

МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЙ
СБОРНИК
№ 3

ПРИЛОЖЕНИЕ ПЕРВОЕ

Н. П. ЕРМАКОВ

КРИТЕРИИ ПОЗНАНИЯ
ГЕНЕЗИСА МИНЕРАЛОВ
и
СРЕДА РУДООБРАЗОВАНИЯ

* 40575

О Г Л А В Л Е Н И Е

Предисловие	9
1. Современное состояние теории рудообразования	9
2. Этапы минералообразования и типы включений в минералах	14
3. Твердые включения в минералах и их генетическое значение	21
4. Магматический этап минералообразования и затвердевшие включения	22
1) Раскристаллизованные включения	23
2) Включения вулканического стекла	24
3) «Письменные» включения и механизм образования ихтиоглиптов	27
5. Способы образования и генетическая классификация жидких и газовых включений в минералах	30
1) Первичные включения	32
2) Первично-вторичные включения	33
3) Вторичные включения	35
6. Типы гомогенизации жидко-газовых включений и границы пневматолитического минералообразования	37
7. Жидкие включения и этап гидротермального минералообразования	51
8. Схема главнейших этапов и стадий развития процессов рудообразования	55
9. Литература	64
Микрофотографии и пояснения к ним	70

Между разнообразными включениями в минералах и горных породах особенный интерес представляют включения жидкостей, не без основания принимаемые нами за части той среды, в которой происходило образование этих минеральных веществ. Кроме того, самые свойства включенных жидкостей могут дать указания на некоторые существовавшие тогда внешние условия.

(А. П. Карпинский. Горный журнал, т. II, № 4—5 (1880).)

ПРЕДИСЛОВИЕ

При решении вопросов, связанных с выяснением происхождения эндогенных месторождений и минералов, обычно упускались из внимания подвижные остатки минералообразующей среды, сохранившиеся во включениях, и до последнего времени использовались только общие признаки, связанные с условиями залегания, а также текстурами и структурами руд. Эти признаки оказались совершенно недостаточными или условными для многих случаев, в частности для различения гидротермальных и пневматолитических месторождений. На примере с пегматитами мы можем видеть, как разные исследователи совершенно различно трактуют их происхождение и даже отрицают участие остаточного магматического расплава в их образовании. Подразделение гидротермальных месторождений на низко-, средне- и высокотемпературные также было основано на весьма условных показателях, а в одинаковых условиях залегания не представлялось возможным объективно отличать термальные и холодноводные минералообразования.

Таким образом, действительно назрела проблема выявления объективных критериев для суждения о генезисе минералов и минеральных месторождений. Автор с 1941 г. начал заниматься включениями в минералах с целью их использования для минералогической термометрии и вскоре убедился в большом разнообразии этих включений, встречающихся в минералах различного происхождения. Однотипные включения оказались свойственны минералам одного и того же класса месторождений или одинаковым минеральным генерациям в них. Поэтому уже в 1944 г. оказалось возможным высказать уверенность в том, что включения минералообразующей среды являются недостающими объективными показателями генезиса включающих минералов (32).

Дальнейшая работа по изучению остатков среды минералообразования проводилась в двух направлениях: 1) исследования ее

первичного агрегатного состояния и 2) определения былых температур гидротермальных растворов. Нужно было научиться различать во включениях все три возможных состояния среды: расплав, газовый раствор и водный раствор. Минералообразующая среда, порожденная тем или иным магматическим очагом, формировала минеральные месторождения в той или иной геологической обстановке. Поскольку сама среда, оставившая неподвижные продукты своей деятельности в виде минералов, казалась неуловимой, с ней часто отождествлялась геологическая обстановка и в первую очередь породы, в окружении которых протекал процесс минералообразования. Здесь необходимо проводить четкие разграничения между средой, в которой осуществлялся кристаллогенез, и геологической обстановкой, ее окружавшей. В лабораторных условиях аналогами этих понятий будут, например, раствор, из которого осуществляется рост кристалла, и стенки сосуда, вмещающие этот раствор. Для природных условий эта аналогия, конечно, является примитивной и правильной лишь в самом общем виде. Среда минералообразования и окружающие ее породы находятся обычно в теснейшем взаимодействии и активно воздействуют друг на друга, что существенно отражается на ходе минералообразования и процессах замещения. Однако влияние геологической обстановки на выделение новых минералов осуществляется почти исключительно через посредство изменяющейся среды. Только при наличии в стенках природных кристаллизаторов, минералов родственных отлагающимся, обстановка может непосредственно влиять на кристаллизацию, что проявляется, например, в подчиненной ориентировке новообразующихся минералов. В многостадийном процессе минералообразования окружающая обстановка сама постоянно изменяется и ее роль часто играют уже отложившиеся минеральные продукты предыдущей стадии, также подвергающиеся изменениям под влиянием новой среды и, в свою очередь, но уже по-иному влияющие на последнюю. В геологической обстановке минералообразования, кроме состава окружающих пород, необходимо учитывать степень их проницаемости (трещиноватость, пористость), глубину залегания их от поверхности, расстояние от активной части магматического очага и другие моменты, прямо или косвенно влияющие на состав и состояние минералообразующей среды в пункте ее действия.

Автору ясно, что многообразие и многосторонность процесса минералообразования не могут быть освещены в нескольких словах, но ему хотелось подчеркнуть, что для конкретных случаев исследования месторождений минералообразующая среда и геологическая обстановка (в первую очередь окружающие породы) должны рассматриваться не в отрыве друг от друга, а в постоянном взаимодействии и взаимоизменении. Как было доказано К. А. Власовым (19, 20) при исследовании нейтрализованных пегматитов, газовая среда обладает каталитическими свойствами и осуществляет огромную химическую работу во вмещающих породах, которые, в свою очередь, в значительной степени являются постав-

щиками материала для минеральных новообразований. На примерах глубокого анализа ряда метасоматических и метаморфических явлений (Д. С. Коржинский 50, 54 и др.) можно видеть, что взаимодействие минералообразующей среды и геологической обстановки может быть настолько активным, что играет решающую роль в образовании и в генетическом облике многих месторождений и определяет физико-химическую направленность процесса.

Однако в данной работе автор в силу необходимости отвлекался от геологической обстановки минералообразования и в связи с поставленными задачами рассматривал только запечатанные в кристаллах остатки среды. Восстановлением во включениях первичной температуры, осуществлявшимся с помощью специальной термокамеры, приспособленной к микроскопу, удавалось выяснять агрегатное состояние среды, в которой протекало минералообразование. Наблюдения, проведенные на многих месторождениях, автор пытался сочетать с экспериментами, которые следует еще расширять и совершенствовать.

Значение включений для рудогенетических вопросов впервые было правильно оценено нашим великим ученым А. П. Карпинским (47) и предлагающиеся к обсуждению исследования являются конкретным развитием его идеи. В данной работе рассматривается только первая часть большой проблемы рудогенезиса, связанная главным образом с выяснением агрегатного состояния минералообразующей среды и частично с ее температурами.

1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕОРИИ РУДООБРАЗОВАНИЯ

В основных определениях способов образования месторождений большинство геологов и минералогов допускает, что пегматиты — это минеральные образования, возникшие из остаточного расплава, насыщенного летучими, что пневматолитовые месторождения образовались из газообразной среды, а гидротермальные месторождения — из горячих водных растворов. Однако в конкретном приложении этих понятий к минеральным месторождениям четкость их, из-за отсутствия объективных критериев, почти полностью утрачивается. Например, Розенбуш¹, даже типичные пегматиты «письменные граниты» считает образовавшимися из флюидов, а Ферсман, наоборот, признает участие магматического расплава в минералообразовании на широком диапазоне температур и расстояний от активного очага. Такое расширенное понятие, после известной классической монографии «Пегматиты» (108), получило весьма большое признание.

