Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LIV, вып. 2, 1968 г.

УДК 548.572

ИССЛЕДОВАНИЕ ШТРИХОВКИ ПИРИТА С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОФИЛОГРАФА МИС-11

Т. А. Великоборец

Механизм роста обусловливает форму и размер кристалла, присутствие в нем химических и механических примесей и фиксируется в скульптурных особенностях граней, в частности в штриховке. Наиболее полная сводка по скульптуре граней кристаллов и методам ее изучения приведена в последней работе В. Г. Фекличева [1966]. Однако большинство применяемых методов изучения поверхности граней обеспечивает качественную характеристику скульптуры без оценки абсолютных размеров составляющих ее элементов.

Автором настоящего сообщения при изучении штриховки пирита основное внимание уделено количественной оценке ее деталей. При исследовании наряду с визуальным и гониометрическим методами использован профилограф — двойной микроскоп МИС-11. Предназначенный для контроля качества обработки наружных поверхностей металлических деталей, он был применен С. Ш. Генделевым [1959] для иллюстрации особенностей рельефа поверхности искусственных кристаллов сегнетовой соли.

Пирит Соколовского железорудного месторождения является ценным компонентом при комплексном использовании руды. Пирит распространен в виде мелких гнезд, прожилков, отдельных вкрапленных кристаллов, заключенных среди пластообразных и линзообразных магнетитовых тел. Последние образуют рудную зону общей протяженностью 6 *км*, вытянутую в меридиональном направлении. Они приурочены к породам вулканогенно-осадочной толщи нижнего карбона.

На месторождении установлено пять морфологических типов пирита. Их габитус определяют {*221*}, {*100*}, {*111*}, {*210*} и комбинация {*100*} и {*111*}. Второстепенными формами являются {*110*}, {*211*}, {*221*}, {*320*}, {*340*}, {*131*}.

На кристаллах, полученных с разных горизонтов месторождения, отчетливо проявлена зависимость формы от условий кристаллизации. Так, на глубине 600—900 *м* пирит представлен только кубическими кристаллами, чаще совершенной огранки. На средних глубинах преобладает комбинация куба с октаэдром, а на глубине 80—100 *м*, особенно в кальцит-цеолитовых жилах, — пентагон-додекаэдры и октаэдр в комбинации с большим числом других форм. Наиболее распространен кубический и кубооктаэдрический тип кристалла, причем число граней октаэдра чаще неполное.

Как правило, грани пирита несут на себе те или иные признаки последних этапов формирования в виде различных скульптурных образований, из которых наиболее интересным и распространенным является штриховка. Особое значение для понимания генезиса минерала имеет штриховка роста, или ступенчатость грани. Она создается в процессе послойного отложения кристаллического вещества, когда растущие слои не перекрывают всей поверхности граней, а каждый последующий отстает в своем развитии от

предыдущего [Аншелес, 1943]. Кроме этого вида на кристаллах известны штриховки растворения, скольжения, двойникования и др.

Еще Н. И. Кокшаровым [1863] было установлено, что направление штриховки всегда параллельно возможному на кристалле комбинационному краю (ребру).

В. И. Вернадский изучал влияние условий кристаллизации пирита на характер штриховки его граней. «Штриховка, — по его мнению, — наблюдается только в пиритах жильного и контактного происхождения. Она часто наблюдается в пиритах из массивных пород и метаморфических сланцев. В то же время мы никогда не встречали штриховки на кубических кристаллах пирита, выкристаллизовавшегося в осадочных породах» [1907, стр. 305].

В. И. Михеев и И. И. Шафрановский [1957] установили соответствие штриховых узоров кристаллов простым реберным формам или их комбинациям и вывели их для кристаллов низших и средних сингоний. Для кубической сингонии простые реберные формы выведены С. Ш. Генделевым [1961].

Отмечая сложность штриховых узоров на гранях пирита, И. И. Шафрановский и В. А. Мокиевский [1964] показали, что грани каждого из пяти кристаллографически разных кубов обнаруживают три различных типа штрихов [*001*], соответствующих комбинациям (*hko*) : ($h\bar{k}o$), (*100*) : (*hko*), (*100*) : (*010*).

Подробное описание разнообразных форм штриховок на пирите приведено у И. Сунагавы [Sunagawa, 1957], впервые отметившем, что штриховка на грани {*100*} предшествует появлению граней пентагон-додекаэдра. Штриховка пирита азербайджанских месторождений изучена Г. К. Абдуллаевым [1959]. Исследование поверхности кристаллов пирита фотогониометрическим методом выполнено В. А. Мокиевским и Ч. Д. Джафаровым [1963]. Они установили разнообразные типы штриховок на гранях {*100*}, {*111*}, {*hko*}.

