

И. В. ГИНЗБУРГ, Р. А. КОНЫШЕВА

МОРФОЛОГИЯ И ПОЛИГЕНЕЗ ГРАФИТА КИАНИТОВЫХ СЛАНЦЕВ

Округлая форма графита в кианитовых сланцах Кейвской гряды на Кольском полуострове была установлена на реплике под просвечивающим электронным микроскопом — ПЭМ [1], что упомянуто в [2] и [3].

С применением в геологии растрового электронного микроскопа (РЭМ) появилась возможность непосредственного наблюдения естественных сколов минералов.

Одним из первых морфологию искусственных кристаллов графита (дендриты которых выращены из паров бензола над плазмой чистого аргона при $\sim 15000^\circ$) установили в лаборатории японской фирмы «Jeol». Приведенные в их проспекте фотоснимки (на стр. 15 и 21 [4]) сделаны при увеличениях 80, 250, 350, 840 и 2500. Выпукло-округлая форма графита характерна для малых увеличений 80, 250 и для мелких форм при увеличении 840. Однако уже при увеличении 250, обычно при увеличениях 350, 840, особенно при увеличении 2500, округлая форма оказывается распавшейся на более мелкие гексагональные пластинки, лежащие друг на друге широкой стороной разориентированно. При более мелком масштабе получается суммарный эффект округления гексагональных форм.

Похожие гексагональные и округло-гексагональные формы установлены нами впервые у индивидов природного графита, не дающего дендритов, из метасланцев докембрия.

Морфология графита из кианитовых сланцев Кейв

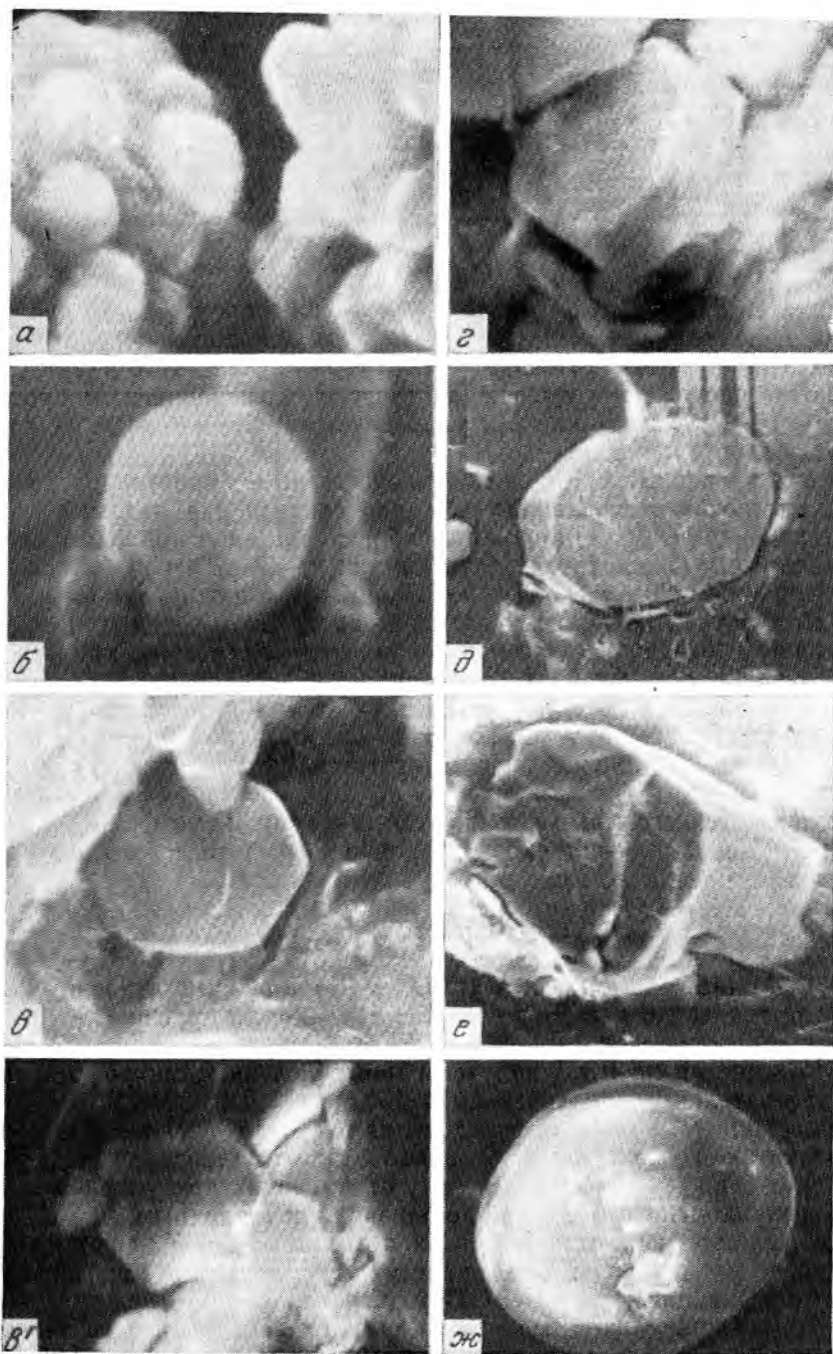
На РЭМ (JSM-2 японской фирмы «Jeol») в режиме вторичных электронов просмотрено несколько свежих сколов того образца кианитовых сланцев, с которого снимки в ПЭМ сделаны ранее А. И. Горшковым [1]. Р. А. Конышевой на РЭМ получены многочисленные микрофотографии с последовательным увеличением в 100, 300, 1000, 3000 и 10 000 раз. Наиболее типичные из них приведены на рис. 1 (а — ж) в порядке истории развития их кристаллов от плохо выкристаллизованных форм до почти идеально ограниченных, а также от имеющих притупленные ребра и чуть выпукло-изогнутые грани до близких к шаровидным.