Недавно А. Н. Заварицким (41, 43) был поставлен вопрос о метаморфическом процессе образования пегматитов. Он считает, что пегматиты в таком расширенном понятии являются главным образом, метаморфогенными жилами, а не производными остаточного расплава. При помощи физико-химического анализа он подчеркнул роль газового насыщенного остатка в «пегматитовом» минералообразовании и в преобразованиях более ранних минералов и пород.

Важным для понимания развития внемагматического минералообразования² является так же признание многими нашими геологами наличия скачка, резкого разрыва между собственно магматическим этапом и последующим этапом. Однако вопрос, где проводить эту границу в конкретных минеральных образованиях, окончательно еще не решен. Уже отмеченное представление Розенбуша о письменных гранитах и мнения некоторых ученых, ставящих под сомнение образование аплитов из расплава, ограничивают собственно магматические образования пределами самих интрузий. В этой трактовке признается, что вмещающие породы и образовавшаяся первоначальная кора интрузива достаточно надежно предохраняют от

¹ «Все это, вместе взятое, заставляет меня отрицать при образовании пегматитов роль магматической инъекции не только как таковой, но и в качестве сопровождающего фактора» (130).

² Под названием «внемагматические» месторождения автор объединяет, в противоположность месторождениям «внутримагматическим», минеральные образования, по времени и генетически связанные с длительной жизнью магматического очага, но возникшие за его пределами.

проникновения отдельных порций расплавов за пределы магматического очага.

Учитывая большие, периодически возникающие внутренние давления магматического очага, превышающие внешнее давление, сжатие коры интрузивов при охлаждении с неизбежным образованием в ней трещин и сопутствующие магматизму тектонические движения, — такую непроницаемость допустить очень трудно. Отрицание аплитов и пьсьменных гранитов, как образований из сильно насыщенного газами расплава, привело бы нас в конечном итоге также и к отрицанию или ограничению кристаллизационной дифференциации и ряда других проявлений в жизни магматических очагов, связанных с образованием внутриматических месторождений. Закономерное развитие магматических очагов во времени, как и всякое развитие, не мыслимо без изменений качественного состава магмы и ее минеральных продуктов. Это с предельной ясностью выявляется в ряде работ советских петрографов. Исследования по образованию внутриматических месторождений таких русских ученых, как В. А. Крат, А. Н. Заварицкий, А. Г. Бетехтин, П. М. Татаринков, Г. А. Соколов и др. явились крупнейшим вкладом в теорию рудообразования¹.

Это, пожалуй, единственная группа месторождений, происхождение и классификация которых разработаны у нас столь детально, что не вызывают сомнений. Однако за границей даже в этой группе месторождений, и в частности таких его представителей, как Сёдбери, не разобрались еще до настоящего времени.

Несмотря на то, что в разгадке природы пегматитов «многие видят ключ к решению основных вопросов рудообразования» (92, стр. 90), ни у нас, ни за границей нет еще однозначного решения этой проблемы, поскольку для этого не было выявлено объективных природных критериев.

Некоторые иностранные исследователи вообще стали считать пегматиты образовавшимися только из водных растворов, т. е. гидротермальными жилами, другие — из своеобразных жидких, остаточных силикатных растворов или же склонялись к позиции их чисто метасоматического образования. Естественно, что пока мы не получим возможности однозначно решать вопрос о том, образовались ли жильные минералы из магматического расплава, или из газо-флюида², или из раствора, — мы не можем установить, где кончается пегматит и начинается рудная пневматолитическая жила.

Так же, как и в вопросе о внутриматических месторождениях, в отношении пневматолитических месторождений наши советские ученые шли, несомненно, впереди американской школы рудных геологов. Прежде всего это сказалось в классификации эндогенных месторождений, из которой Линдгреном и др. уже давно была исключена группа пневматолитовых месторождений (125, 129).

В наиболее распространенной среди наших геологов классифи-

¹ Термин «рудообразование» предлагается как синоним «учения о рудных полезных ископаемых».

² «Газо-флюид» примечается нами как объединяющий термин для изменяющейся среды пневматолитового минералообразования.

кации В. А. Обручева (72, 73) эта группа, отвечающая важному этапу развития магматических дериватов, занимает почетное место. Однако в последнее время несколько наших выдающихся геологов начали склоняться к ее объединению с гидротермальными месторождениями (105), «учитывая полное еще отсутствие в нашем распоряжении надежных критериев для различения продуктов, отложенных из газовых и жидких растворов» (88, стр. 157). Действительно, хотя сколько-нибудь надежные критерии пневматолита еще нам не известны, эксперименты таких советских ученых, как Н. И. Хитаров, Л. А. Иванов (110, 111, 112, 113) и Ф. В. Сыромятников (101), уже доказали несостоятельность отрицания существенного переноса и отложения веществ в газовом надкритическом растворе. Это же доказывают и наблюдения Д. С. Белякина (3) над газовым переносом при технологических процессах.

На основании построения диаграмм равновесия бинарных систем В. А. Николаев (67, 68) пришел к выводу о большом значении надкритических флюидных растворов, существующих в большом интервале температур и давлений выше критического значения этих величин и о наличии резкого разрыва, скачка в переходе от магматического расплава к газообразному остатку.

Эти работы и работы А. Н. Заварицкого (41) приводят к отказу от ряда представлений и диаграмм Фохта-Ниггли и опровергают утверждения таких американских геологов, как Грейтон и Линдгрэн. Однако нужно сознаться, что подобные эксперименты, наблюдения и теоретические выводы все же без объективных природных критериев не могут еще доказать критических явлений в самой природе. Справедливо указывается на то, что геологические наблюдения также не дают никаких критериев, которые позволяли бы отличать пневматолитовый этап от гидротермального. К тому же, например, минералы, считающиеся пневматолитическими, имеют широкое развитие в пегматитовых и даже гидротермальных жилах. Следовательно, они в равной степени могли образоваться или из расплава, насыщенного газами, или же из водного раствора. При таком положении тем более совершенно неясным выглядит само существование и границы промежуточного «пневматогидатогенного» минералообразования.

В сфере действия относительно низкотемпературных-гидротермальных процессов положение несколько лучше, но и там мы часто сталкиваемся со многими неясностями и отсутствием объективности. Примером этого является определение гипо-, мезо-, эпите-рмальных месторождений по типоморфным минералам, которые сами нуждаются в расшифровке своего истинного происхождения, может быть только за исключением некоторых, действительно низкотемпературных, минералов, как антимонит, киноварь и реальгар.

Здесь достаточно напомнить, как одно время укоренившиеся у нас «импортированные» представления об оловянных месторождениях, как месторождениях типично пневматолитовых, отрицательно повлияли на практику поисковых работ и генетические выводы. Присутствие касситерита в рудах считалось достаточным для до-

казательства пневматолитического происхождения месторождений. Однако открытие С. С. Смирновым сульфидно-касситеритовых месторождений привело к тому, что и этот минерал перестал быть показателем генезиса месторождений (89).

