

В. В. ЯКУБОВА

**ОПЫТ ИЗУЧЕНИЯ ВКЛЮЧЕНИЙ В МИНЕРАЛАХ
ПЕГМАТИТОВ МУРЗИНКИ (УРАЛ)**

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы включения в минералах привлекают к себе значительное внимание. Появилось немало работ, посвященных разработке как теоретических вопросов, связанных с изучением этих включений, так и методике работы с ними. Однако многие положения, выдвигаемые в этих работах, являются спорными и требуют дополнительной проверки. Казалось очень интересным попытаться сравнить существующие представления о течении минералообразующего процесса в каком-нибудь хорошо изученном месторождении, о парагенетических соотношениях минералов в нем с данными, которые можно получить, изучая включения в минералах. Для этой цели было выбрано хорошо изученное пегматитовое месторождение Мурзинка на Урале, для которого академик А. Е. Ферсман (1940) создал стройную схему хода минералообразования.

В настоящее время делать какие-то окончательные выводы преждевременно. Тем не менее, имеющиеся уже материалы представляют некоторую ценность.

При изучении включений в минералах можно получить много данных, имеющих значение для правильного понимания истории минералообразования. Химический состав жидких включений может дать чрезвычайно интересные сведения о составе минералообразующей среды во время роста минералов, а в некоторых случаях даст возможность установить зависимость между внешней кристаллической формой минералов и химическим составом минералообразующих растворов. Твердые включения представляют дополнительные парагенетические сведения, ранее неизвестные для данного месторождения. Морфология включений, их распределение в минералах могут дать представление об истории роста кристаллов, явлениях, сопутствующих образованию включений, и т. д.

С этой точки зрения нам кажутся заслуживающими внимания данные, полученные при изучении включений в топазах. Изучение включений производилось на богатом материале коллекций Минералогического музея Академии Наук СССР, собранном такими известными минералогами, как академик А. Е. Ферсман, проф. В. И. Крыжановский и др.

ВКЛЮЧЕНИЯ В ТОПАЗАХ

Для Мурзинского пегматитового месторождения А. Е. Ферсман (1927) выделяет четыре типа топазов:

I тип — голубые топазы — «квадратные» с сильно развитым базопинакоидом, с почти квадратной призмой l (120) и слабо развитой призмой M (110). Сильно развита дома y (021), узкая полоска дома f (011) и слабо развиты пирамиды u (112) и др.

II тип — бесцветные топазы — «гексагональные». Сильно развита призма M (110), базопинакоид сужен четырьмя рядами пирамид [главным образом u (112) и o (111)]. Преобладает дома f (011) над домой y (021). Богаты разнообразными формами.

III тип — сильно разъединенные бесцветные кристаллы, сходные по внешнему виду с кристаллами II типа.

IV тип — «доматический» — характеризуется сильным развитием дома y (021) и призмы l (120). Остальные формы развиты слабо.

В IV типе А. Е. Ферсман без достаточных оснований, с нашей точки зрения, объединил два совершенно разных типа топазов:

1. Топазы голубоватые с сильно развитой домой и призмой l (120), связанные многочисленными переходными формами с топазами I типа и встречающиеся вместе с лепидолитом и дымчатым кварцем на альбите.

2. Мелкие кристаллы бесцветного топаза в форме так называемых «конвертов». В отличие от предыдущих, они имеют слабо развитую призму с преимущественным развитием дома; нарастают боком (а не концом оси Z) в пустотах разъединенного и вытравленного пегматита вместе с кристалликами альбита. Это типичные поздние топазы. Кажется более правильным разделить IV тип топазов на два подтипа.

На основании детального изучения минералогического материала этого месторождения А. Е. Ферсман (1940) устанавливает следующий порядок выделения топазов:

Фаза D — E, температура 575—525°, выделяется топаз I типа — «квадратный».

Фаза E — F, температура 525—475°, выделяются топазы II и III типов — «гексагональные».

Фаза F — G, температура 475—425°, выделяются топазы IV типа — «доматические».

При просмотре 111 образцов топазов, находящихся в коллекции Музея, была обнаружена определенная зависимость между внешней формой топазов и составом жидких включений в них.

Жидкие включения в топазах I типа и первого подтипа IV типа

Топазы I типа и первого подтипа IV типа обычно имеют голубую окраску и часто не прозрачны из-за многочисленных включений — как жидких, так и твердых. При тщательном просмотре образцов топазов указанных типов было обнаружено, что все они содержат многочисленные многофазовые жидкие включения одного и того же состава. Эти включения состоят из газового пузырька, раствора и твердой фазы. В некоторых случаях первичный характер включений несомненен, так как встречаются топазы сплошь мутные, включения в них распределены более или менее равномерно по всему кристаллу, и очевидно, что они могли образоваться только вследствие захвата маточного раствора во время роста кристаллов.

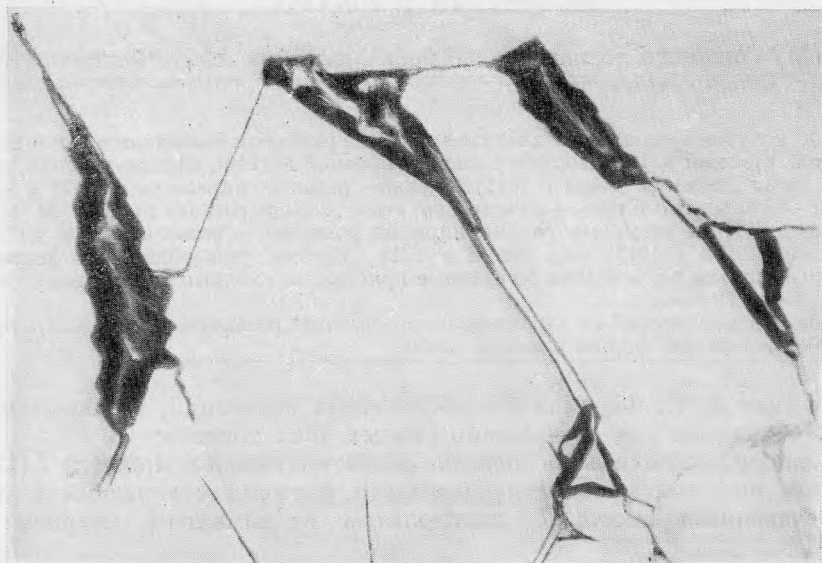


Рис. 1. Включения в топазе. $\times 165$.