Все разнообразие обнаруженных с помощью РЭМ форм графита объединено нами в шесть морфологических (частью морфогенетических) модификаций (разностей). Они охарактеризованы ниже.

1. Мельчайшие, округлые, плохо выкристаллизовавшиеся шаровидные частицы с едва проявленными «распльвчатыми» ребрами и гранями. Они собраны в агрегаты, подобно скоплениям икринок или винограда в гроздьях (рис. 1, а; увел. 10 000). Находятся в пустотках, сопровождающих зоны трещиноватости в кианите. Редки.

2. Мельчайшие плохо опранные овалы-гексагональные пластинки; сrostок двух из них по базальной плоскости (0001), с некоторым разворотом друг к другу (рис. 1, б; увел. 10 000). Из пустоток в трещиноватом кианите. Редки.

3. Правильные, гексагональные в плане пластинки. На некоторых из них имеются более или менее выраженные головки, похожие на пи-



Фотографии под растровым электронным микроскопом во вторичных электронах форм кристаллов графита

Увеличения (\times) и размер кристаллов (в мк): а — $\times 10\,000$, (≤ 1); б — $\times 10\,000$, ($\geq 2,5$); в — $\times 3000$, (7), г — $\times 3000$, (6); д — $\times 3000$, (7,5); е — $\times 300$, (площадь 23×10) сросток (вертикальные полосы — дефект снимка); ж — $\times 750$, (поперечник 34); з — $\times 1300$, (12–14)

рампидки (рис. 1, *в*; увел. 3000; на *в'* — увел. 3000). Встречаются сравнительно часто в трещинах кианита и в пустотках в нем.

4. Таблитчатые (уплощенные по *c*) правильно-гексагональные кристаллы с ровной без выступов призмой и с почти ровной базальной (пинакоидальной?) плоскостью (0001), на которой чуть заметны ступени роста. Проявляется некоторая деформированность (первичная — роста или вторичная) с краев кристаллов и намеки на спайность по *c* на гранях призмы (рис. 1, *г*; увел. 3000). Это преобладающая форма графита пустоток среди зон трещиноватости кианита.

5. Почти идеально гексагональные таблитчатые сравнительно крупные кристаллы графита, иногда с несколько закругленными ребрами и неотчетливо выраженными ступеньками роста на базальной плоскости (базопинакоиде?) (рис. 1, *д*; увел. 300). Некоторые кристаллы короткопризматические, неправильные внешне и с неоднородностями внутри на базальной (пинакоидальной) плоскости (рис. 1, *е*; увел. 750). Наиболее распространенная модификация графита в кианите, приуроченная к плоскостям спайности, частью к крупным сколовым пустотам¹ зон трещиноватости.

6. Округло-шарообразные кристаллы графита с плохо различимой гексагональной огранкой (рис. 1, *ж*; увел. 1300). Единичные находки на плоскостях спайности кианита, среди лучше ограненных гексагональных таблитчатых и призматических кристаллов графита (рис. 1, *з*, *е*).

Из исследования морфологии графита под РЭМ вытекают следующие заключения.