Некоторые распространенные сульфиды встречаются и на раннем этапе пегматитового минералообразования и в скарновых и гидротермальных месторождениях. Таким образом, не оказалось гарантий, что они не могли образоваться из газообразной среды или даже из магматического расплава. Наконец, и в низкотемпературной зоне гидротермального минералообразования, как это можно видеть на многих примерах (Закавказье и др.), иногда по условиям залегания оказывается невозможным решить, какое происхождение — гидротермальное или гипергенное имеют такие минералы, как кальцит, гипс и другие. Здесь оказываются неясными нижняя температурная граница гидротермального минералообразования и источник растворов.

Американские геологи, например, К. Хьюлин (126), в последних работах (1947) считают, что гидротермальные растворы характеризуются температурами ниже критической точки воды (374°C), но выше точки кипения ее на поверхности (100°C). Верхнюю температурную границу гидротермальной стадии Г. Смит (133) считает приблизительно равной 290°C. Мы не можем согласиться с такими температурными границами действия гидротерм. Ничто не мешает растворам существовать при более высоких температурах в жидком виде при наличии концентраций различных компонентов, значительно повышающих критическую точку. В верхней зоне земной коры точка их кипения также не совпадает с температурой в 100°C ввиду их большей или меньшей насыщенности растворенными веществами. Теоретически ничто не мешает допускать существование жидких теплых гидротермальных растворов, участвующих в образовании месторождений, при температурах, значительно ниже 100°C. Температурные и глубинные границы гидротермальной деятельности значительно расширяются и в том, и другом направлении. Кроме того, эти границы вообще не являются стабильными. Гидротермальное минералообразование нередко накладывается на продукты минералообразования пневматолитического процесса, более низкотемпературные гидротермальные новообразования часто совмещаются с более ранними продуктами высокотемпературных гидротерм.

Предложенное Линдгреном и расширенное другими американскими геологами дробное подразделение гидротермальных месторождений на гипо-, мезо-, лепто-, эли- и телетермальные образования (125) оказалось широко привившимся и среди наших геологов.

Такое подразделение подвергалось справедливой критике, главным образом потому, что Линдгрэн, Грейтон и другие пытались учитывать под этими названиями не только температурный фактор, но и частично фактор глубинности, что в таком сочетании понятий является неудачным. Предлагалось поэтому сохранить эти названия только для обозначения температурных условий обра-

зования. Но если учесть ранее сказанное, от этого дело не улучшится. Наши термометрические исследования минералов показывают, что образование большинства гидротермальных месторождений, а иногда даже отдельных кристаллов, происходило при значительном падении температур материнских растворов, например от мезо- до эпитермальных. Образование месторождений во времени сопровождалось значительными прерывисто-непрерывными изменениями минералообразующей среды.

Все сказанное не означает, что мы при определении генезиса месторождений должны игнорировать или уменьшать значение температурного фактора. Последний в процессах гидротермального минералообразования безусловно играет ведущую роль. Однако температуры следует определять для отдельных минералов, образующихся в значительно более узком температурном диапазоне, чем то или иное месторождение. По этим минералам, фиксирующим определенные моменты гидротермального минералообразования, можно решать вопрос об общем интервале температурных изменений растворов во время образования того или иного месторождения или его отдельных минеральных генераций.

Чтобы сохранить известную преемственность со старыми схемами, можно пока принимать, что гидротермальные минералы и месторождения, образовавшиеся, например, в интервале температур от 50 до 200°C, считать низкотемпературными, в интервале от 200° до 300°C — среднетемпературными, а от 300 до 450—500°C — высокотемпературными. Однако, несмотря на то, что вся генетическая классификация гидротермальных месторождений по существу была многоэтажной постройкой по температуре, в познании температур природных процессов мы пока имеем очень малые успехи. Диагностика гидротермальных месторождений обычно базируется на том, встречается ли на месторождении определенный минерал или комплекс минералов, которым приписывается тот или другой температурный интервал и способ образования. Фактически же многие минералы (пример с касситеритом приведен выше), считающиеся характерными для определенного типа месторождений, при более точных методах исследования их образования, оказываются, могут возникать в широком температурном диапазоне и кристаллизоваться из среды различного состояния. Широко известен ряд так называемых «проходящих» минералов, которые не могут являться характерными для определенного генетического типа месторождений. В то же время и без того ограниченный круг минералов — «геологических термометров», образующихся по представлениям минералогов в узких температурных рамках, с получением новых данных все более и более сокращается. Эти минералы и их парагенезис, так или иначе, пока, и только условно, несли ответственную службу при выяснении генезиса и в частности температур образования месторождений, несмотря на все несовершенство такого способа познания неизвестного по слабо известному.

В минералогии и при поисках месторождений очень сложно обстоит вопрос с определением происхождения минералов, если они попали в руки исследователя не из коренного месторождения с

определенным парагенезисом минералов, а должны быть изучены в шлихах или как компоненты осадочных пород.

Объективное, правильное выяснение генезиса минералов в этом случае имеет не только большое практическое значение, но и важно в теоретическом отношении, например, при реконструкции палеогеологических и палеогеографических (палеогеоморфологических) условий и в ряде разделов петрографии осадочных пород.

Как же на фоне сказанного, при отсутствии достаточной объективности в важнейших наших суждениях, может дальше развиваться теория рудообразования и сопредельные с нею геологические науки? Если сопоставить указанную выше неопределенность в наших основных понятиях с теми большими практическими и теоретическими достижениями, которые имеются у советских геологов и минералогов, с тем огромным запасом наблюдаемых фактов, тщательных минералогических описаний и анализов, глубоких теоретических построений, прогнозов и выводов, — становится очевидным, что при использовании объективных критериев, отказавшись от традиционных не доказуемых представлений, советские геологи быстро создадут свою новую теорию рудообразования, а минералоги — высшую минералогию (15).

Где же те достаточно объективные данные, на которые можно опереться для скачка вперед в познании минеральных месторождений и которые до сих пор почти не использовались ни у нас, ни за границей? Естественно, что эти данные мы не можем получить исследованием только минералов как таковых, которые сами нуждаются в установлении своего происхождения. Мы должны, наконец, притти к выводу о том, что одни только, даже самые тонкие и, конечно, необходимые исследования геологической обстановки минералообразования и разнообразные, весьма совершенные исследования самих минералов пока не дали и не дадут исчерпывающего ответа о способе образования большинства внемагматических месторождений. Мы должны использовать для этого также и реликты материнской среды, сохраненные нам природой внутри минералов в виде разнообразных включений. Еще в 1944 г. автор пришел к выводу, что эти включения являются хорошими природными критериями в установлении генезиса минералов (32, стр. 123), однако, чтобы выступить с настоящей статьей, потребовались годы дополнительной работы над включениями в минералах.

2. ЭТАПЫ МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЯ И ТИПЫ ВКЛЮЧЕНИЙ В МИНЕРАЛАХ

Включения маточной среды в минералах до последнего времени почти выпадали из поля зрения исследователей. Между тем, еще на заре развития этой области знания, целый ряд наших отечественных и иностранных ученых — Карпинский (47), Сорби (151), Соколов (99), Брюстер (124) и другие отмечали их значение и пытались использовать их для науки. Но, к сожалению, только теперь становится несомненным, что именно эти захваченные остатки минералообразующей среды с наибольшей объектив-

ностью и полнотой указывают на происхождение минералов и позволяют установить важнейшие факторы минералообразования.

