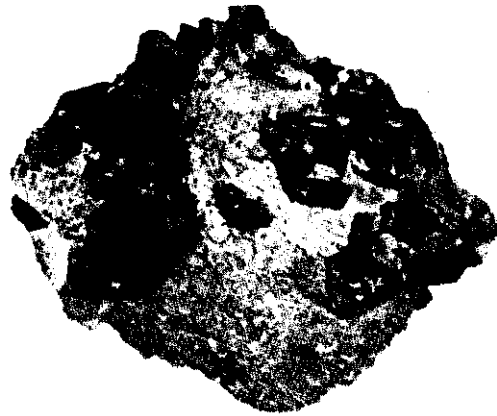

МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ТОМ ПЯТЫЙ
1983



-УДК 552.164

Ориентировка и особенности формирования кристаллов апатита в Селигдарском месторождении

Г. Ю. Боярко

Описаны минералы месторождения, кристаллизующиеся в анизотропном поле напряжений, образующие линейные и линейно-плоскостные агрегаты, струйчатые и полосчатые текстуры руд. Показан ярко выраженный стрессовый характер апатита, проявляющийся в образовании угнетенных псевдоромбических, псевдомоноклинных, псевдотриклинных и спиральных форм кристаллов. Описан реликтовый динамометаморфизованный кварц первичных пород, замещенных апатит-карбонатными рудами.

Геологическая позиция и минералогия Селигдарского месторождения освещалась неоднократно [2, 5, 6, 12 и др.]. Остановимся лишь на кратких обобщениях по этим вопросам.

Геологическое строение. Селигдарское апатитовое месторождение расположено в центральной части Алданского щита в месте пересечения двух долгоживущих глубинных разломов (название по А. Н. Угрюмову): Юхтинского (северо-западного простирания) и Гоммотского (северо-восточного). Вмещающие породы представлены архейскими биотитовыми, биотит-амфиболовыми сланцами и гнейсами. Рудное тело имеет трубообразную форму и вертикальное залегание. Площадь выхода на поверхность 3,5 км². По геофизическим данным, глубина месторождения более 3 км, скважинами руда разбурена до 1600 м. Основное рудное тело сопровождается сериями мелких ответвляющихся жилообразных рудных тел. Возраст оруденения раннепротерозойский.

Минеральный состав руд. Главные минералы — доломит, апатит, кальцит, мартит, кварц, второстепенные — флогопит, серпентин (в виде псевдоморфоз по форстериту), ангидрит, гипс, хлорит, гематит, калиевый полевошпат, тальк и актинолит. Структура руд порфириобластовая с мелкозернистой основной массой карбонатного состава. Порфириобласты представлены апатитом, мартитом, серпентином и флогопитом. Отдельные перекристаллизованные участки имеют крупно- и гигантозернистую структуру. Текстура руд массивная, вкрапленная, полосчатая и «струйчатая». Распределение апатита неравномерное, содержание его изменяется от 10 до 80 %, в среднем до 20—25 % объема породы.

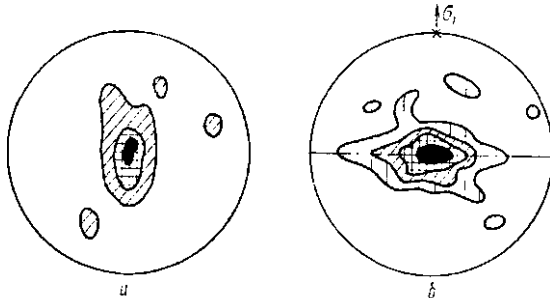
Напряженное состояние горных пород и рост в них кристаллов апатита. В условиях земной коры породы находятся под дифференцированной статической нагрузкой, состоящей из литостатического давления, давления сжатия или растяжения земной коры, остаточного давления при местном перераспределении масс породы.