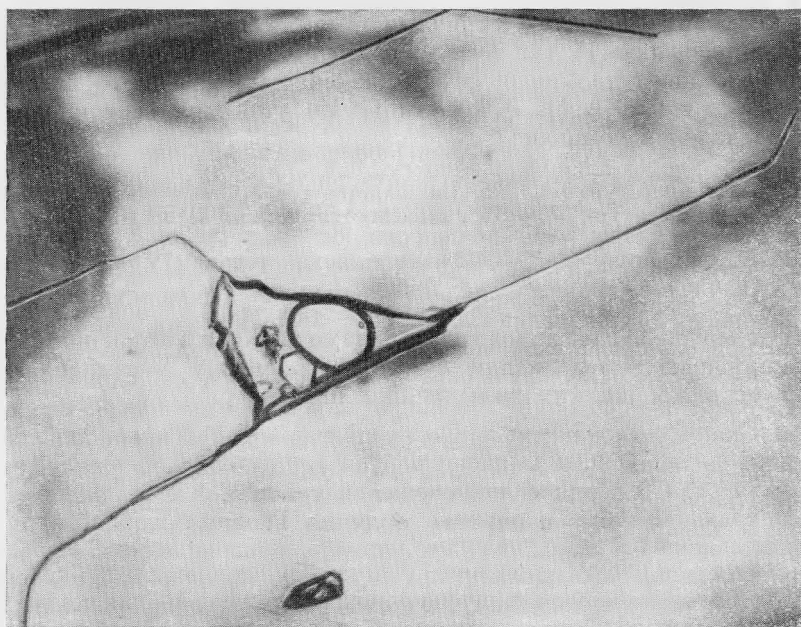


Рис. 2. Включения в топазе. Основное включение содержит псевдогексагональный пластинчатый минерал — буру. Вверху над основным включением расположено волосовидное включение. $\times 80$.

Нам удалось особенно детально изучить один кристалл топаза «доматического» типа, а также отдельные пластинки от нескольких топазов «квадратного» типа.

Для включений в этих топазах характерна строго выдержанная геометричность их форм, кристаллическая огранка (рис. 1 и 2). Это может показаться парадоксальным, так как при первом взгляде эти включения поражают своими фантастическими очертаниями. Однако внимательное их изучение показывает, что всюду имеются плоские микрокристаллические ограничения, причем для них чрезвычайно характерно ступенчатое строение (рис. 3, 10).

В некоторых случаях часть кристалла оказывается окруженной включением, которое как бы охватывает растущий субиндивид кристалла (рис. 4). Встречаются сетчатые включения, состоящие из отдельных разветвляющихся и пересекающихся друг с другом кавалов, которые относятся к одному включению и имеют общий газовый пузырек (рис. 5 и 6).

Чрезвычайно интересны процессы, предшествующие замыканию включений и обуславливающие образование ореолов вокруг этих включений (рис. 7—17). Эти ореолы образованы мельчайшими дендритообразными каналами, выполненными раствором, и представляют собой одно целое с основным включением. Внутренняя часть таких включений имеет правильные кристаллические очертания. Отдельные дендриты росли как бы единым фронтом и, заканчивая свой рост, образовали плоские кристаллические грани, образующие внутренние стенки включения. Это можно отчетливо наблюдать при большом увеличении (рис. 8).

Несомненно, что такое строение внутренней части включения является следствием свойства каждого кристаллического вещества в процессе роста образовывать определенные равновесные формы. Часто в периферической части ореола отдельные участки этих дендритов оторваны от основного включения и образуют самостоятельные микровключения с собственным газовым пузырьком (рис. 8). Иногда ореол представлен только цепочкой мельчайших включений (рис. 13, 14). Наблюдались нами и каемки вокруг включений, ограниченные слабо намечающейся линией (рис. 15—17), как это было впервые описано для топазов Воьлини Г. Г. Леммлейном (1950), а затем Н. П. Ермаковым (1950).

Кажется очевидным, что как образование ореолов из дендритов, наблюдаемых нами в топазах Мурзинки, так и образование каемки вокруг включений — следствие одного и того же процесса.

Г. Г. Леммлейн (1950) предполагает, что образование каемки вокруг включений в минералах обусловлено отложением вещества этих минералов из маточного раствора после того, как он был замкнут в пустотке. Эта гипотеза недостаточно обоснована.

Нельзя не согласиться с соображениями, высказанными по этому поводу Н. П. Ермаковым (1950). При изучении каемок прежде всего обращает на себя внимание масштаб этого процесса. Для отложения такого количества веществ (а они иногда достигают 25% от величины включения) необходимо исключительно высокое содержание этих веществ в растворе, замкнутом в пустоте. Это кажется маловероятным, тем более, что согласно имеющимся в литературе данным по экспериментальному выращиванию кристаллов, включения обычно образуются в местах застоя, в местах нарушения нормального питания кристаллов в процессе роста (Шубников, 1935; Аншелес, 1938; Штернберг, 1945; Татарский, 1946; Новые исследования... 1950).

Следовательно, раствор, заключенный в пустотах, не должен содержать значительных количеств вещества самого минерала.

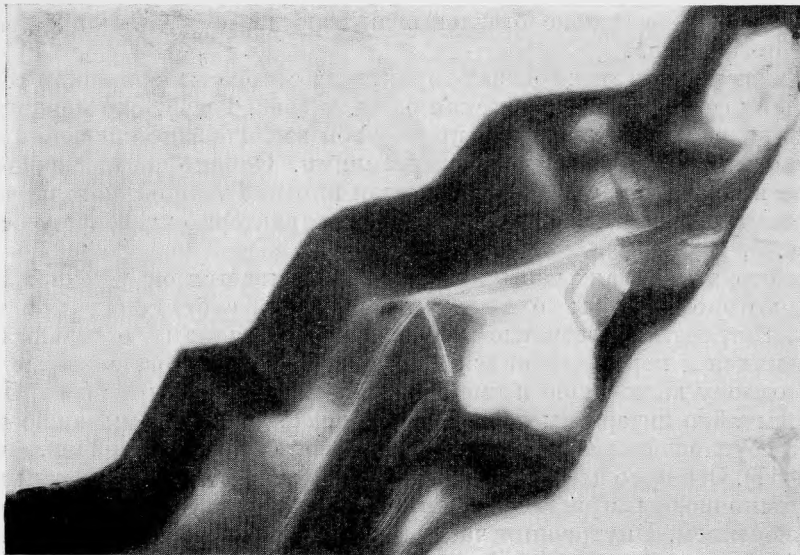


Рис. 3. Ступенчатое строение включения в топазе. Часть включения, изображенного на рис. 1, слева. $\times 370$.