Состав и состояние среды минералообразования (ее химизм, температура, условия давления) оказывали влияние на состав и форму минералов, на их парагенезис и количество, на их изменения и перегруппировки в том или ином месторождении, на все многообразие минеральных видов, определявшееся различиями во внешних условиях их образования и существования, обусловленных изменяющейся средой. Д. П. Григорьев (32) подчеркивает, что некоторые минеральные виды образуются и существуют только в определенных пределах температуры, а при изменении последней за эти пределы исчезают. В качестве примеров таких минералов он указывает на «кварц¹ и халькоборнит, в былом существовании которых в том или ином месторождении нельзя сомневаться, но которых никто никогда не видел в условиях поверхности земли.

В нормальном развитии природных процессов магматического минералообразования по включениям маточной среды в минералах можно различать три этапа, разделенные двумя скачками резких переходов минералообразующей среды из одного состояния в другое. Первый — магматический этап, в течение которого силикатный расплав в верхней части магматической камеры периодически изменяется до кремнеземистого «остаточного» расплава, обогащенного летучими; второй — газо-флюидный этап, в котором среда пневматолитического минералообразования изменяется в направлении от почти «сухих» газов до газов, в очень большой степени насыщенных парами воды; третий — гидротермальный этап, в котором среда минералообразования становится безусловно жидкой и переходит в своем развитии от состояния слабо насыщенных растворов до водного рассола («гидротермальная рапа») и далее до слабо насыщенных теплых и даже холодных гидротермальных растворов.

Пегматиты, в отличие, например, от рудных жил, наиболее полно отражают ход развития процесса внемагматического минералообразования с участием газовой и водной среды, в то время как рудные жилы чаще принадлежат лишь к одному из его этапов. Собственно пегматиты, в первоначальном значении этого слова письменные граниты, характеризуют также только один этап, точнее самые поздние стадии минералообразования из обогащенного летучими расплава, иногда повторяющиеся во времени ввиду периодических вскрытий магматического очага. Пегматиты в широком смысле слова — это полигенные жилы, совмещающие два или три этапа минералообразования, разделенные скачками переходов среды из одного состояния в другое (расплав — газ — водный раствор). Два последних этапа пегматитообразования характеризуются развитием рудных и нерудных минералов, которые выделяются из газообразной или жидкой водной среды, вне

¹ Здесь и ниже под α-кварцем подразумевается высокотемпературный пирогенный кварц, а под β-кварцем — шевматолитический и гидротермальный, а также кварц «альпийских» жил.

зависимости от того, совмещаются ли они по месту своего образования с письменными гранитами или пространственно оторваны от них. Такие пегматиты по происхождению близки к обычным рудным жилам, так как они, кроме наличия характерных рудных минералов, образованы на позднейших этапах деятельности магматических производных из среды других состояний и в значительной степени являются также метаморфогенными (43).

Относительно быстрые, скачкообразные, превращения минералообразующей среды (см. следующие главы) самым решительным образом сказываются на качественных и количественных изменениях продуктов ее отложения, т. е. минералов. Это особенно четко прослеживается на кварце, наиболее распространенном минерале на границе первого скачка. В этой точке перехода среды из остаточного расплава в газовый раствор (620—574°C), вещественно ярко выраженной в переходе магматического α -кварца в β -кварц — качественно различных модификаций — объем кристаллического вещества кварца сокращается на 0,86%.

Эти превращения указывались А. Е. Ферсманом (107, 108), но, судя по включениям в минералах, обогащенный газами остаточный расплав участвует во внемагматическом минералообразовании только в нижней части проводящих путей, вблизи активной магматической камеры. Выше, на путях продвижения магматических производных, минералообразование происходит в газовой среде и еще выше из водных растворов. Расплавы, газовый раствор и водный раствор в равной степени и одновременно не участвуют в минералообразовании одного среза пегматитовой жилы, а сменяют друг друга во времени и пространстве.

В эволюционном развитии второго пневматолитического этапа минералообразования происходят уже относительно плавные качественные и количественные изменения, вещественно и наиболее заметно выражающиеся в изменениях минеральных сообществ, а также в сменах кристаллической формы и окраски тех или иных отдельных минералов. Характерным для этого этапа развития процесса минерогенеза является свободная, часто совместная и одновременная кристаллизация различных минералов, которые часто образуют друг с другом индукционные грани. Характерными являются также крупные размеры самих кристаллов, образующихся в среде, наиболее легко и равномерно поставляющей к граням их роста «строительный материал».

Резкий переход среды из газообразного состояния в жидкое сопровождается исчезновением ряда минералов и выдвиганием на передний план новых минеральных типов, таких, например, как сульфиды, ранее проявлявшиеся в зачаточном состоянии и стоявшие в антагонизме с другими минеральными сообществами предыдущих этапов минералообразования.

История превращений среды и связанное с ней развитие минералообразования может объективно расшифровываться в природе. В советской науке должна быть, наконец, отвергнута запутанная и усложненная американскими геологами классификация минеральных месторождений, совсем не учитывающая пневматолитическо-

го минералообразования. Наша, отечественная, классификация месторождений (9, 87) нуждается в уточнениях, которые будут сделаны на основе практики исследования включений в минералах и столь прогрессирующего у нас всестороннего изучения самих минеральных месторождений. Что можно было кратко сказать, не используя данных по включениям среды, уже отмечено в первой главе работы.

Абсолютно однородные идеальные кристаллы в природе представляют собою большую редкость. Одним из важнейших нарушений неоднородности кристаллов являются включения обломков минералов и пород, минералов-спутников или же чаще реликтов той среды, в которой происходило минералообразование. Под включением вообще следует понимать всякий участок (по разным причинам, освещаемым ниже), изолированный в теле минерала в процессе роста последнего и имеющий с ним фазовую границу. Наиболее обычным случаем являются включения минералообразующей среды. В зависимости от ее состава и состояния, существующих условий температуры и давления, значительно изменившихся на поверхности земли, мы во включениях среды наблюдаем обычно не исходные гомогенные, а гетерогенные системы с тем или иным количеством «внутренних» фазовых границ. В подавляющем большинстве случаев (исключения приводятся в 7-й главе работы) решетка вмещающих включения кристаллов является практически непроницаемой, почему оказалось возможным, восстанавливая один из факторов, контролирующих условия минералообразования — температуру, получить методом гомогенизации определенные минимальные ее значения и, что еще важнее, ясные суждения об агрегатном состоянии минералообразующей среды.

Включения минералообразующей среды в минералах оказались в условиях поверхности земли очень разнообразными. Поэтому стало необходимым разработать их естественную классификацию и номенклатуру. В первом варианте она была уже опубликована (35). Эта наша классификация, построенная по составу и состоянию включений, вероятно, еще не отражает всего разнообразия включений. Она представлена нами в развернутом виде на схеме I, где пока не учитываются, например, сложные включения не смешивающихся жидкостей. Генетическая классификация включений приводится ниже, в 5-й главе работы, в связи с рассмотрением механизма образования включений.

На схеме I нами выделяются четыре неравнозначных группы включений: твердые, затвердевшие, газовые и жидкие.

Первая группа включений не представляет собою реликтов материнской среды, а характеризует захваченные кристаллом посторонние минералы — «спутники», осевшие из раствора на былые грани роста минерала-хозяина или закрепившиеся и некоторое время, до полной консервации, росшие на них. Эти включения минералов, в отличие от трех остальных групп, сохраняют свою индивидуальную, внутреннюю, структуру и форму, полученную ими или

ранее или одновременно с вмещающим минералом-хозяином. Механически захваченные обломки кристаллов и пород представляют для наших целей малый интерес.¹

Характерным для трех остальных групп включений, наиболее интересующих нас, является строгая подчиненность их формы и закономерное распределение в пространстве относительно решетки включающего минерала-хозяина. Абсолютная подчиненность формы подобных включений говорит нам о том, что вещество включений находилось ранее или находится сейчас в жидком или в газообразном состоянии, в то время как минерал-хозяин в момент пленения включений кристаллизовался как твердое вещество.

