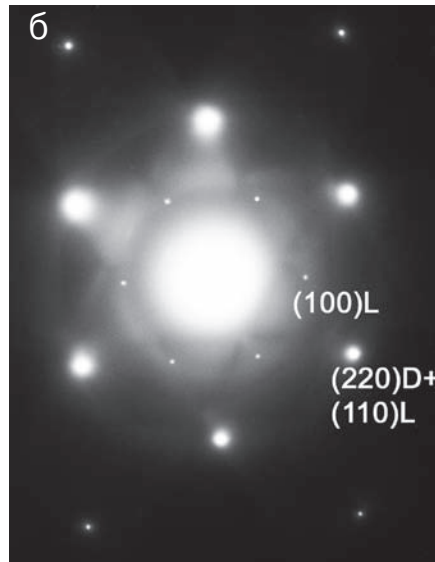
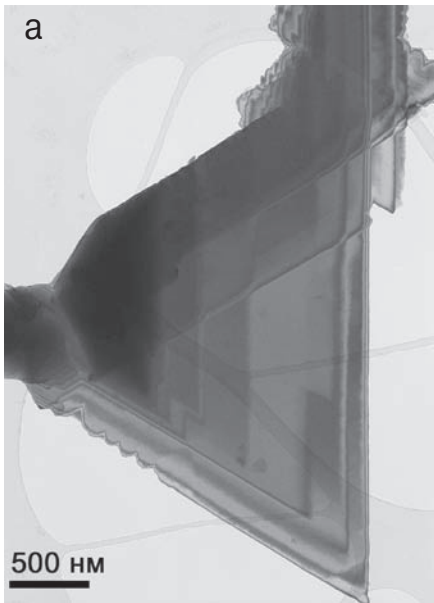
Нам удалось доказать наличие лонсдейлита в метасоматически переработанных регионально-метаморфизованных породах, провести его сравнительный анализ с лонсдейлитом в импактных алмазах и установить существенные различия в степени кристалличности, формах вы-

деления, размерности моноблоков/частиц, в спектральных характеристиках, ассоциации сопутствующих углеродных фаз и степени их структурного упорядочения (см. таблицу).

В ходе выполнения исследований мы разработали методику диагностики лонсдейлита с помощью рамановской спектроскопии, позволяющую, в частности, разрешать полосы кубического алмаза и лонсдейлита путем термостимулированного расщепления рамановски активных мод данных фаз [10].

Полученные нами детальные минералогические сведения о лонсдейлите из двух принципиально разных геологических объектов, в частности о его типоморфных особенностях, позволяют говорить о существовании нового генетического типа минерала, не связанного с импактными процессами.

Согласно известным экспериментальным данным гексагональный алмаз может быть получен двумя принципиально разными способами: 1) твердофазной трансформацией графита при сверхвысоком давлении в статическом (>80 кБар [11]) и динамическом (200–1400 кБар [11, 12]) режимах, с обратимым процессом при температурах ниже 1100–1300 °С в графит и преобразованием лонсдейлита в кубический алмаз при темпе-



Данные просвечивающей электронной микроскопии лонсдейлита из Кумдыкольского месторождения:

а — участок микрокристалла кубического алмаза с монокристаллическим лонсдейлитом и картина его электронной дифракции (б); в — обособленный монокристаллический лонсдейлит и картина его электронной дифракции (г). Наличие субпараллельного чередования светлых и темных зон на снимках светлого поля вызвано эффектом дифракции различной толщины частицы

ратуре выше 1400 °С [11]; 2) поликонденсацией из газовой фазы при температуре 800–1000 °С и низком давлении [13–15].

Наличие лонсдейлита в метасоматически переработанных метаморфических породах Кумдыкольского месторождения не может быть объяснено с позиции твердофазной трансформации графита, а скорее связано с воздействием флюидных процессов [6, 16–18].

Полигенность лонсдейлита показывает, что только лишь его присутствие не может быть однозначным признаком импактного процесса в том или ином объекте и требует более глубокой интерпретации.