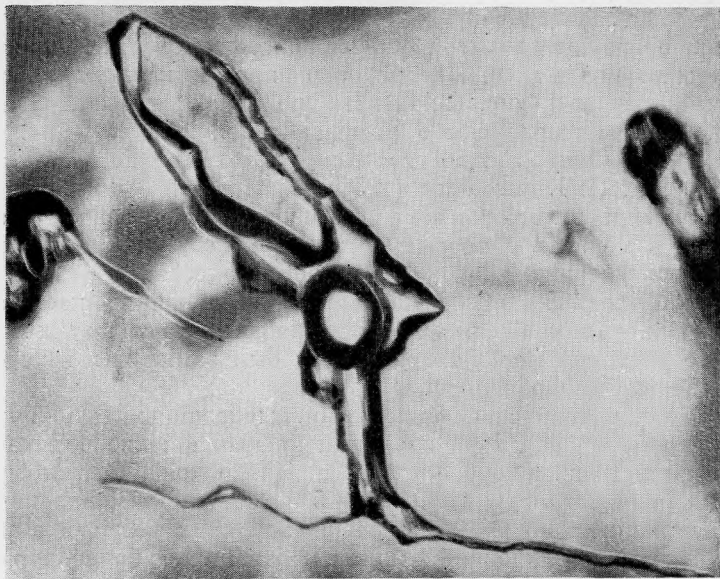


Рис. 4. Включения в топазе. $\times 370$.

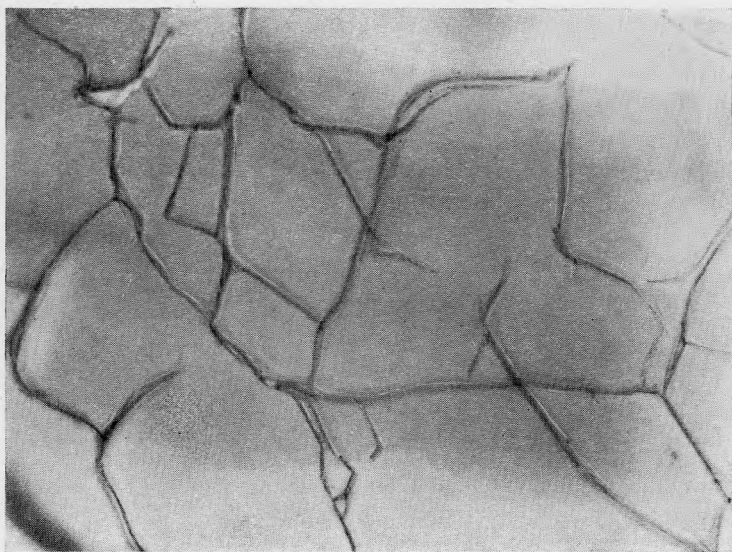


Рис. 5. Сетчатые включения в топазе. $\times 165$

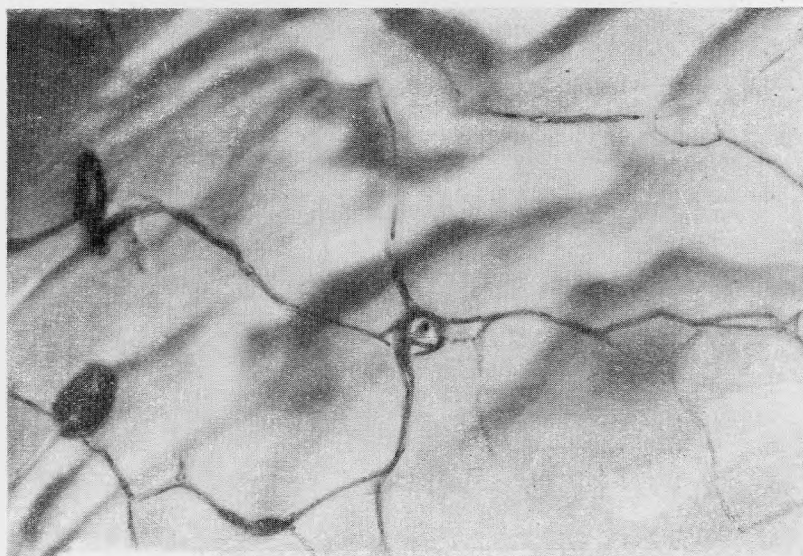


Рис. 6. Сетчатое включение в топазе. В центре виден газовый пузырек. $\times 165$.

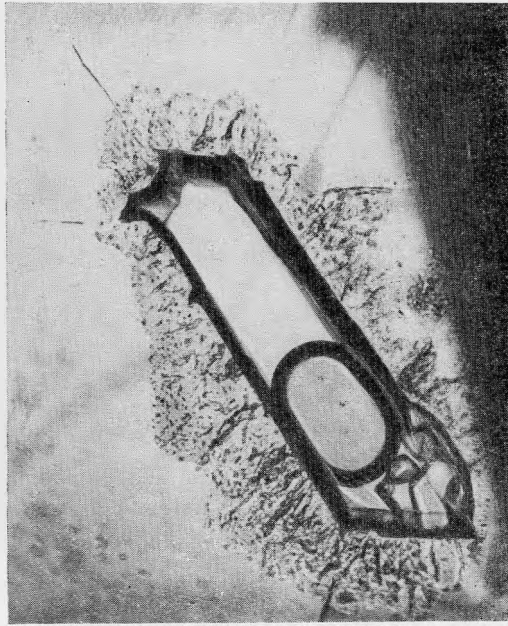


Рис. 7. Ореол вокруг включения в топазе, образованный мельчайшими дендритообразными каналами. $\times 210$.

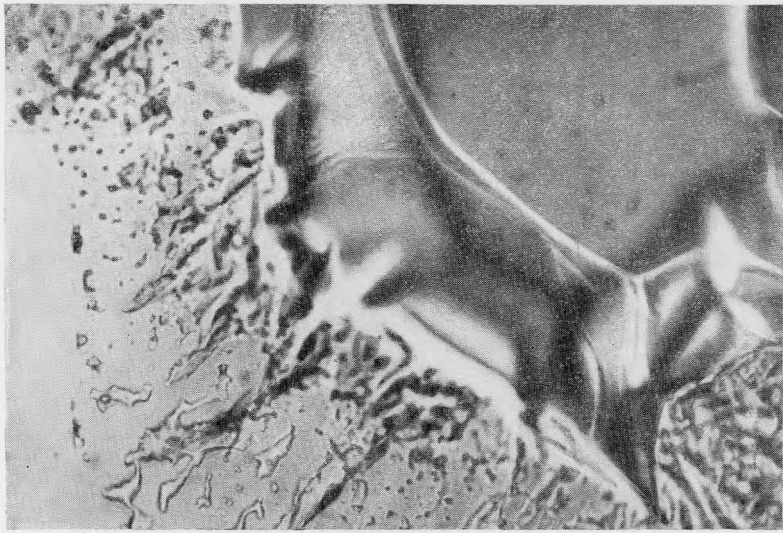


Рис. 8. Строение ореола вокруг включения в топазе. Часть включения, изображенного на рис. 7. $\times 500$.