Описываемое месторождение представляет собой трубообразное тело со сложной формы границами. Жесткие вмещающие кристаллические породы противопоставляются пластичным апатит-карбонатным рудам. В пределах рудного тела находится множество блоков хлоритовых и калиево-полевошпатовых метасоматитов, останцев вмещающих пород. Распределение апатита и маррита (минералов с высокой плотностью) крайне неравномерное. В результате действия этих факторов в поле гравитации создается сложная картина распределения и ориентировки напряжений.

Рост кристаллов апатита происходит путем замещения в твердой среде (агрегат карбоната, хлорита, серпентина), находящейся под напряжением, которое влияло на ориентировку роста и внешнюю симметрию искаженных во время роста кристаллов апатита.

В результате изучения структурно-текстурных особенностей руд Селигдарского месторождения установлено, что кристаллы апатита формировались в условиях действия негидростатического напряжения. Апатит встречается в виде шестоватых или столбчатых кристаллов

дипирамидально-призматического габитуса длиной 0,1—10,0 см, как правило, 0,5—1,0 см. Метакристаллы с осью *c* в основном ориентированы субпараллельно в одном направлении, причем эта ориентировка одинакова в пределах довольно крупных блоков размером до десятков метров. Как результат ориентировки апатита, среди текстур руд выделяются полосчатые и струйчатые. В целом по месторождению ориентировка индивидов этого минерала разнообразна. Наблюдаемые изменения ее между блоками с выдержанными полосчатыми текстурами



постепенные, с максимальной кривизной 2—3° на метр. В некоторых случаях подобные блоки разделены зоной мощностью до первых метров с беспорядочно-ори-

Рис. 1. Диаграммы линейной (а) и линейно-плоскостной (б) ориентировки кристаллов апатита.

ентированными кристаллами апатита. Ориентировка индивидов последнего в породе может быть как линейной, так и линейно-плоскостной. В последнем случае наблюдается уплощение части кристаллов параллельно плоскости ориентировки. Имеют место совместные агрегаты ориентированного апатита, флогопита и карбонатов. Апатит в таких случаях ориентирован осью *c* перпендикулярно к аналогичным осям этих минералов.

Нами выполнен петроструктурный анализ мелкозернистых руд с линейной (скв. 231, гл. 81,3 м) и линейно-плоскостной (скв. 151, гл. 54,0 м) ориентировками кристаллов апатита. Образцы с хорошо выраженной ориентировкой кристаллов апатита были частично отпрепарированы путем растворения кальцита с поверхности пластинки уксусной кислотой. Пластинку закрепляли на федоровском столике и устанавливали под бинокляром с визиром. Затем измеряли координаты осей *c* апатита * и нормали к плоскостям уплощения кристаллов ** при линейно-плоскостной ориентировке. Результаты наносили на равноплоскостную сетку Шмидта и обрабатывали (рис. 1).

При линейной ориентировке на диаграмме проступает узор точечного максимума (рис. 1, а), причем отклонения осей *c* кристаллов апатита от полюса ориентации в 70 % случаев составляют не более 10°. При линейно-плоскостной ориентировке (рис. 1, б) на диаграмме образуется узор неполного пояса, существует небольшой разброс ориентировки осей кристаллов относительно полюса вдоль плоскости уплощения. Выраженное уплощение кристаллов отмечено в 23 случаях (18% от общего числа замеров), причем разброс ориентировки нормалей к уплощенности составляет не более 5%. Плоскость уплощения обозначена на диаграмме с линией (рис. 1, б).

Природу одинаковой ориентировки кристаллов апатита можно объяснить тем, что последние ориентируются при росте в условиях стресса так, что направление наибольшего сжатия λ оказывается перпендикулярным к плоскостям плотнейшей упаковки атомов [9]. Этим достигается наименьшая возможная энергия система среда—кристалл. Апатит наследует симметрию напряжения — призматические кристаллы вытянуты осью *c* вдоль минимального напряжения σ_3 .

* Ось апатита совмещалась нами «на глаз» с оптической осью бинокляра, контрольные замеры показали, что точность определения координат оси *c* составляет 1°.