В группе твердых включений, характеризующей собою минералы-спутники, можно, таким образом, различать два главнейших типа: 1) обломочные и 2) включения ограненных кристаллов, весьма разнообразные по величине, форме и составу. В трех группах затвердевших, газовых и жидких включений 3—8-й типы этих включений характеризуют разнообразие магматических дериватов в ходе их изменения от состояния расплава до состояния охлажденных растворов. Среди этих типов включений материнской среды, ныне наблюдающихся в резко отличных физико-химических условиях поверхности, мы различаем во второй группе: 3) раскристаллизованные включения, 4) включения стекла (аморфные включения), 5) «письменные» включения — ихтиоглипты; в третьей группе различаются: 6) пневматолитические или собственно газовые включения и 7) включения «газоводные». В четвертой группе жидких включений выделяются: 8) включения водных растворов, 9) включения углекислоты (иногда совместно с раствором) и 10) включения горючих веществ, которые имеют большое познавательное значение (35), выходящее, однако, за рамки задач настоящей работы.

Возможности более дробного подразделения на виды указанных типов включений намечены в нашей схеме I только для 4-го и 8-го их типов. Несомненно, что в будущем, при выяснении процессов минералообразования, потребуется большая дифференциация и других типов. В частности, уже в этой статье оказалось необходимым среди «письменных» включений — ихтиоглиптов различать «пассивные» и «активные» (см. ниже).

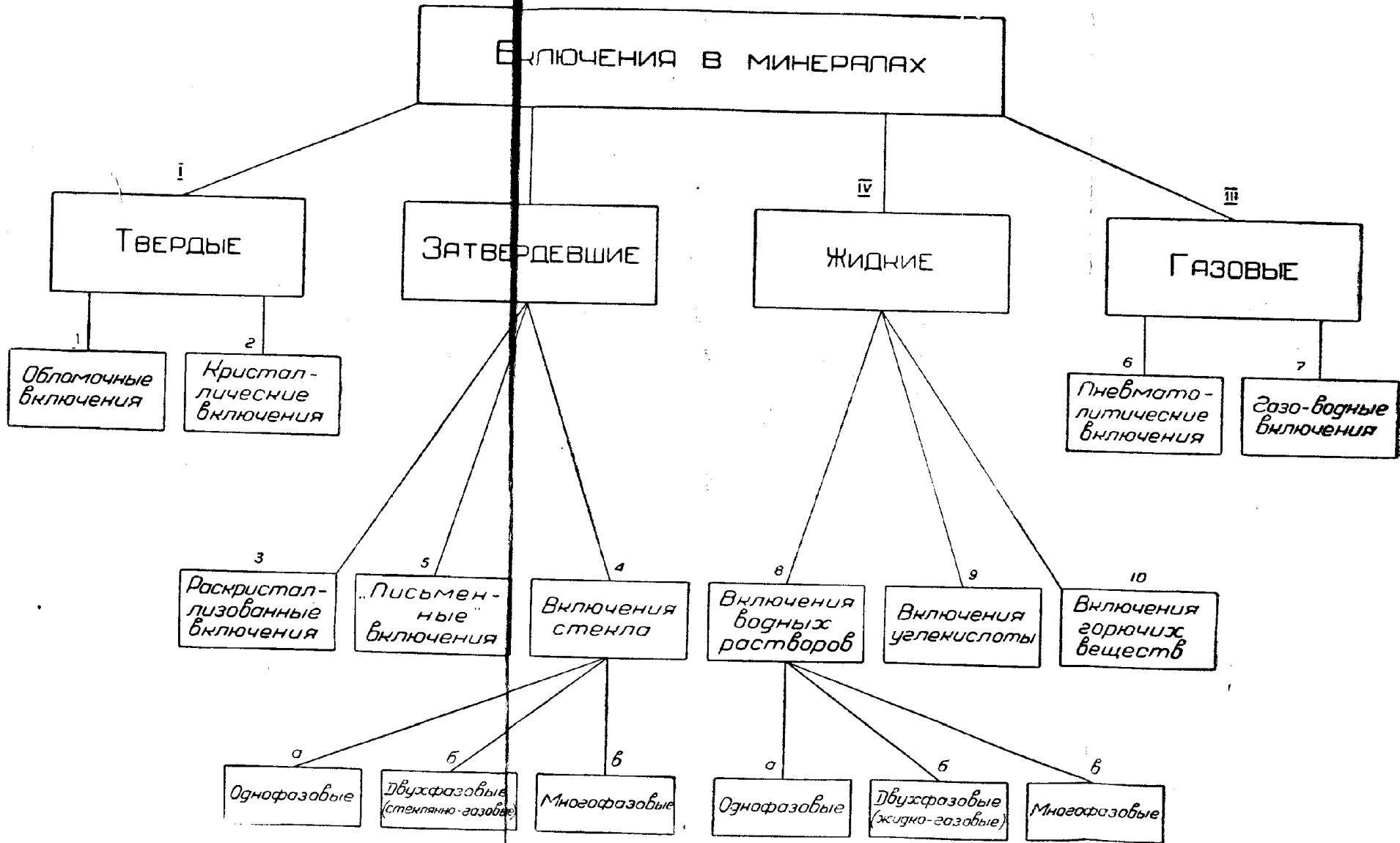
По времени своего образования по отношению к вмещающему кристаллу включения могут быть первичными, вторичными и первично-вторичными, что кратко рассматривается нами в пятой главе работы и частично освещалось ранее (35).

Как было установлено изучением множества разнообразных по происхождению минералов и опытами по искусственному их получению, подавляющее большинство природных кристаллов в процессе своего образования захватывают и консервируют мелкие частицы среды, в которой происходило их образование.

¹ Подобные включения важны лишь для выяснения положения растущего кристалла по отношению к направлению силы тяжести.

КЛАССИФИКАЦИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ ПО ИХ СОСТАВУ И СОСТОЯНИЮ

Составил Н.П. Ермаков
1948 г.



В минералах шлаков уже давно были замечены мелкие затвердевшие включения, отвечающие по составу искусственному расплаву, в котором они образовались. При получении из растворов сегенетовой соли, квасцов и других веществ, каждый может легко убедиться в том, что искусственные кристаллы при быстром росте захватывают внутри себя то или иное количество включений маточной жидкости.

Поры, наблюдающиеся внутри кристаллов, образованных в газовой среде, будут заполнены газом.

Разнообразные первичные и первично-вторичные включения в естественных минералах точно также характеризуют состояние среды, в которой происходило кристаллообразование. Тем самым они объективно выдают истинное происхождение минералов, их заключающих, являясь надежными показателями агрегатного состояния минералообразующей среды.

Таким образом, три последних группы включений нашей классификации, систематизирующей данные наблюдений в природных минералах, отражают три состояния минералообразующей среды: расплав, газ и водный раствор. Выделенные в ней типы включений, от 3-го до 8-го, дают возможность далее углубить наши знания в отношении условий возникновения и дальнейшего существования минералов, а также подметить изменения самой среды. В этом нам особенно помогают вторичные включения, возникающие в результате залечивания трещинок в уже существующих минералах на последующей стадии развития среды и совмещения на месторождении различных этапов минералообразования¹. Например, в топазах Украины и Забайкалья удается в крупных кристаллах четко установить газовые включения обоих типов и включения вторичные — водных растворов, залечивающих трещинки в кристаллах уже в гидротермальном этапе минералообразования.