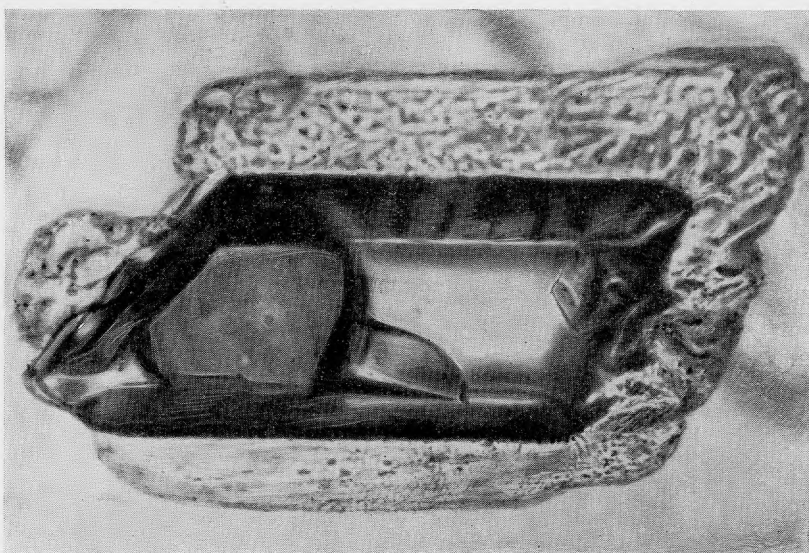


Рис. 9. Ореол дендритов вокруг включения в топазе. $\times 370$.

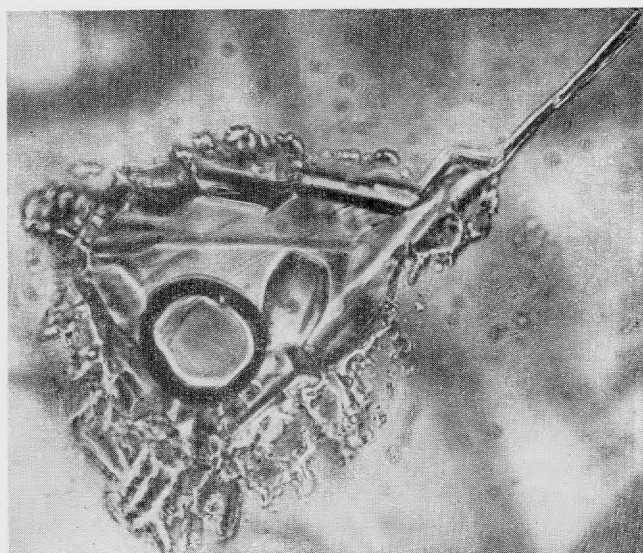


Рис. 10. Включение в топазе, имеющее ступенчатое строение с дендритообразным ореолом вокруг. Внутри включения — кристалл буры $\times 500$.

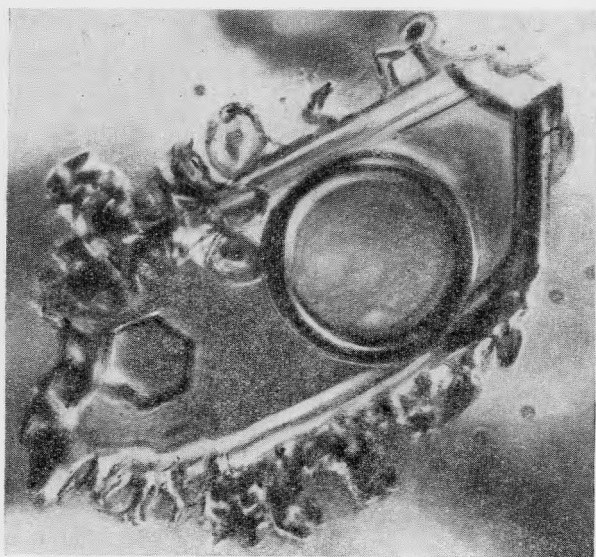


Рис. 11. Ореол дендритов вокруг включения в топазе. Внутри включения — кристаллы буры. $\times 500$.

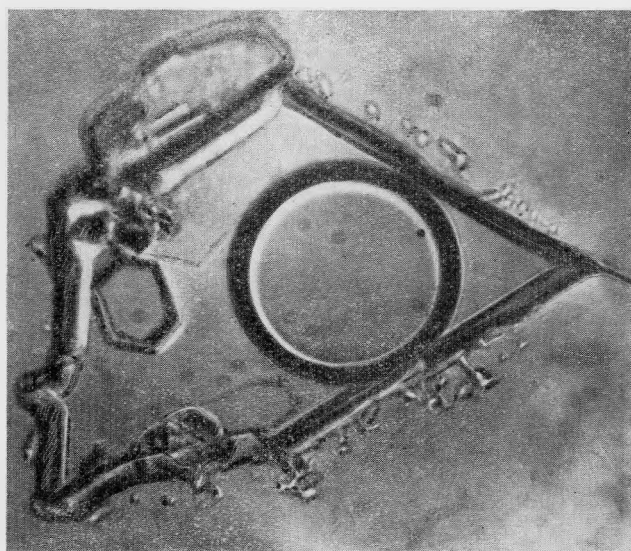


Рис. 12. Дендриты вокруг включения в топазе. Внутри включения — кристаллы буры. $\times 500$.