** Нормаль совмещалась «на глаз» с горизонтальной визирной нитью бинокляра; точность определения составляет 1°.

Из рис. 1 видно, что большая часть кристаллов ориентирована строго параллельно, они находятся под некоторым углом к линии или плоскости ориентировки, а единичные кристаллы почти перпендикулярны к линии или плоскости ориентировки. Это объясняется влиянием зернистости карбонатного агрегата, в котором зарождались и росли кристаллы апатита. Напряжение, однородное в пределах блока пород, сказывается на тех кристаллах, размер которых превышает размер зерен

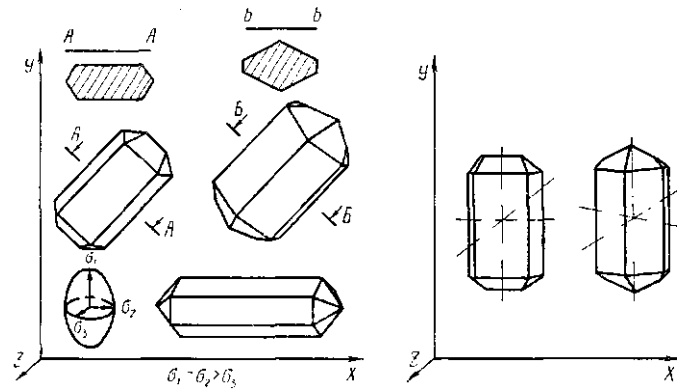


Рис. 2. Образование псевдомоноклинных кристаллов апатита при несогласном положении их относительно ориентировки напряжений.

вмещающей их карбонатной массы. Ориентировка мелких кристаллов, размер которых значительно меньше зерен вмещающего их карбоната, в данном случае зарождающихся кристаллов апатита, контролируется, кроме того, спайностью кристаллических зерен карбонатов. Дело в том, что напряжение среды в отдельно взятом зерне карбоната векториально распределяется вдоль плоскостей спайности по $\{1011\}$, расположенных под некоторым углом к вектору стресса. Зарождение кристаллов апатита и их ориентировка происходят на этих плоскостях согласно внутризерновым напряжениям, поскольку они в этом масштабе ведущие. Основная часть векторов напряжений приходится на плоскости, близкие по ориентировке с напряжением среды, и поэтому большинство кристаллов апатита будет иметь общую ориентировку, обусловленную в конечном итоге напряжением среды. Но отдельные индивиды будут зарождаться в плоскостях других направлений и расти в дальнейшем в угнетающей обстановке.

Рост кристаллов апатита, ориентированных во время роста под углом к оси минимального напряжения σ_3 , приведет к изменению его внешней формы. На рис. 2 приведены примеры угнетения формы описываемого минерала при несогласном положении относительно общей ориентировки. Они имеют псевдомоноклинный облик с внешней симметрией i_2P_c . Такие кристаллы короче ориентированных параллельно оси a_3 . Грани их, находящиеся под меньшей нагрузкой, постепенно зарастают ввиду отставания роста граней, находящихся под более высоким давлением. Образуются ложные диэдры, ложные пинакоиды.

Уплотнение кристаллов параллельно одной плоскости $\sigma_2\sigma_3$ происходит при $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$. Кристалл апатита в плоскости $\{0001\}$ изотропен. При ориентировке оси c по оси минимального напряжения c_3 грани по направлению оси σ_1 угнетены, кристаллы растут интенсивнее на гранях по направлению оси a_3 и в результате преобразуются в псевдоромбические, уплощенные параллельно плоскости $\sigma_2\sigma_3$ (рис. 3, а, б). Плоскость уплощения кристаллов выявляется не всегда, так как большая часть последних имеет грани, не параллельные плоскости $\sigma_2\sigma_3$ (рис. 3, в).

Встречаются псевдотриклинные кристаллы, у которых отдельные

парные грани асимметричны (рис. 3, г—е). Это обусловлено неравномерностью распределения напряжений вокруг растущего кристалла в отдельных участках вмещающего его карбонатного агрегата. Как правило, в подобных случаях размер зерен карбоната превышает таковой кристаллов апатита.