В нашем исследовании поверхности граней пирита использованы профилограф МИС-11, бинокулярная лупа МБС-2, микроскоп *MeF* фирмы Рейхерт и двукружный гониометр. В результате просмотра свыше 700 кристаллов обнаружены характер распределения штриховки, ее рисунок и различная интенсивность проявления.

Штриховка на гранях {*100*}

Первый тип. Прямая штриховка, параллельная [*001*]. Террасы ступенек представлены {*010*} и {*130*}. Боковые стороны составлены участками плоскостей {*110*}, {*120*}, {*210*}, {*310*}, {*410*}, {*340*}, {*320*}, {*740*}, {*790*}.

1. Односторонне-наклоненная штриховка. Ступеньки роста на грани равномерно опускаются от ребра [*001*] к противоположному, создавая наклонный рельеф грани куба (рис. 1, *а*).

2. Двусторонне-наклоненная штриховка. Ступеньки опускаются или поднимаются от центра грани к двум противоположным ребрам [*001*] (рис. 1, *б*). В первом случае штриховка создает выпуклый рельеф грани и считается положительной, во втором — отрицательной. Рельеф грани получается вогнутый и связан, по О. М. Аншелесу [1954], со скелетным ростом.

3. Волнообразная штриховка. Представлена чередованием незначительных подъемов и опусканий ступенек вокруг определенного горизонтального уровня. Рельеф грани при этом ступенчато-горизонтальный (рис. 1, *в*).

Второй тип. Квадратно-прямоугольная штриховка, параллельная [*100*] и [*001*]. Террасы ступенек штриховки — участки грани {*010*}. Боковые стороны {*320*}, {*110*}, {*120*} (рис. 2, *а*).

Третий тип. Удлиненно-шестиугольная штриховка. Боковые стороны ее параллельны [*001*] и представлены {*110*}, {*210*}, {*310*}, {*410*}, {*230*}. Передние и задние — торцевые — {*112*}, {*142*}, {*153*}, {*453*}, {*623*} (рис. 2, *б*).

Все описанные типы штриховки различно распределяются на гранях кристаллов. Среди граней с равномерным распределением ступенек встречаются такие, где штриховка, сгущаясь в центре или у ребра грани, исчезает в остальных местах. Интенсивность проявления штриховки также различна. Не только грани пространственно близких кристаллов исштрихованы по-разному, но и на одном кристалле трудно найти дважды воспроизведенную штриховку. Часто грани покрыты штриховкой разных порядков по высоте и ширине ступенек (рис. 2, *в*). Иногда ступеньки роста, ясно выраженные в одних местах, в других обнаруживаются лишь при увеличениях в 80—160 раз. Как правило, при комбинации {*100*} и {*111*} грань {*111*} остается гладкой, а грань куба ступенчатой. Грани {*100*} кубических

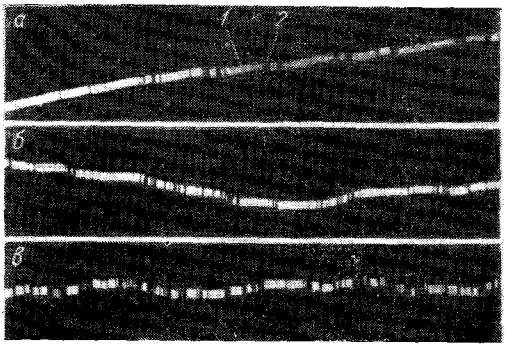


Рис. 1. Типы профилограмм поверхности прямой штриховки на грани (*010*): *а* — односторонне-наклоненная; *б* — двусторонне-наклоненная; *в* — волнообразная.
Грань {*001*} перпендикулярна к плоскости рисунка, ребро [*100*] параллельно нижнему его краю.

1 — освещенные террасы ступенек; *2* — боковые стороны ступенек.