Выделенный в нашей схеме I вид первичных включений «б» с помощью экспериментов позволяет дать числовые характеристики температурному состоянию среды (32), а вид «в» дает возможность приблизительно определять состав и даже концентрацию компонентов в минералообразующем растворе. Однако этим вопросом, очень важным для углубленного понимания условий и процессов образования месторождений, мы не можем уделить места в данной статье. Во всяком случае, типы включений — первично-вторичные и вторичные, возникающие в минералах пневматолитического или гидротермального этапов, позволяют улавливать ход изменений минералообразующей среды в пределах каждого этапа. По включениям в кристаллах, образовавшихся на ранней стадии этапа, иногда можно прочесть историю развития минералообразования в последующих стадиях процесса.

Как удалось установить на примере «проходящих» минералов из флюоритовых и других месторождений Забайкалья, стадии образования кристаллов каждой последующей генерации фиксиру-

¹ Описание подобных включений см. в 5-й главе.

ются вторичными включениями в соответствующих минералах предшествовавших генераций. Например, данные о температуре растворов, полученные по вторичным включениям в ранних минералах, у нас совпадали с данными о температуре по первичным включениям в минералах следующих генераций. Точно также вторичные включения в минералах вмещающих пород, возникшие в определенную стадию их гидротермального метаморфизма, по температурам гомогенизации отвечают или первичным включениям в новообразованиях этой стадии, или вторичным включениям в минералах последующей стадии образования месторождения.

Таким образом, можно объективно установить по наличию включений соответствующих групп состояние среды, а по типам и видам включений ее изменения. Отечественная классификация В. А. Обручева (73) для магматических месторождений, обоснованная А. Н. Заварицким (37, 38), в общем виде хорошо отражает естественный процесс развития минералообразования. Из нее следует исключить только заимствованное у американской школы излишне дробное и необоснованное подразделение гидротермальных месторождений на гипсо-, мезо-, лепто-, эпи- и телетермальные месторождения ввиду частых совмещений разнотемпературных минералов в пределах одного и того же гидротермального месторождения. Эти месторождения в температурном отношении обычно являются «полигенными».

В дальнейшем мы рассмотрим критерии познания генезиса минералов для трех естественных этапов минералообразования: магматического, пневматолитического (газо-флюидного) и гидротермального.

Для внутриматрических минералов интрузий и излившихся пород надобность в генетической диагностике возникает только при их изучении в обломках осадочных отложений.

В седьмой главе приводятся критерии и для определения минералов из холодных водных растворов, имеющих температуру ниже 50°C. Эти минералы в рассматриваемом закономерном ходе изменений магматических производных являются их последними продуктами.

Твердые включения первой группы рассматриваются ниже очень кратко, так как они не имеют прямого отношения к теме нашей статьи. Их описание здесь оказалось необходимым лишь потому, что один из способов образования твердых включений является, как увидим ниже, сходным с образованием вида «активных» письменных включений. Твердые включения как бы создают контраст и способствуют уяснению образования затвердевших включений — свидетелей состояния среды минералообразования в виде расплава. Естественная граница между пирогенным и пневматолитическим минералообразованием в пегматитовых жилах очень четко устанавливается по кварцу между ограниченными кристаллами пневматолитического β -кварца и их «жорнями», представленными в виде ихтиоглиптов.

В результате дальнейшего исследования включений минерало-

образующей среды в минералах по типам гомогенизации (см. ниже) «вещественная» граница между пневматолитическим и гидротермальным минералообразованием, намеченная нами в схеме II (см. стр. 56—57, графы 9, 10 и 11), станет несомненно более четкой и легко различаемой в полевых условиях.

3. ТВЕРДЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ В МИНЕРАЛАХ И ИХ ГЕНЕТИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ

Как уже отмечалось, в период кристаллизации и позднейшей регенерации естественные и искусственные минералы захватывают и сохраняют внутри себя частицы той среды, в которой происходило их образование или залечивание. Иногда же они одновременно поглощают и другие, уже имеющиеся в этой среде, твердые вещества или вещества, кристаллизующиеся одновременно с ними. Твердые включения дают, таким образом, возможности для суждения о минералах «предшественниках» или не сохранившихся вне кристалла-хозяина минералах-«спутниках», что является важным для выяснения парагенезиса минералов на том или ином месторождении. Твердые обломочные включения кусочков минералов и пород, попадали на бывшие грани при их осыпании под влиянием силы тяжести-«присыпки» (26) или же были механически захвачены кристаллом-хозяином, как это имеет место при образовании кристаллов кальцита «фонтенблоских песчаников» (35).

С другой стороны, на поверхности граней растущих кристаллов, обращенных кверху, оседают находящиеся в растворе во взвешенном состоянии и возникшие ранее или одновременно с кристаллом-хозяином минералы-«спутники», такие как слюда, хлорит, гематит и др. Иногда подобные минералы, в частности наблюдавший автором пирит в кварцевых кристаллах из месторождения Барнавадж, пирит и халькопирит в флюорите Казнока, некоторое время продолжали свой рост после посадки на грань и только потом были законсервированы кристаллом-хозяином¹. Подобные включения выявляют таким образом зонарное строение кристаллов и парагенезис минералов. Очень наглядные случаи взаимоотношений минералов были уже прекрасно описаны и изображены Д. П. Григорьевым (26, рис. 7-а) на примере кристаллов кварца и анатаза из жил Приполярного Урала и Г. Г. Грушкиным для кварца и пирита месторождения Аурахмат (28, рис. 13). В этих случаях внутреннее расположение твердых кристаллических включений находится в закономерных отношениях как к самой форме, так и к процессу роста кристалла-хозяина. Случаи образования ранее образовавшегося минерала, например, рутила, кристаллом, возникшим позднее, могут быть проиллюстрированы на примере с горным хрусталем-«волосатиком». Явления поглощения твердых мелких кристаллов наблюдаются и в минералах, образовавшихся из расплавов. Например, акцессорные минералы магматических пород часто захватываются более крупными по размеру

¹ Такое явление закономерного нарастания кристаллов на другом минерале известно в литературе под названием эпитакиии.

кристаллами. Включения кристаллов в кристаллах, в виде мельчайших кристаллических зернышек, иголочек, пластинок, тончайшей «пыли», иногда настолько многочисленны, что влияют на окраску, обуславливают переливание цветов и вызывают различные другие оптические особенности минерала-хозяина. Определять такие включенные минералы бывает очень трудно, но иногда оказывается все же возможным. В лейцитах лав, например, уже давно известны кристаллические включения зеленых авгитов, бурых гранатов, бесцветных нефелинов, черного магнитного железняка и т. д. Располагаются они чаще всего параллельно бывшим граням роста кристалла-хозяина, выявляя его зонарное строение, или же образуются в направлениях его кристаллографических осей. Иногда в виде включений наблюдаются реликты замещенного минерала или, наоборот, вторичные включения начальной стадии замещения («костровки наступления») и т. д.