Как рассматривалось выше, апатит приобрел угнетенные псевдоромбические, псевдомоноклинные и псевдотриклинные формы в результате роста кристаллов в твердой среде в анизотропном напряженном состоянии. Ф. Л. Смирнов и др. [6] при описании апатита Селигдара объясняют появление угнетенных форм влиянием подложки или

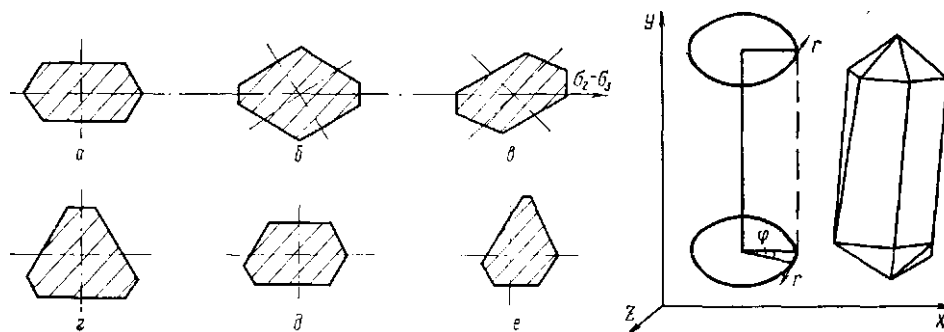


Рис. 3. Псевдоромбические (а—в) и псевдотриклинные (z—e) кристаллы апатита.

Рис. 4. Рост спиральных кристаллов апатита в поле напряжения кручения.

роста в условиях питания подтоком раствора. Угнетенные кристаллы противопоставлялись идеальным и выделялись как более поздние генерации апатита. Однако влияние кристаллической решетки минералов подложки проявляется преимущественно в открытой флюидной среде в камерах пегматитов [3,11] и при условии, что размер зерен подложки должен быть соизмерим с кристаллами апатита. На Селигдарском месторождении кристаллы растут в твердой среде, и зерна карбоната в большинстве случаев значительно меньше выделений апатита. Влияние ориентированного подтока раствора [1, 10, 11] также возможно преимущественно в открытой водной среде. В твердой среде в большинстве случаев подток диффузионный, близкий к равномерному со всех сторон ввиду значительной ротации раствора по сравнению с открытой средой.

Образование угнетенных форм метакристаллов апатита — результат только анизотропии напряжения среды. Идеальные и угнетенные формы кристаллов, встречающиеся у апатитов каждой генерации, зависят от их положения относительно направлений в среде.

Образование спиральных кристаллов апатита. В литературе встречаются описания крученых спиральных кристаллов кварца, актинолита, гипса и других минералов. Образование подобных форм — результат деформации минералов при динамометаморфических процессах [1, 11], а также образования кристалла при срастании «группы» не строго параллельных мелких кристаллов [10]. Кроме того, приведено морфологическое описание крученых кристаллов кварца из жил альпийского типа и крученых волокон халцедона неясного генезиса [1,4,11]. Кручение индивидов кварца и халцедона обусловлено, по-видимому, кристаллохимическими свойствами кремнезема.

В горных породах очень редко наблюдаются крученые индивиды, образующиеся в результате вращательных нагрузок. Вращение происходит вокруг оси; в сечении, перпендикулярном к ней, действуют касательные напряжения τ . Апатит должен расти с учетом влияния касательных напряжений по спирали. На Селигдарском месторождении установлены единичные спирально закрученные кристаллы апатита: в скв. 213 на гл. 314 м, в скв. 221 на гл. 163 м (закрученные против часо-

вой стрелки), в скв. 213 на гл. 314 м (по часовой стрелке). Размеры кристаллов: 0,5—5,0 см длиной и 0,1—1,0 см в поперечнике. Относительный угол закручивания кристаллов апатита—от 2 до 15° на 1 см длины (рис. 4).