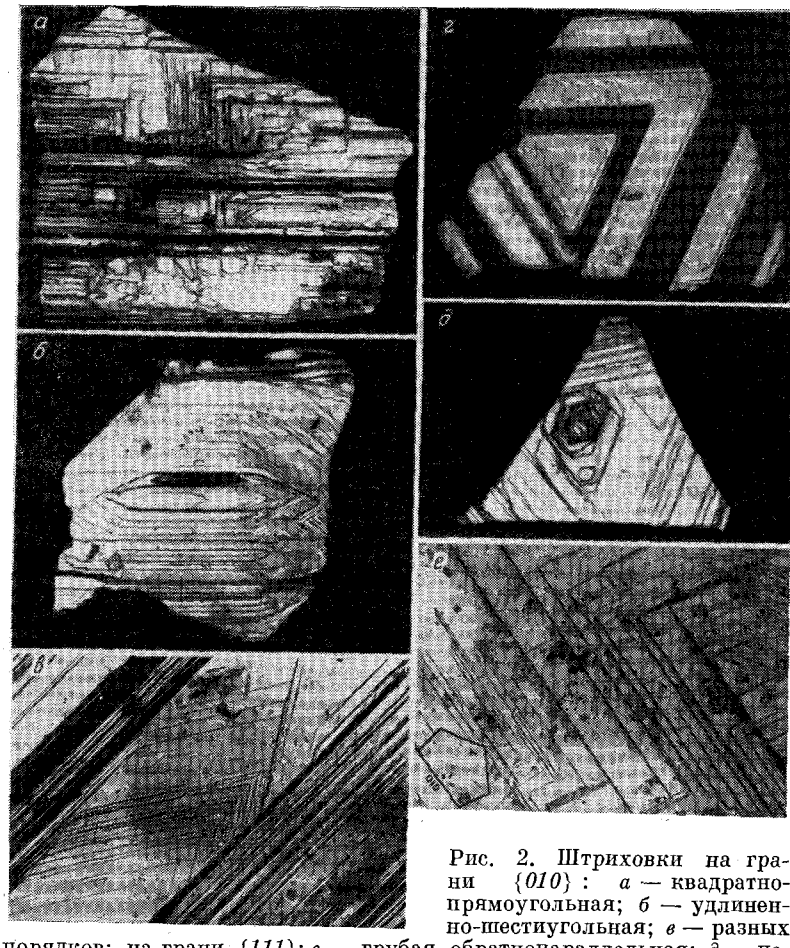


Рис. 2. Штриховки на грани {*010*}: *а* — квадратно-прямоугольная; *б* — удлиненно-шестиугольная; *в* — разных порядков; на грани {*111*}: *г* — грубая обратнопараллельная; *д* — переход шестиугольной в треугольную; на грани {*210*}: *е* — тонкая.

кристаллов исштрихованы слабее, чем грани {100} в комбинации с {111}.

Квадратно-прямоугольная и удлиненно-шестиугольная штриховки наблюдаются значительно реже прямой и являются штриховками переходного типа. В чистом виде такая штриховка присутствует на гранях только при зарождении растущих слоев вдали от ребер и при внезапной остановке роста слоев, еще до достижения ими противоположного ребра грани (рис. 2, *б*). В зависимости от того, на какой стадии формирования штриховки прекратится рост кристалла, получаются различные переходные формы между третьим и вторым, вторым и первым, третьим и первым типами ступенчатости. Иногда на гранях {100} пирита присутствуют сразу все три типа штриховки (см. рис. 2, *а*), на конечным результатом при нормальном и продолжительном росте кристалла является прямая штриховка.

На гранях {111} изученных кристаллов обнаружена треугольная, обратнопараллельная и повернутая, шестиугольная штриховка. Первая составлена комбинацией граней {111}, {112}, {101}, {103}, вторая и третья — комбинацией {111} и {*hkl*}. Высота и ширина ступенек может быть как одинаковой, так и отличной друг от друга по трем направлениям. Центральный треугольник штриховки либо равносторонний, либо равнобедренный, иногда смещен или повернут относительно ребер грани октаэдра (рис. 2, *г*). Размеры ступенек треугольной штриховки колеблются, образуя то грубую ступенчатость (рис. 2, *г*), то тонкую штриховатость (рис. 2, *д*). Шестиугольная штриховка менее распространена и в чистом виде на гранях {111} не встречается, а переходит в треугольную по мере распространения растущего слоя.

Описанные виды ступенчатости характерны для октаэдрических кристаллов, размером не более 3 *мм*. На поверхности более крупных кристаллов штриховка роста обнаруживается при увеличении в 100—150 раз. Очертания ее удлиненно-шестиугольные, переходящие в треугольные. Ребра передних торцовых ступенек штриховки параллельны ребрам основного октаэдра [$\bar{1}10$], [$\bar{1}01$], удлиненные боковые ступеньки параллельны [112].