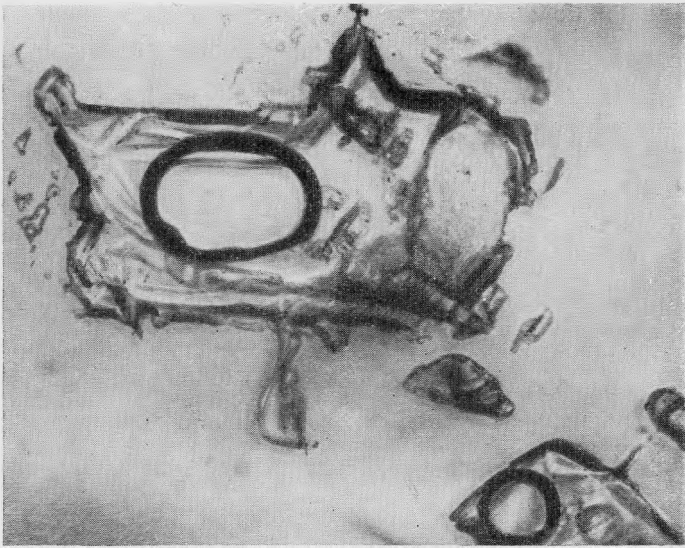


Рис. 13. Цепочка мелких включений вокруг основного включения в топазе. $\times 210$.

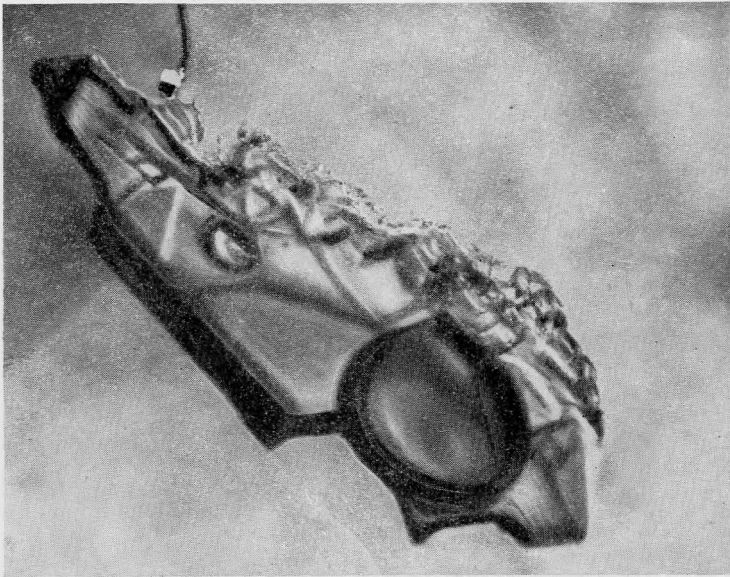


Рис. 14. Цепочка мелких включений с одной стороны основного включения в топазе. $\times 210$.

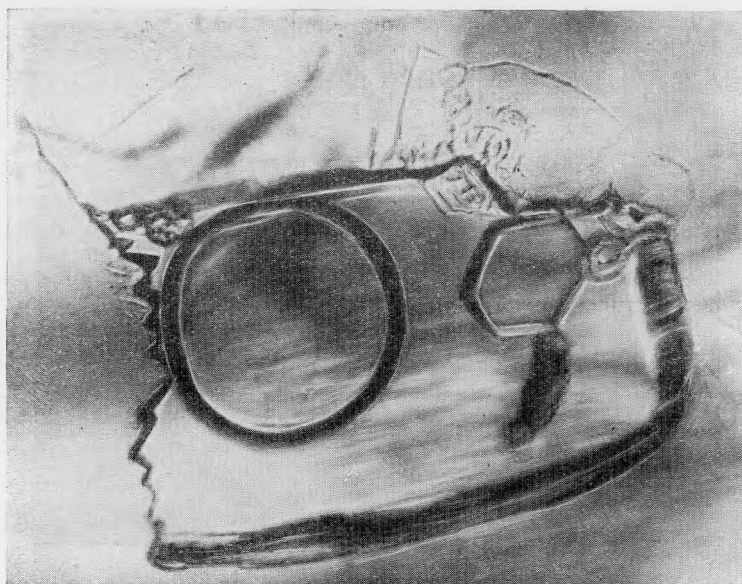


Рис. 15. Ореол из дендритов и мелких включений вокруг основного включения в топазе. Внутри включения — кристаллы берилы. $\times 210$.



Рис. 16. Каемка вокруг включения в топазе в виде слабо намечающейся линии. Между каемкой и включением цепочка мелких включений. $\times 400$.

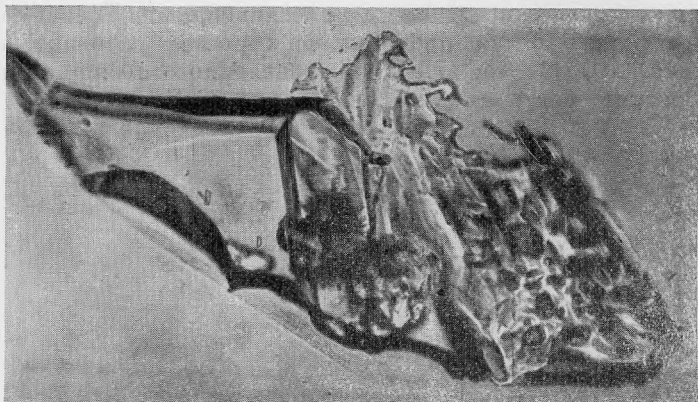


Рис. 17. С одной стороны включения в топазе намечается слабой линией каемка, с другой — включение имеет неправильное дендритообразное ограничение. Внутри включения — твердая фаза. $\times 165$.

Предположение, что ореолы вокруг включений могли образоваться в результате каких-то вторичных процессов, которые могли протекать после замыкания пустоты, также маловероятно. Раствор и кристалл, в котором он заключен, находятся в равновесии. Чтобы возникло взаимодействие между стенками включения и раствором, необходимо нарушение этого равновесия независимо от того, будет ли это механическое нарушение кристаллической решетки минерала, как это происходит в случае зарастивания трещин в Na-селитре в опыте Г. Г. Леммлейна (1951), или же повышение температуры внешней среды, окружающей минерал.

Изучение серии пластинок из одного кристалла топаза, ориентированных перпендикулярно его вертикальной оси, определенно показывает, что распределение включений в нем не подчинено направлениям механических разломов. Следовательно, образование ореолов вокруг включений в топазе не явилось результатом залечивания механических нарушений в кристалле.

Предположение, что во время процесса кристаллизации произошло внезапное повышение температуры, также не дает удовлетворительного объяснения этого явления. В случае повышения температуры включения с ореолом должны были образоваться во всех топазах этого типа, однако этого не наблюдается. Скорее, наоборот, топазы с ореолами и каемками вокруг включений представляют редкость, что указывает на какие-то особые, исключительные условия во время кристаллизации топазов.

Дендритообразные ореолы вокруг включений, с нашей точки зрения, подтверждают высказанное Н. П. Ермаковым (1950) положение, что образование каемок родственного вещества вокруг включений предшествует замыканию включений и является следствием спокойного отложения родственного вещества в условиях застойных областей образования включений, областей, для которых характерна медленная диффузия материнского вещества.