1. Прослеживается последовательный генетический ряд кристаллизации мелких форм графита: от плохо выкристаллизованных частиц (рис. 1, *а*) до оформленных кристаллов (рис. 1, *в*, *г*). Эти наблюдения согласуются с общими положениями генетической минералогии о зарождении кристаллов, их дальнейшем росте и развитии.

2. У крупных кристаллов более или менее хорошо ограненных (рис. 1, *д*, *е*) выявлено морфологическое несовершенство: закругленность ребер, неровность-дефектность (роста, растворения?) граней и т. п.

3. Наиболее совершенные его кристаллы всегда выглядят гексагональными в плоскости *c* (0001); они с более или менее развитой призмой: пластинчатые, таблитчатые или короткопризматические; иногда намечаются грани дипирамиды одного знака с призмой; обычно головки нет, и кристалл заканчивается площадкой, являющейся пинакоидом, со ступенями роста или околком по спайности, параллельной этому пинакоиду.

4. Сильная уплощенность кристаллов графита по *c*, при большой редкости пирамиды делает его поперечные срезы (параллельные к *c* и близкие к ним) диагностически маловыразительными: они удлиненно пластинчатые, с осью *c* поперек удлинения. Снимки графита в таких ракурсах не приведены (у искусственных графитов отрицательные формы роста — дырки в идеальных разрезах тоже гексагональные или вытянуто-прямоугольные; см [5]).

5. Гексагональность графита обычно неправильная, неизометричная, искаженная; иногда две из противоположащих сторон бывают длиннее других; отмечен взаимный поворот его пластинок вокруг оси *c*, что дает суммарный эффект некоторой округлости части кристаллов.

6. Гексагональная форма графита признается (по аналогии с данными [4, 5]) за признак его чистоты, или кристаллизации без адсорбированных примесей.

¹ Пустотки — полости в кианите призматических или прямоугольных очертаний (отвечающие отрицательным формам от спайных выколов и осколков?); иногда они гексагональны или удлиненно-прямоугольны (по форме разрезов исчезнувших более крупных кристаллов графита?).

7. Отчетливо выраженные ступени роста на плотноупакованной плоскости (0001), а тем более винтовые дислокации роста воочию не наблюдались визуально. Слабо проявленные признаки ступеней роста как будто намечаются, но зафиксировать это на фотопленке не удалось.

8. Дитригональные пластинки графита, подобные установленным под ПЭМ в других породах [6], нами не были встречены.

О мнимости шаровидной формы графита Кейв

По репликам ПЭМ частицам графита приписывалась шаровидная форма [1]. При сопоставлении с прямыми изображениями в РЭМ на репликах ПЭМ у шариков графита стала заметна гексагональность. На недавно опубликованных репликах у части шариков графита в кварце [7] тоже выявляются гексагональные контуры.

Даже в наиболее шаровидном графите (рис. 1, ж) можно увидеть намеки гексагональных форм. Отсюда заключаем, что типичных шарообразных форм графита, отвечающих сферокристаллам с радиально-лучистым расположением ветвящихся от центра нитевидных индивидов с выступами — бугорками роста на их поверхности (см. [5] и др.) в изученном образце не встречено.

В условиях Кейв, где имеется большое разнообразие морфологических форм кианита, в частности «тонковолокнистый кианит конкреционных агрегатов» [2], являющихся, по существу, сферокристаллами с радиально-лучистым расположением нитевидных кристаллов кианита, не исключена возможность нахождения и сферокристаллов графита, хотя для их образования, по-видимому, нужны другие значения физико-химических параметров среды.

Радиально-лучистое строение шаровидных форм графита в сплавах установлено до применения электронного микроскопа (см. [1]). Сферокристаллы графита получены в экспериментах только при загрязнении его примесями в процессе роста ([5], исследование на РЭМ).

Полигенез графита Кейв

Результаты исследования графита под РЭМ позволяют внести некоторые уточнения и дополнения в геолого-петрографо-минералогические данные о роли и поведении графита, возникшего из органогенного вещества осадков еще на первых этапах метаморфизма сланцев Кейв и многократно преобразованного в последующем [2, 6, 7].

Так, по нашим данным, наиболее недоразвитые кристаллические частицы графита оказались самыми поздними по времени своего образования, по сравнению с четко оспреленным его кристаллом.

Некоторые относительно крупные кристаллы графита с признаками деформационной неоднородности, возможно, претерпели посткристаллизационный динамометаморфизм.