Штриховка на гранях {210} обнаруживается лишь при увеличениях в 100—150 раз и имеет почти прямоугольные очертания, ребра ее ориентированы параллельно ребрам (102) : (021), (102) : ($\bar{1}$02) основного пентагондодекаэдра (рис. 2, *е*).

Измерение ступенек штриховки на профилографе МИС-11 выявило характер распределения и количественно оценило штриховку. После предварительной юстировки кристалла и выбора профиля измерения последовательным совмещением вертикальной нити окуляр-микрометра с началом и концом каждой ступеньки штриховки получаем серию отсчетов. Разность полученных пар отсчетов дает ширину изображения ступенек. Таким же образом, совмещая горизонтальную нить окуляр-микрометра последовательно с верхним и нижним краями ступеньки, получаем очередную серию отсчетов. По разности между двумя соседними отсчетами, определим высоту изображения ступеньки. Истинная величина высоты ступенек профиля

$$h = \frac{a}{2N},$$

где a — разность отсчетов по горизонтальной нити окуляр-микрометра, *мк*; N — увеличение объектива наблюдательного микроскопа.

Ширина ступенек

$$c = \frac{a_1 10\ мк}{N\sqrt{2}},$$

где a_1 — разность отсчетов по вертикальной нити окуляр-микрометра; 10 *мк* — цена деления барабана окуляр-микрометра.

По результатам измерений или путем фотографирования строятся профилограммы, которые наглядно воспроизводят профиль поверхности грани

(см. рис. 1). Построение нескольких параллельных профилей позволяет проследить постепенное изменение ребристости грани и может быть использовано для составления топограммы ее поверхности.

Высота ступенек штриховки на гранях {010} и {111} колеблется от 1 до 215 *мк*, что составляет 20 000—400 000 элементарных кубических ячеек. Нельзя утверждать, что именно эти величины характеризуют элементарные слои роста. Скорее, они отражают толщину пачек, состоящих из огромного числа более тонких слоев. Существует указание на то, что вещества способны кристаллизоваться слоями того же порядка по высоте, что и ступени грани [Аншелес, 1943].

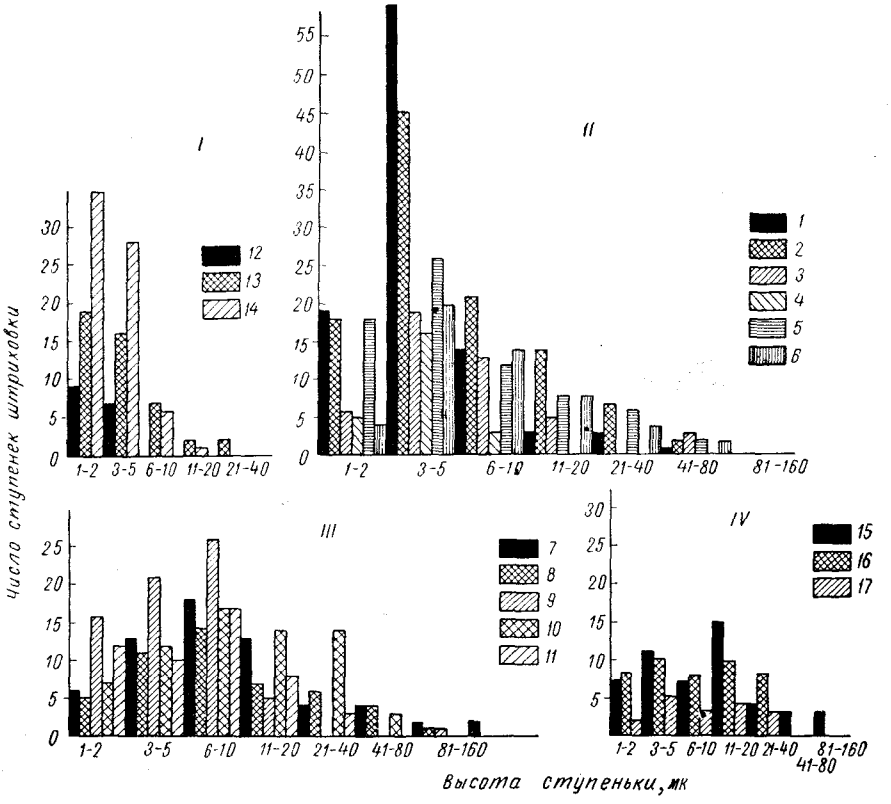


Рис. 3. Гистограммы высот ступенек прямой штриховки. Тип I — кристаллы *12*, *13*, *14* из скв. 64; тип II — кристаллы *1*, *2*, *3*, *5* из скв. 64; кристаллы *4*, *6* профиль 2, карьер, глуб. 80 *м*; тип III — кристаллы *7*, *8*, *9*, западный борт карьера, профиль 2; кристаллы *10*, *11*, скв. 980, глуб. 870 *м*; тип IV — кристаллы *15*, *16*, *17*, западный борт карьера, профиль 2.