Очень своеобразна также твердая фаза включений в топазах этого типа. Прежде всего обращает на себя внимание полное отсутствие кристаллов кубической сингонии, столь обычных для включений в топазах Волынского месторождения, подробно описанных Н. П. Ермаковым (1950) и,

несомненно, являющихся галоидными соединениями. Твердая фаза включений в мурзинских топазах представлена хорошо образованными кристалликами (рис. 10, 11, 15, 17—20), определенно относящимися к другим кристаллическим системам.

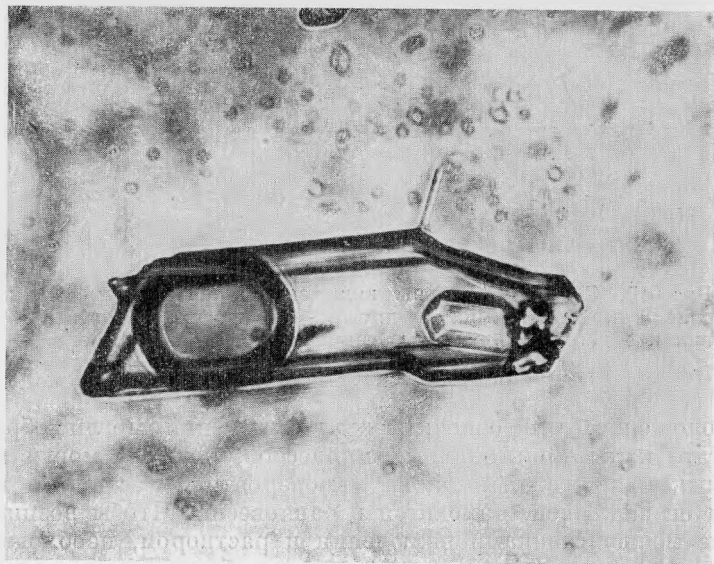


Рис. 18. Включение в топазе. Внутри включения — кристаллы буры. $\times 500$.

Казалось интересным попытаться, хотя бы приблизительно, определить состав этих кристаллов и таким образом подойти к вопросу о составе минералообразующих растворов, тем более, что аналогичные включения были обнаружены и в некоторых образцах дымчатого кварца этого месторождения (рис. 21, 22). Следовательно, включения характерны не только для топазов и имеют большое значение для правильного понимания истории минералообразования Мурзинского пегматитового месторождения.

Прежде всего мы попытались установить степень растворимости минералов твердой фазы. Нагревание включений производилось в микротермокамере Н. П. Ермакова. Было обнаружено, что все эти минералы при температуре $40\text{--}50^\circ$ целиком растворяются, при охлаждении же снова выпадают в виде зернистой массы.

Для определения химического состава этих включений нами были сделаны водные вытяжки из богатых включениями топаза и дымчатого кварца. Водные вытяжки готовились следующим образом. Топаз доматического типа, сплошь выполненный включениями, измельчали в стальной ступке (отдельные пластинки этого топаза предварительно изучались под микроскопом и в термокамере). Затем его заливали водой и нагревали до температуры 80° , при которой выдерживали в термостате в течение 6 часов. Полученная вытяжка была выпарена до небольшого объема и исследована при помощи микрохимических реакций. В результате было установлено содержание Na, K, Mg и небольшое количество Cl.

Опыт был проделан вторично и дал аналогичные результаты.

Параллельно была получена водная вытяжка из дымчатого кварца, который также был изучен предварительно микроскопически; растворимость

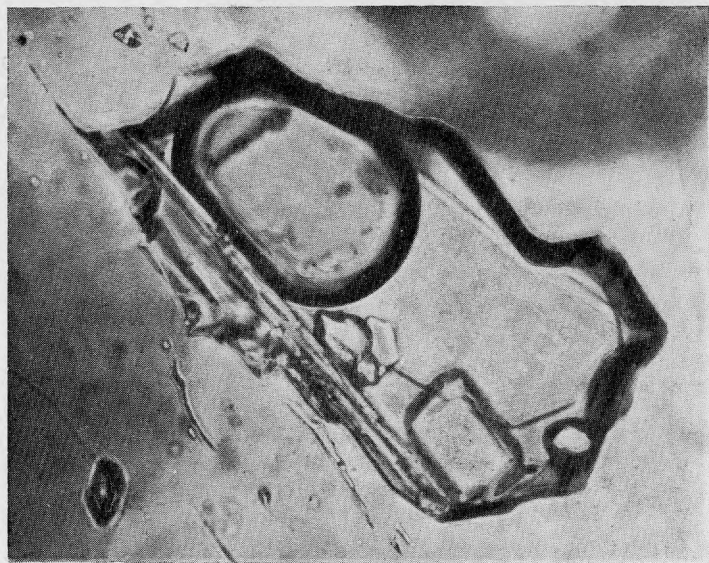


Рис. 19. Включение в топазе. Внутри включения — кристаллы беры. $\times 370$.

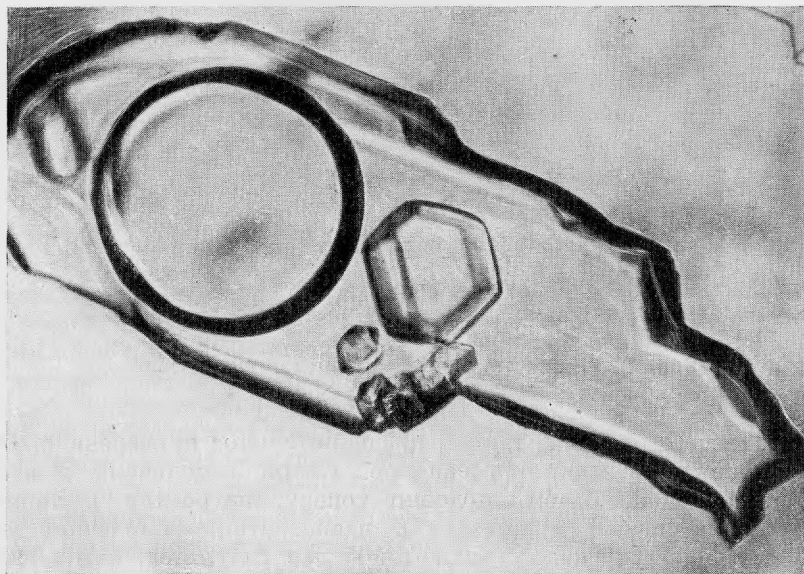


Рис. 20. Включение в топазе. Внутри включения — кристалл беры. $\times 370$.