Далее, тонкодисперсное распределение графита в породах в целом отражает слабую его миграцию, что отражается в множественности центров кристаллизации. Вместе с тем в пределах кристаллов — носителей графита в исходном андалузите и в развитом по нему и отдельно кианите установлено перераспределение графита, вызванное процессами самоочистки решетки этих силикатов при их росте, при последующей перекристаллизации и при подвижках. Например, в андалузите посторонние включения графита собраны в ядрах — сердцевинах его кристаллов и отторгнуты к их краям или к двойниковым швам крестовин. В поликристаллической псевдоморфозе кианита по андалузиту графит распределился иначе: по границам отдельных индивидов кианита, по плоскостям спайности и трещиноватости в нем, а также в пустотках — зазорах спайности и трещиноватости. В крупнокристалличе-

ском кианите графитовая сыпь иногда фиксирует зоны роста его кристаллов.

Графит (перекристаллизовывался) переотлагался также после образования кианитовых кристаллов в их ослабленных плоскостях (спайность, трещиноватость).

Наконец, сама структура графита, состоящая из плотноупакованных слоев базисных плоскостей (0001), может легко отвечать на боковое давление перемещением этих слоев перпендикулярно к их нормали [0001] и тем самым усложнять свою форму (рис. 1, д.).

Наряду с этим известны такие кианитовые сланцы, в которых через порфиобласты кианита проходят без смещения скопления графита, маркирующие тонкую слоистость исходных пород (наблюдалось в шлифах и образцах). Здесь при росте кианитовых кристаллов графит внутри них не был перемещен, но (позднее?) отчасти подвергся собирательной перекристаллизации, как, впрочем, и в окружающей основной ткани сланца.

Являясь химически инертным, проходящим (сквозным) минералом, графит как-будто не связан одновременностью образования с андалузитом, кианитом (и поздним силлиманитом) сланцев свиты Кейв. Он, по-видимому, имитирует здесь избыточный компонент. Однако, находясь в одной системе с андалузитом, кианитом и силлиманитом, графит взаимосвязан с ними, как со средой, факторами температуры и давления. Существование графита в области устойчивости андалузита и кианита накладывает ограничение — суживает $P-T$ область появления графита в сланцах Кейв.

Если наложить в одном масштабе диаграммы фазового равновесия «графит—алмаз» и «андалузит—кианит—силлиманит» [8], то область устойчивости кианита и его полиморфных фаз займет поле наиболее низких давлений и малых температур области устойчивости графита, т. е. примерно между $500-800^\circ$ и 1 атм — 20 кбар.

Форма кристаллов графита, образованного в природе при данной температуре и, возможно, при более низкой (при переотложении) такая же, как при $\sim 15\,000^\circ$ (в упомянутом в начале статьи эксперименте) [4].

Полученные результаты, подобно приведенным в [7, 9] и другим, на новом примере раскрывают большие возможности и перспективы растровой электронной микроскопии, которые вкуче с экспериментальными и теоретическими данными усиливают и повышают достоверность выводов о генезисе минералов, горных пород и геологических объектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гинзбург И. В., Горшков А. И. О графите кианитовых сланцев Кейв.— Труды Минер. музея АН СССР, 1961, вып. 12.
2. Бельков И. В. Кианитовые сланцы свиты Кейв. Изд-во АН СССР, 1963.
3. Яковлева М. Е. Кианит.— В кн.: Минералы. «Наука», 1974.
4. JSM-2. Scanning Electron Microscope. Japan Electron Optics Laboratory (JEOL), Co Ltd.— Printed in Japan, № 682, 207—10 Tr. (1967—1968).
5. Минкофф И., Никсон В. С. Наблюдение взаимодействия между адсорбированными примесными атомами и растущими кристаллами графита с помощью растрового электронного микроскопа.— В кн.: Рост кристаллов, т. 8, ч. 2. «Наука», 1968.
6. Сидоренко Св. А. Органическое вещество в докембрии.— Природа, 1976, № 6.
7. Сидоренко А. В., Грицаенко Г. С., Лунова О. И., Ильин М. И., Сидоренко Св. А., Петрова Т. Л. Комплексное применение просвечивающей и растровой электронной микроскопии к изучению докембрийских пород.— В кн.: Кристаллохимия минералов и геологические проблемы. «Наука», 1975.
8. Островский И. А., Лапин В. В. Диаграммы фазовых равновесий.— В кн.: Минералы. «Наука», 1974.
9. Грицаенко Г. С., Ильин М. И. Растровая электронная микроскопия минералов (основные направления, перспективы).— Изв. АН СССР, серия геол., 1975, № 7.