Полученные нами результаты имеют большое значение для минералогии алмаза и теории конденсированного состояния углерода в целом, для моделирования процессов природного алмазообразования и разработки новых методов синтеза сверхтвердых материалов.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда немецкой службы межкадаемических обменов (проект DAAD # 325), проекта УрО РАН № 12-С-5-1035 и Фонда содействия отечественной науке. Авторы выражают благодарность К. Гервари, Т. Вайриху, А. Сологубенко, М. Хейдельманну, Д. Паку, Я. Лабару за помощь в проведении исследований с помощью просвечивающей электронной микроскопии, А. А. Заячковскому за предоставленный для исследований материал.*

#### Литература

1. Bundy F. P., Kasper J. S. Hexagonal diamond — a new form of carbon // J. Chem. Phys., 1967. № 46. PP. 1144–1149.
2. Frondel C., Marvin U. B. Lonsdaleite, a hexagonal polymorph of diamond // Nature, 1967. № 214. PP. 587–589.
3. Вальтер А. А., Еременко Г. К., Квасница В. Н., Полканов Ю. А. Ударно-метаморфогенные минералы углерода. Киев: Наукова думка, 1992.

#### Типоморфные особенности лонсдейлита разного генезиса

Минералогические особенности	Местонахождение	
	Попигайская астроблема	Кумдыкольское месторождение
Строение	Поликристаллическое	Монокристаллическое
Формы выделения	В составе тесных агрегатов фаз различных углеродных веществ, в том числе на границах нанокристаллов кубического алмаза без собственных фазовых границ	В виде когерентных структур с кубическим алмазом и отдельных частиц
Размеры моноблоков/частиц	≤ 50 нм	≤ 5 мкм
Ширина полосы рамановской моды A <sub>1g</sub>	30–70 см <sup>-1</sup>	7 см <sup>-1</sup>
Сопутствующие углеродные фазы в агрегатах	Кубический нанокристаллический алмаз, графит, аморфный углерод, сверхтвердая углеродная фаза [5, 8, 9]	Кубический монокристаллический алмаз, графит [7]



- 172 с. **4.** Верещагин Л. Ф., Калашников Я. А., Фекличев Е. М. и др. К вопросу о механизме полиморфного превращения графита в алмаз // Доклады АН СССР, 1965. Т. 162, № 5. С. 1027—1029. **5.** Масайтис В. Л., Мащак М. С., Райхлин А. И., Селивановская Т. В., Шафрановский Г. И. Алмазоносные импактиты Попигаической астроблемы. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 1998. 179 с. **6.** Лаврова Л. Д., Печников В. А., Плешаков А. М. и др. Новый генетический тип алмазных месторождений. М.: Мир, 1999. 228 с. **7.** Шумилова Т. Г., Майер Е., Исаенко С. И. Природный монокристаллический лонсдейлит // Доклады РАН, 2011. Т. 441. № 2. С. 236—239. **8.** Масайтис В. Л., Шафрановский Г. И., Езерский В. А., Решетняк Н. Б. Импактные алмазы в уреилитах и импактитах // Метеоритика, 1990. № 49. С. 180—195. **9.** El Goresy, A., Dubrovinsky L. S., Gillet Ph. et al. A new natural super-hard, transparent polymorph of carbon from the Popigai impact crater, Russia // Comptes Rendus Geoscience, 2003. № 335. PP. 889—898. **10.** Исаенко С. И., Шумилова Т. Г. Термостимулированное расщепление КР-активных мод лонсдейлита // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН, 2011. № 9. С. 29—33. **11.** Курдюмов А. В., Малоголовец В. Г., Новиков Н. В., Пилянкевич А. П., Шульман Л. А. Полиморфные модификации углерода и нитрида бора. М.: Металлургия, 1994. 318 с. **12.** Вишневецкий С. А. Астроблемы. Новосибирск: ООО «Нонпарель», 2007. 288 с. **13.** Chiem Ch. V., Seo H.-K., Ansari S. G. et al. Lonsdaleite Diamond Growth on Reconstructed Si (100) by Hot-Filament Chemical Vapor Deposition (HFCVD) // Korean J. Chem. Eng., 2003. 20(6). PP. 1154—1157. **14.** Daulton T. L., Eisenhour D. D., Bernatowicz T. J. et al. Genesis of presolar diamonds: Comparative high-resolution transmission electron microscopy study of meteoritic and terrestrial nanodiamonds // Geochimica et Cosmochimica Acta, 1996. V. 60. № 23. PP. 4853—4872. **15.** Maruyama K., Makino M., Kikukawa N., Shiraishi M. Synthesis of hexagonal diamond in a hydrogen plasma jet // Journal of materials science letters, 1992. № 11. PP. 116—118. **16.** Милашев В. А. Среда и процессы образования алмазов. СПб.: Недра, 1994. 144 с. **17.** Шумилова Т. Г. Минералогия самородного углерода. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 318 с. **18.** Летников Ф. А. Образование алмазов в глубинных тектонических зонах // ДАН СССР, 1983. Т. 271. № 2. С. 433—435.

**Рецензент**  
д. г.-м. н. **Б. А. Мальков**