Рис. 21. Включение в кварце. Внутри включения — кристаллы топаза. $\times 400$.

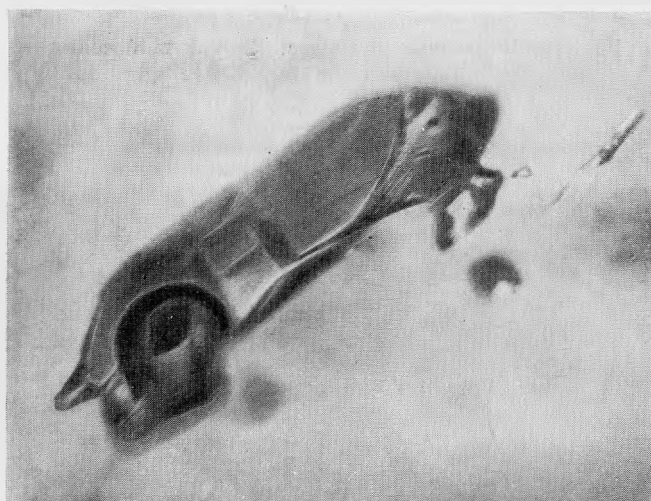


Рис. 22. Включение в кварце. Внутри включения — кристаллы топаза. $\times 210$.

твердой фазы его была также предварительно проверена в отдельных пластинках в микротермокамере. Кварц измельчали в агатовой ступке под водой. Затем, подобно топазу, нагревали в термостате при температуре 80° в течение 6 часов. Микрохимический анализ водной вытяжки из кварца дал такой же результат, как и вытяжка из топаза. Повторный опыт подтвердил полученный результат.

Так как при помощи микрохимического анализа оказалось невозможно определить другие анионы, кроме небольшого количества Cl , а довольно значительная концентрация полученной вытяжки и форма кристаллов твердой фазы указывали на несомненное присутствие других анионов, то было решено произвести спектральный анализ водной вытяжки.

Водная вытяжка была приготовлена таким же способом, как и в предыдущих случаях и из того же образца дымчатого кварца, из которого готовилась для микрохимического анализа. Затем она была выпарена, и полученный осадок подвергли спектральному анализу. Анализ производился на медных электродах в спектральной лаборатории Института геологических наук Академии Наук СССР и дал сильную линию бора.

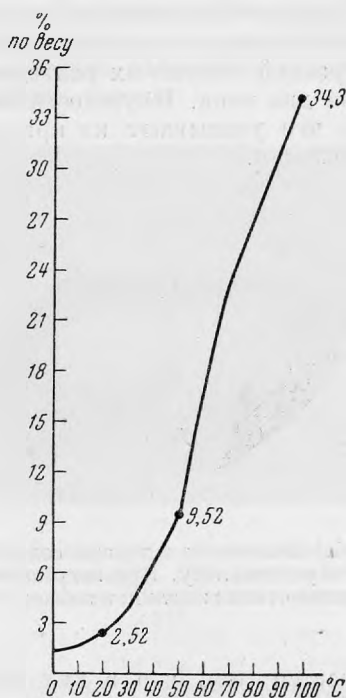


Рис. 23. Кривая растворимости $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ в 100 г раствора (в % по весу).

Очевидно, минералы твердой фазы этих включений представляют собой борные соединения, а их высокая растворимость указывает на соединения бора с щелочными металлами. Наиболее вероятно, что эти минералы являются бурой. Растворимость буры (рис. 23) при нагревании от 20 до 50° увеличивается почти в 3½ раза. Минерал твердой фазы включений растворяется именно в этом температурном интервале¹.

Если мы сравним кристаллическую форму этих минералов с существующими в природе кристаллами буры, то их тождество станет в достаточной степени очевидным (рис. 10—12, 15, 18—22).

Бура кристаллизуется в моноклинной сингонии, причем, кроме типичных моноклинных кристаллов, иногда может встречаться в форме псевдогексагональных призм (Goldschmidt, 1913). Известны также и пластинчатые формы этого минерала (Новые исследования..., 1950).

¹ Растворимость этого минерала наблюдалась при нагревании включений: для топаза — в восьми случаях, для кварца — в пяти.

Минерал твердой фазы включений обычно образует псевдогексагональные пластинки (рис. 11, 12, 15, 19—21), псевдогексагональные призмы (рис. 22) и типичные моноклинные кристаллы, у которых даже можно установить отдельные формы (рис. 18).

Жидкие включения в топазах II и III типов

II и III типы топазов Мурзинского месторождения представлены бесцветными, богатыми кристаллическими гранями кристаллами «гексагонального» облика. Основываясь на разной степени их разъеденности, А. Е. Ферман (1927) подразделил их на два типа. В сущности же они являются одним генетическим типом, на что указывают их кристаллическая огранка и парагенетические соотношения.

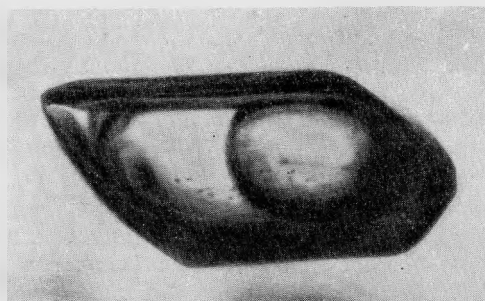


Рис. 24. Включение в топазе, содержащее жидкую углекислоту. При нагревании полость включения выполняется газом. $\times 210$.

Это же подтверждается тем, что в них наблюдаются многофазовые жидкие включения, имеющие одинаковый состав. Включения в этих топазах состоят из газового пузырька и двух несмешивающихся жидкостей: раствора и жидкой углекислоты. В топазах этого типа твердая фаза ни в одном включении не была обнаружена.

Такой состав включений сохраняется независимо от того, происходит ли залечивание трещинок в топазе или же это включения трубчатой формы, расположенные во внешней части кристаллов параллельно их призматической зоне, и, очевидно, первичные. Температура гомогенизации этих включений одинакова. Повидимому, залечивание трещин в топазах происходило одновременно с образованием внешней части кристаллов.

При просмотре включений было обнаружено, что соотношение фаз в них не одинаково и наблюдается значительное колебание в содержании жидкой углекислоты. Имеются включения, в которых содержание углекислоты достигает 50% и больше (рис. 24). Наряду с этим встречаются включения, в которых количество углекислоты незначительно и составляет всего 10—15% (рис. 25).