Хлорит-карбонатный субстрат, в котором росли кристаллы апатита, очень пластичный, поэтому их кривогранные формы не могут быть следствием катаклаза, при котором деформировались бы карбонаты и хлорит, а апатит подвергся бы только хрупкому разрушению. Поверхности кристаллов гладкие, линии скольжения отсутствуют. В шлифе монокристаллы спирального апатита имеют неполное волнистое погасание. Находка спиральных кристаллов апатита — наиболее убедительное доказательство роста апатита в условиях стресса.

Формирование других минералов. Кристаллы флогопита ориентуются с осью c перпендикулярно к максимальному напряжению σ_1 . Совместно с апатитом они образуют агрегаты с линейно-плоскостной ориентировкой. Апатит ориентирован осью c в направлении оси σ_3 , а флогопит — параллельно оси σ_1 . Псевдофорстерит встречается в виде таблитчатых кристаллов, как правило, крупных (5—15 см). Изучение ориентировки кристаллов псевдофорстерита по керну скважины невозможно, однако имеются находки совместно ориентированных агрегатов мелких (1—2 см) кристаллов псевдофорстерита и апатита. Например, в скв. 231 на гл. 175 м выделения серпентина имеют совместную линейно-полосчатую с ориентировкой осей c вдоль оси σ_3 .

Среди карбонатов также наблюдаются ориентированные агрегаты зерен, в основном доломита. Большой частью это ориентировки, возникшие в результате поздних пластических деформаций и перекристаллизации. Изредка встречаются агрегаты карбонатов, ориентированные осью c вдоль оси σ_1 и перпендикулярно к ориентировке оси c апатита.

Снятие напряжений в минералах. Напряжение снимается пластическими и разрушающими деформациями горных пород.

Апатит в рудах подвергается хрупкому разрушению путем отрыва и скалывания с последующим раздвигом. Практически все кристаллы апатита месторождения имеют микро- и макротрещины, зигзагообразные, прямолинейные, ориентированные по $\{0001\}$, изредка встречаются диагональные и продольные. Иногда прямолинейные трещины сопровождаются криволинейными оперяющими. Трещины открыты, заполнены карбонатами, реже хлоритом. Мощность их 0,1—5 мм. Часто блоки дробленых монокристаллов растянуты в пластичной среде карбонатов. В шлифах обломки апатита не напряжены. Их погасание нормальное полное, в единичных случаях — неполное с переходом в облачное. Растянутые блоки монокристаллов на линиях разрыва не напряжены. Напряжение и снятие напряжения сопровождали рост кристаллов апатита. Это видно из того, что в скв. 221 на гл. 253 м встречен кристалл апатита с диагональной трещиной, по которой произошло смещение. На выступающих ребрах среза при дальнейшем росте кристалла образовались дополнительные кристаллические грани.

Мартит, как и апатит, подвергается хрупкому разрушению. Трещины прямолинейные и ступенчатые по $\{111\}$, заполненные карбонатами и хлоритом.

Кварц менее всего подвержен хрупким дислокациям. Макроскопически и в шлифах встречены лишь единичные криволинейные трещины, заполненные карбонатами. Кварц представлен двумя генерациями: ранний — в виде мелкой неравномерно распределенной вкрапленности (~25% общего количества минерала) и переотложенный — в виде сети прожилков (~75%). Под микроскопом (в шлифах) кварц из прожилков имеет гранобластовую структуру, нормальное полное погасание. У раннего кварца наблюдается неполное, облачное, блоковое погасание; частично он претерпел рекристаллизацию (гранулированный кварц). Подобные деформации не могли образоваться во время рудообразования

и после него. Такой же хрупкий минерал — апатит, формировавшийся на протяжении всего периода рудообразования, — не имеет даже слабых деформаций, поскольку находится в виде включений в связанном пластичном агрегате карбонатов. При хрупких дислокациях остаточных деформаций не образуется. Итак, деформационные структуры кварца сформировались до рудообразования, и он является реликтовым минералом пород, замещенных апатит-карбонатными породами.