По К. В. Банну и Г. Эмметту, «...кристаллы, как правило, растут за счет распространения дискретных слоев на поверхности граней. Иногда эти слои тонки и невидимы, в других случаях они достигают толщины несколько тысяч Å» [1949, стр. 127].

Как показали измерения, распределение ступенек штриховки по высоте закономерно, о чем свидетельствуют и гистограммы пространственно общих групп кристаллов (рис. 3).

Кристаллы с характерным распределением ступенек I и II типа, отобранные из пироксеновых жил на глубине 111,5 *м* в центральной части месторождения, имеют тонкую равномерную штриховку высотой 1—160 *мк*. Кристаллы из жил магнетит-апатит-пироксен-эпидот-кальцитового состава показаны на III, IV и частично I типе гистограмм. Такое разнообразие в распределении высот ступенек штриховки, вероятнее всего, связано с очень

сложным составом среды кристаллизации пирита. Грани кристаллов из глубоких горизонтов известняков в центральной части месторождения обнаруживают гистограмму IV типа с довольно равномерной тонкой штриховкой при высоте ступенек 1—80 *мк*. Таким образом, при значительных колебаниях в абсолютных размерах ступенек обнаруживаются определенные закономерности в их сочетаниях на гранях кристаллов, образовавшихся в аналогичных условиях.

Гониометрическое измерение штриховки осложнялось тем, что в большинстве случаев ступенчатая поверхность в основном давала один непрерывный линейный или сдвоенный сигнал с двумя-тремя более яркими пятнами, отвечающими системам достаточно крупных ступенек. Надежно были установлены ступеньки символов {*010*}, {*210*}, {*110*} {*310*}. Итак, сложная поверхность грани с десятками ступенек дает на гониометре не больше 3—4 сигналов. Неполнота полученных данных усиливается невозможностью сопоставить грань и ее рефлекс.

Последовательное рассмотрение профилограмм поверхности и результатов гониометрического измерения позволяет получить более полную кристаллографическую характеристику штриховки. Пусть, например, измерением штриховки кристалла на гониометре (рис. 4) надежно установлены символы {*010*}, {*120*}, {*130*}. Это дает возможность ориентировать профилограмму в пространстве, привязав символы к определенным ступенькам штриховки, после чего графически получаем углы ступенек с гранью (*010*) и по таблицам О. М. Аншелеса [1939] находим теоретические углы, соответствующие построенным, и символы ступенек:

Угол ступеньки штриховки с {*010*}	Угол φ теоретический	Символ ступеньки
40°	40° 36′	670
63	63 26	210
26	26 34	120
38	37 52	790
56	56 18	320
45	45 00	110
60	60 15	740
18	18 26	130

Установив достоверно 1—2 символа ступенек, пользуясь предложенным методом, можно не только определить полный набор символов, но и однозначно сопоставить их со ступеньками штриховки.

Выводы

1. Для граней {*010*} наиболее распространена прямая штриховка, параллельная {*001*}. Удлиненно-шестиугольная и квадратно-прямоугольная штриховки на грани куба являются переходными и в конечном счете формируют прямую штриховку. На грани {*111*} присутствует