Во всех этих случаях ясно, что минералы захватывают не частицы кристаллизационной среды, а твердые частицы того, что уже в ней было или возникало одновременно с изучаемым кристаллом. Таким образом, здесь мы имеем относительно ограниченные возможности для суждения о генезисе включающего минерала, так как сами включенные минералы естественно нуждаются в расшифровке условий их происхождения. Не умаляя значения твердых включений в минералах, например, для морфологических исследований кристаллов, выяснения парагенетических соотношений, выявления эволюции кристаллографической формы минерала-хозяина, мы все же, в данной работе, должны будем твердые включения (минералы-«спутники» и «предшественники») отнести на задний план. Заметим лишь, что самым характерным признаком для группы первичных твердых включений является сохранение ими кристаллической формы вещества, их образующего.

4. МАГМАТИЧЕСКИЙ ЭТАП МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЯ И ЗАТВЕРДЕВШИЕ ВКЛЮЧЕНИЯ

Включения в минералах внутриматричного этапа минералообразования должны в будущем явиться важным объектом исследований советских петрографов.

Д. С. Белянкин, оценивая значение химических анализов магматических горных пород, справедливо считает, что они дают нам только «обескровленный» состав магмы, а истинный ее состав остается в точности неизвестным (4). Теоретически можно предвидеть, что только состав включений силикатного расплава, надежно законсервированных в минералах, может дать нам ответ о составе магмы, более близкий к действительному, чем анализы самих пород, особенно излившихся, быстро потерявших свои летучие компоненты.

Более того, некоторые виды включений («б» и «в» нашей схемы I, тип 4) во вкрапленниках минералов с помощью экспериментов

по их гомогенизации возможно дадут ответ и относительно минимальных температур магматического расплава.

В группе затвердевших включений пока можно выделять три типа, являющиеся показателями условий образования вмещающих минералов: 1) раскристаллизованные включения, 2) включения вулканического стекла и 3) «письменные» включения. Сопоставление первых двух типов включений не отражает собою естественной эволюции магмы, а указывает только на резко различные условия ее затвердения. Между ними существуют переходы, связанные с тем, что как минералы интрузивных пород, так и вкрапленники эффузивных пород образуются иногда в близких условиях. В большинстве случаев минералы-вкрапленники этих пород кристаллизуются на глубине, по пути продвижения магмы к поверхности. Поэтому включения стекла иногда оказываются в значительной степени раскристаллизованными. Что касается «письменных» включений в гранитах с графической структурой, то они несут в себе и показатели жидкого состояния расплава, из которого кристаллизовались полевой шпат и «активные» ихтиоглипты и содержат внутри себя включения газов, обогативших этот остаточный расплав.

1) Раскристаллизованные включения¹

Еще на заре развития минералогии и петрографии Сорби (152) подметил наличие подобных включений во вкрапленниках некоторых эффузивных пород и, главным образом, в порфирированных гранитах. Следует отметить, что в последнем случае эти трудноуловимые раскристаллизованные включения, имеющие очень малые размеры, обычно не замечаются или при описании шлифов обходятся молчаливым. Среди работ современных петрографов мы обнаружили только одну статью, где такие включения были описаны. Мы имеем в виду работу А. П. Лебедева «О кварцево-кальцитовых включениях в лабрадоритах из Головина» (63). Эти крупнокристаллические лабрадориты, развитые в юго-восточной части Вольнского анортозитового массива, почти в каждом куске породы содержат макровключения, достигающие, ввиду крупности самих кристаллов лабрадора, 1 см и более в диаметре. Внешне они представляют собою темные кварцевые участки стекловатого вида, сопровождающиеся белым кальцитом, который выдает их присутствие на общем темном фоне породы. Зерна кварца в этих включениях обычно неправильно округлые, отличаются однородностью и правильностью строения. По своему существу подобные первичные включения являются каплями жидкого магматического расплава, поэтому они имеют неправильную форму, подчиненную минералу-хозяину или отвечающую его форме (нега-

¹ Поскольку до последнего времени включениями среды систематически почти не занимались и они привлекали внимание отдельных исследователей, главным образом, из любопытства, автору пришлось создавать терминологию заново и, может быть, она не всегда удачна.

тивный кристалл)¹. Однако их затверждение, в частности кристаллизация кварца в таких включениях, не были отделены значительным промежутком времени от кристаллизации породообразующих минералов. Затверждение имело место при продолжающейся кристаллизации этих минералов и в следующий период, после затверждения плагиоклаза и всей породы (63).

В кварце обычных крупнозернистых гранитов раскристаллизованные включения не четкие и по огранке малосовершенные. В них различаются участки полевошпатового вещества. В кристаллах полевых шпатов гранитов и диоритов они выявляются еще более трудно. Их форма бывает связана с кристаллическими плоскостями минерала-хозяина. В минералогическом составе их иногда различимы кварц и темноцветные минералы. Родственное кристаллу-хозяину вещество из капли расплава, вероятно, отлагалось на стенках поры включения.

Поскольку эти, позднее раскристаллизованные, включения оказались надежно замкнутыми внутри минерала, они, повидимому сохранили в себе и содержащиеся в магме летучие. Об этом могут говорить мельчайшие призмочки шерла, иногда различающиеся среди внутренних минералов включений (131).

Раскристаллизованные включения отчетливо наблюдаются в кварце, нефелине, лейците, лабрадоре и значительно труднее их устанавливать в минералах нормальных гранитов, где они при мизерных размерах и неправильных очертаниях имеют чаще всего недостаточно четкие границы с веществом минерала-хозяина.

На рисунках 1, 2 и 3 таблицы I, заимствованных у А. П. Лебедева и Сорби, изображены представители типа раскристаллизованных включений, наблюдавшихся в лабрадоритах, в полевых шпатах гранитов и в кварцевых вкрапленниках порфи́ров.

В заключение здесь следует отметить, что в уяснении некоторых моментов образования внутримигматических месторождений, особенно в ультраосновных породах, отыскание подобных включений и включений крупных может оказаться весьма полезным для науки.

2) Включения вулканического стекла

Включения стекла уже давно были широко известны, и исследователи отмечали их во вкрапленниках излившихся пород. Например, их изображения можно видеть в известном атласе Кохена, в плагиоклазах, в липаритовых и базальтовых обсидианах (таблица VIII) в оливине и других минералах (таблица X) этого атласа (120).

Однако, справедливости ради, следует отметить, что до сих пор и на них обращалось еще очень мало внимания. Эти включения также представляют собою законсервированные частицы среды, в которой происходил рост фенокристаллов, но вследствие геологических условий (быстрое остывание породы и вмещающих кристал-

¹ В результате позднейшего преобразования породы, включения также иногда несут следы переработки и содержат внутри минеральные новообразования.

Группы и типы включений в минералах

I. Группа затвердевших включений

Раскристаллизованные

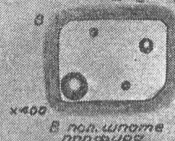


Включения стекла

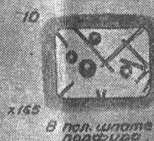
Однофазовые



Двухфазовые

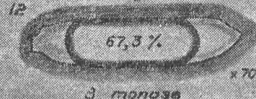


Многофазовые

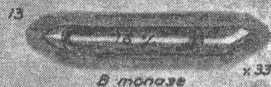


II Группа газовых включений

Само-водные



Пневматолитические



"Сухие" газы



III Группа жидких включений

Включения водных растворов

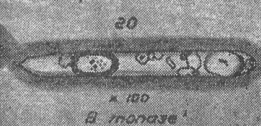
Однофазовые



Двухфазовые



Многофазовые



лов) магматический расплав в них оказался в состоянии задержанной кристаллизации и только частично или же совсем нераскристаллизованным.