Снятие напряжений по зонам тектонических разрывов. На Селигдарском месторождении тектонические зоны дробления развиты очень широко. Заложение разрывов крутопадающее, они оконтуривают блоки руд размером от 0,1x0,1 до 0,5x0,5 км. Ширина их 1—20 м. Широкие зоны разрывов, как правило, характеризуются чередованием участков брекчированных руд с монолитными. Зоны тектонических разрывов выполнены рудной брекчией с остроугольными обломками руды и тонко перетертого цемента карбонат-apatит-гематитового состава. Встречаются зоны милонитизации мощностью до 2 м и с тонкополосчатой текстурой, сложенные мелкозернистым доломитом с включениями обломков мартита и апатита. Всего по месторождению брекчированных руд — до 15% общего объема рудного тела.

В рудах постоянно отмечаются мелкие зоны дробления и трещины, выполненные тонко протертой рудой, вдоль которых происходит перемещение мелких блоков относительно друг друга. Мощность таких зон и трещин 0,5—10 см.

Выводы. 1. Апатит образовывался в твердой среде, находящейся в напряженном состоянии, которое в большинстве случаев анизотропно.

2. В процессе роста апатита давление было неодинаково в разных направлениях, что доказывается наличием псевдоромбических, псевдомонаклинных, псевдотриклинных и спиральных кристаллов, симметрия которых отражает симметрию напряжений в твердой среде, где эти кристаллы выросли.

3. Динамометаморфизованный кварц — реликтовый минерал первичных пород, замещенных апатит-карбонатными рудами.

SUMMARY

The paper deals with minerals crystallizing in a deposit within an anisotropic stress field. A clearly pronounced stress character of apatite is shown. It is manifested in formation of stunted pseudorhombic, pseudomonoclinical, pseudotriclinical and spiral crystal habits. Relict dynamic-metamorphosed quartz of primary rocks replaced by apatite-carbonate ores is described.

1. Григорьев Д. П., Жабин А. С. Онтогенез минералов. — М.: Наука, 1975. — 315 с.
2. Воскресенская В. Б. Минеральный состав апатитовых руд Селигдарского месторождения (Центральный Алдан). — В кн.: Новости геологии Якутии. Якутск: Изд-во ЯФ СО АН СССР, 1978, с. 115—121.
3. Каменцев И. Е. К вопросу о влиянии активной подложки на изменение облика кристаллов апатита. — Зап. Всесоюз. минерал. о-ва, 1959, ч. 88, вып. 6, с. 705—708.
4. Леймлейн Г. Г. Морфология и генезис кристаллов. — М.: Наука, 1973. — 328 с.
5. Смирнов Ф. Л., Биланенко В. А. Селигдарское месторождение апатита. — Разведка и охрана недр, 1974, № 12, с. 5—9.
6. Смирнов Ф. Л., Маршинцев В. К., Москвитин Р. А. В. и др. Типоморфные особенности апатита из месторождений и проявлений апатита: Геохимия фосфора и особенности минералогии апатита. — Якутск: Изд-во ЯФ СО АН СССР, 1976, с. 5—31.
7. Смирнов Ф. Л. Геологическая позиция и условия формирования Селигдарского месторождения апатита. — Сов. геология, 1977, № 7, с. 89—97.
8. Смирнов Ф. Л. Геология апатитовых месторождений Сибири. — М.: Наука, 1980. — 245 с.
9. Флин Д. Деформации при метаморфизме: Природа метаморфизма. — М.: Мир, 1967. — 196 с.
10. Шафрановский И. И. Внешняя симметрия реальных кристаллов и симметрия питающей среды. — Зап. Всесоюз. минерал. о-ва, 1954, ч. 83, № 3, с. 198—211.
11. Шафрановский И. И. Кристаллография минералов: Кривоугольные, скелетные и зернистые формы кристаллов. — М.: Геолтехиздат, 1961. — 332 с.

12. *Энтин А. Р., Белоусов В. М., Галкин Г. Ф.* Новые данные по геологии Селигдарского апатитового месторождения: Апатиты Алданского щита.— Якутск: Изд-во ЯФ СО АН СССР, 1977. с. 5—19.

Селигдарская ГРП,
Тимптоно-Учурская экспедиция

Поступила в редакцию
30.XII 1980 г.