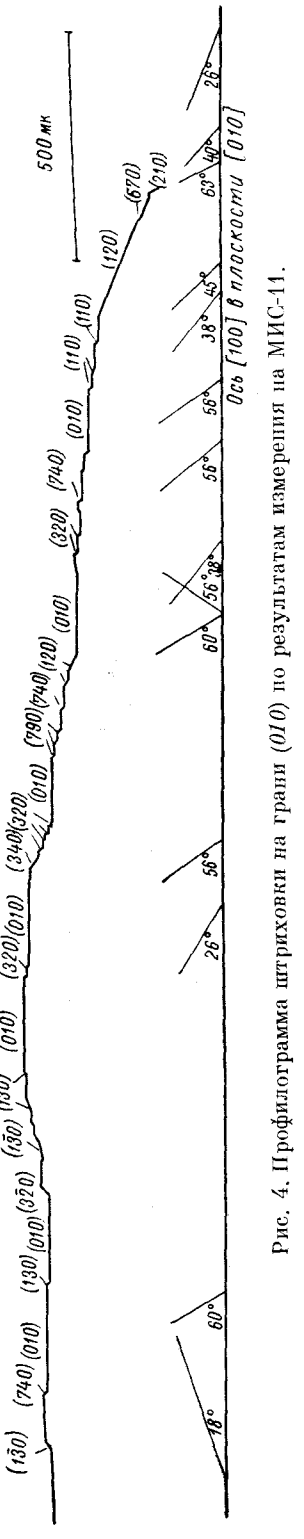


Рис. 4. Профилограмма штриховки на грани (*010*) по результатам измерения на МИС-11.

либо грубая ступенчатость с высотой ступенек 1—130 *мк*, либо тончайшая штриховка второго порядка удлиненно-шестиугольных очертаний, переходящих в треугольные. Ребра последней параллельны [$\bar{1}10$], [$\bar{1}01$], [112] основного октаэдра.

На гранях {210} при увеличении в 100—150 раз установлена штриховка почти прямоугольных очертаний, ребра которой параллельны (102) : (021) и (102) : ($\bar{1}02$) основной грани пентагон-додекаэдра.

2. Высота ступенек штриховки на гранях пирита колеблется от 1 до 215 *мк* и представлена на грани {010} комбинацией следующих форм.

Для прямой штриховки: террасы — {010}, {130}; боковые стороны — {130}, {140}, {320}, {340}, {210}, {120}, {110}, {740}, {790}.

Для квадратно-прямоугольной штриховки: террасы — {010}; боковые стороны ступенек — {320}, {110}, {120}.

Для удлиненно-шестиугольной штриховки: террасы — {010}; боковые стороны — {110}, {210}, {310}, {410}, {230}, {320}; передние и задние торцовые ступеньки — {211}, {112}, {142}, {153}, {453}, {623}.

На грани {111} центральный треугольник штриховки — {111}, а боковые стороны — {112}, {101}, {103}, {hkl}.

3. Штриховка кристаллов, выросших в аналогичных условиях кристаллизации, характеризуется определенной высотой ступенек. На гранях пирита из пироксеновых жил преобладают ступеньки высотой 1—5 *мк*, из магнетит-апатит-пироксен-эпидот-кальцитовых жил — 6—20 *мк*, из известняков — 3—5 и 10—20 *мк*. Так, в характере колебаний абсолютных значений высот ступенек, в их способности утолщаться до определенных размеров находят косвенное выражение сложные законы, управляющие кристаллизацией в каждом определенном участке месторождения.

ЛИТЕРАТУРА

Абдуллаев Г. К. Штриховка на гранях кристаллов пирита. ЗВМО, ч. 88, вып. 4, 1959.

Аншелес О. М. О происхождении штриховки на гранях кристаллов. Уч. зап. ЛГУ, сер. естеств. наук, № 88, 1943.

Аншелес О. М. Вычислительные и графические методы кристаллографии. Изд. ЛГУ, .1939.

Аншелес О. М. О природе округлых форм алмаза. Уч. зап. ЛГУ, сер. геол., вып. 4, № 178, 1954.

Вернадский В. И. О комбинационной штриховке кристаллических граней. Изв. АН, сер. 6, т. 1, № 10, 1907.

Генделев С. Ш. Штриховка роста на кристаллах и ее минерагенетическое значение. ЗВМО, ч. 88, вып. 5, 1959.

Генделев С. Ш. Простые реберные формы кубической сингонии. Зап. ЛГИ, т. 38, вып. 2, 1961.

Кокшаров Н. И. Лекции по минералогии. Спб., 1863.

Михеев В. И., Шафрановский И. И. Реберные формы и штриховка на кристаллах. Кристаллография, т. 2, вып. 1, 1957.

Мокиевский В. А., Джафаров Ч. Д. Перспективы фотогониометрического исследования кристаллов со сложной поверхностью. ЗВМО, ч. 92, вып. 1, 1936.

Фекличев В. Г. Микрокристалло-морфологический анализ. Наука, 1966.

Шафрановский И. И., Мокиевский В. А. Некоторые проблемы современной кристалломорфологии минералов. ЗВМО, ч. 93, вып. 5, 1964.

Bunn C. W. and Emmett H. Discussion of the Faraday society, № 5. Crystal growth, 1949.

Sunagawa I. Rep. Geol. surv. Japan, № 175, 1957.