В случае содержания углекислоты в количестве 50% и больше процесс гомогенизации при нагревании включений идет следующим образом: при критической температуре углекислоты включение становится двухфазовым, газовый пузырек значительно увеличивается (занимает около $3/4$ включения); при дальнейшем повышении температуры газовый пузырек увеличивается; при температуре 200—250° включение становится

гомогенным с переходом в газовую фазу. Опыт проделывался с 11 образцами топаза, содержащими включения этого типа.

Во включениях, в которых содержание углекислоты незначительно, процесс гомогенизации идет другим путем. При критической температуре углекислоты имеется также двухфазовая система газ — раствор, в которой при дальнейшем нагревании, примерно после 150° , наступает постепенное уменьшение газового пузырька, а при температуре $225\text{--}250^{\circ}$ — полная гомогенизация с заполнением включения раствором. Производилось нагревание 4 образцов топаза, содержащих такие включения.

В одном случае нам удалось наблюдать в кристалле гомогенизацию, идущую одновременно двумя путями.



Рис. 25. Включение в топазе, содержащее жидкую углекислоту. При нагревании полость включения выполняется жидкостью.
× 210.

Включения, гомогенизация которых шла с заполнением полости включения газом, расположены во внешней части топаза параллельно зоне призмы; они имеют трубчатую форму и, очевидно, являются первичными. Температура их гомогенизации 200° .

Включения, гомогенизация которых идет по гидротермальному пути, расположены глубже, чем включения первого типа, и связаны с вращением в топаз довольно значительного кристалла постороннего минерала, от которого включения отходят, образуя цепочки. Повидимому, эти включения образовались раньше, чем включения во внешней зоне кристалла. Температура гомогенизации указанных включений 215° .

Изучение этих включений показывает, во-первых, что направление процесса гомогенизации (т. е. переходит ли все включение в газовую фазу при нагревании или в жидкую) обуславливается содержанием в них углекислоты, т. е. летучего компонента, а во-вторых, что на температуру гомогенизации этих включений не влияет изменение в соотношении фаз во включениях.

Включения этого типа дают, пожалуй, единственную в своем роде возможность непосредственно наблюдать влияние состава включений на процесс гомогенизации. Возможное возражение, что эти включения не типичны и что включения углекислоты являются ксеногенными, чуждыми маточному раствору и могли просто прилипнуть к стенкам включения в виде отдельных газовых пузырьков, как нам кажется, не имеет принципиального значения.

При нагревании включений они взаимодействуют как одно целое, и поэтому могут служить примером замкнутой системы с повышенным содержанием летучего компонента. Очевидно, что значительное содержание летучих компонентов во включениях оказывает существенное влияние на процесс гомогенизации и может изменять его направление.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая работа содержит только некоторые предварительные данные по изучению включений в минералах Мурзинского пегматитового месторождения и не исчерпывает всех материалов по изучению включений в топазах этого месторождения.

Тем не менее уже на основании изложенных выше материалов можно сделать некоторые интересные выводы.

Прежде всего заслуживает внимания строго выдержанная зависимость между кристаллографической формой топазов и составом включений в них.

Для топазов «квадратного» и «доматического» типа характерны включения с довольно значительным содержанием бора, образующего минерал твердой фазы, в то время как включения в топазах «гексагонального» типа содержат значительные количества углекислоты.

Вопрос о причинах изменения внешней формы кристаллов в настоящее время еще не нашел исчерпывающего решения. Несомненно, что внешняя форма кристаллов определяется условиями их роста. Существует много опытных данных, указывающих на прямую зависимость между избирательной способностью отдельных граней кристалла адсорбировать примеси, находящиеся в растворе, и их внешней формой. Кажется вполне вероятным, что образование топазов с резко отличным внешним видом в Мурзинском месторождении явилось следствием различного состава минералообразующих растворов. На то, что такое различие существовало, достаточно убедительно указывает разнообразный состав жидких включений в топазах разных типов.

По схеме, данной академиком А. Е. Ферсманом (1940) для этого месторождения, топазы «квадратного» типа являются наиболее высокотемпературными. Хотя в настоящее время преждевременно говорить о температурах их образования, тем не менее, полученные данные о составе включений в них не противоречат этому выводу. Включения в топазах «квадратного» типа содержат бор — элемент, характерный для высокотемпературных процессов, в то время как включения в топазах «гексагонального» типа содержат углекислоту, что, несомненно, указывает на более низкую температуру образования этих включений.

Столь же интересны и результаты изучения гомогенизации включений с разным содержанием углекислоты. Эти включения можно рассматривать как пример замкнутых систем с разным содержанием летучего компонента.

Различный характер их гомогенизации, обусловленный неодинаковым содержанием углекислоты, указывает на то, что направление процесса гомогенизации зависит не от состояния среды в момент замыкания включения, а от состава маточного раствора.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- А н ш е л е с О. М. Некоторые наблюдения над ростом и растворением микроскопических кристаллов гипосульфита. Уч. зап. Ленингр. унив., сер. геол.-почв., вып. 21, 1938.
- Е р м а к о в Н. П. Исследования минералообразующих растворов. Изд. Харьк. унив., 1950.
- Л е м м л е й н Г. Г. Соответствует ли наблюдаемый современный объем включения первоначальному. Докл. АН СССР, т. LXXII, № 4, 1950.
- Л е м м л е й н Г. Г. Процесс залечивания трещины в кристалле и преобразование формы полостей вторичных жидких включений. Докл. АН СССР, т. LXXVIII, № 4, 1951.
- Новые исследования по кристаллографии и кристаллохимии. Рост кристаллов. Сб. I и II. Изд-во иностр. литер., М., 1950.
- Т а т а р с к и й В. Б. Промышленное выращивание кристаллов из растворов и связанные с ним проблемы. Тр. Юбил. научн. сессии, сер. геол.-почв., Ленингр. унив., 1946.
- Ш т е р н б е р г А. А. Влияние неоднородности кристалла на скорость нарастания грани. Уч. зап. Ленингр. унив., сер. геол.-почв., вып. 13, 1945.
- Ш у б н и к о в А. В. Как растут кристаллы. Изд-во АН СССР, 1935.
- Ф е р с м а н А. Е. К минералогии пегматитовых жил Среднего Урала. Тр. Минерал. музея АН СССР, 11, 1927.
- Ф е р с м а н А. Е. Пегматиты. Т. I. Изд. 3-е. Изд-во АН СССР, 1940.
- G o l d s c h m i d t V. Atlas der Krystallformen. Bd. I. Heidelberg, 1913.