Таким образом, включения стекла оказываются характерны для магматических пород быстрого затвердения. Материнская среда представлена в этих включениях более полно, нежели в основной массе породы, из которой, вследствие резкого падения температуры и давления, были удалены минерализаторы. Среди включений стекла, распределяющихся во вкрапленниках параллельно граням их роста, наблюдаются однофазовые, двухфазовые (стеклянно-газовые) и многофазовые виды включений. Однофазовые включения стекла представляют собою заполнение пор внутри вкрапленника-кристалла целиком и малоинтересны для экспериментов (рисунок 6 и 7 нашей таблицы I). Двухфазовые включения содержат один или же несколько газовых пузырьков, возникших в результате сокращения объема при застывании вещества включений (рисунки 8 и 9 таблицы I) и содержания в нем газов.

В кристаллах основного силиката закиси железа, наблюдающихся в шлаках, уже давно известны включения стекла с шаровидными газовыми пузырьками, во всем похожие на включения стекла во вкрапленниках излившихся пород.

Искусственно включения стекла были впервые получены Беккером в 1881 г. в оливине, кристаллизованном из расплава. В позднейшей литературе по искусственным минералам можно найти много указаний на образование подобных включений.

Включения стекла бывают бесцветны или же окрашены в желтый, красноватый, зеленоватый и бурый цвет. Окраска их наблюдается, главным образом, в минералах основных пород. Цвет этих включений в общем совпадает с окраской основной массы излившихся пород.

Форма включений стекла очень разнообразна и если она в миниатюре не передает формы вмещающего кристалла, то бывает каплевидной, заостренно угловатой или лоскутообразной, с клиновидными заострениями. Двухфазовые включения чаще содержат не один, а несколько или даже много неподвижных газовых пузырьков и такие включения представляются как бы ситовидными. Пузырьки имеют чаще шарообразную и реже яйцевидную и мешкообразную форму.

Ввиду большей близости показателей преломления стекла и вмещающего минерала, по сравнению с включениями жидкости и газа, краевые границы включений выглядят узкими и менее резкими. Вследствие вязкости расплава и быстроты его охлаждения газовые пузырьки часто не могли соединиться в один общий пузырек, столь характерный для жидких включений. Это удается иногда сделать искусственно, путем нагревания и расплавления такого включения с несколькими пузырьками газа, при последующем охлаждении образующими один общий пузырек. Температура подобной гомогенизации включений стекла, ввиду того, что они сохранили летучие, дает нам, повидимому, нижний предел температуры лавы,

в которой кристаллизовались вкрапленники. Это наше утверждение, конечно, еще подлежит проверке на искусственных минералах шлаков, где температура доменного расплава, из которого они образовались, известна. Такая проверка сделана для жидких включений в препаратах из пластмассы и на искусственных кристаллах.

Очень интересными являются трех- и многофазовые включения стекла, в которых оказались выросшими на стенках вмещающих их пор кристаллы-«узники» одного или нескольких минеральных веществ, бывших растворенными в расплаве стекла. Иногда такие внутренние кристаллы образовывались в вязком стеклянном расплаве включения во взвешенном состоянии. Как наблюдал еще Сорби (131), призматические зеленые кристаллы-«узники» (повидимому, пироксена) вдаются внутрь газового пузырька, указывая на свое образование до превращения расплава в стекло включения.

В изотропной массе стекла многофазовых включений, в жидком виде являвшейся растворителем для ряда веществ магматического расплава, наблюдались анизотропные кристаллики полевых шпатов с неправильными ограничениями, зеленоватые призматические кристаллики пироксенов и минералы ромбоэдрического габитуса, изображенные на рис. 11 нашей таблицы I. Заполнение пор в таких включениях представляет собою имитацию порфировой породы. Минералы-«узники» в некоторых включениях (рис. 10) выросли только на стенках поры включения. Родственное минералу-хозяину вещество, бывшее растворенным в капле стеклянного расплава, не образует самостоятельных внутренних кристаллов, а отлагается по стенкам пор включений. При гомогенизации нагреванием многофазовых включений (рисунки 10 и 11, таблицы I) уничтожается не только газовый пузырек, но и, в расплавляющемся стекле, иногда целиком растворяются твердые фазы включения. Восстановить последние в прежнем виде можно только при очень медленном охлаждении, что оказывается часто невозможным в лабораторных условиях. Разжижение включений стекла доказывалось уменьшением, передвижением и уничтожением газовых пузырьков внутри включения, а также расплавлением внутренних кристаллов в многофазовых включениях. Сконструированная нами для исследования жидких и газовых включений микротермокамера, к сожалению, не позволила пока воспроизвести полной гомогенизации стеклянных включений, а представляется вероятным, что эта температура должна быть близкой к истинной температуре расплава и, во всяком случае, к минимальной температуре кристаллизации того или иного минерала-хозяина (кварц, лейцит, санидин, нефелин, авгит).

Иногда сохранение минерализаторов внутри включения стекла сказывается в том, что они раскристаллизовываются лучше, чем основная масса излившейся породы, во вкрапленниках которой они наблюдались. Уже имеющийся, правда весьма ограниченный, опыт по исследованию включений вулканического стекла позволяет утверждать, что их наличие в минералах шлихов или осадочных пород дает ясные указания на способ образования включающих минералов из магматических расплавов в условиях быстрого охлаждения этих расплавов на поверхности земли.

3) «Письменные» включения и механизм образования ихтиоглиптов¹

Как известно, письменные граниты характеризуются своеобразными «прорастаниями» полевого шпата высокотемпературным кварцем, которые столь детально описаны А. Е. Ферсманом (108) и до сих пор большинством исследователей интерпретируются как признак одновременного эвтектического выпадения этих минералов.

В огромной литературе, посвященной пегматитам, можно найти и полное отрицание такой точки зрения. Справедливо указывается на то, что письменная зона резко обрывается (чаще наблюдаясь только по краям жилы), что имеются заметные, а иногда и большие колебания в количественных отношениях полевого шпата и кварца, противоречащие эвтектике и т.д. Все же до сих пор нет убедительного толкования механизма образования «ихтиоглиптов». Встречается, например, объяснение структуры письменного гранита позднейшим внедрением кварца в полевой шпат с замещением последнего, что иногда, действительно, имеет место, или же одновременным выпадением хорошо образованных крупных кристаллов полевых шпатов и кварца из коллоидных растворов. Критика подобных представлений, распространенных на письменные граниты вообще, широко известна, и она существенно помогла утвердиться в геологии представлению о существовании эвтектических явлений при образовании пегматитов. Однако ни одна из трех, выдвинутых в мировой литературе, трактовок природы «ихтиоглиптов» к настоящему времени не является универсальной и признанной всеми. Ниже выдвигается к обсуждению объяснение «активных» ихтиоглиптов, близкое представлению А. Е. Ферсмана, объяснение, нуждающееся еще в серьезной проверке и дополнительной аргументации на более обширном материале, чем тот, которым располагал автор.

А. Н. Заварицкий (43) справедливо отметил, что «ничто не мешает видеть в письменной ориентировке кварца ориентирующее влияние и ранее образовавшегося полевого шпата», что в иной трактовке разделяется нами на основании исследования затвердевших включений. При изучении полевых шпатов письменного гранита мы одно время, по аналогии с другими затвердевшими включениями, пытались пользоваться большими увеличениями микроскопа при поисках характерных включений. Однако оказалось, что кварцевые «ихтиоглипты» практически ничем не отличаются от включений в них микроскопической величины, что они просто являются характерными «письменными» макровключениями в крупных кристаллах полевых шпатов. Подобно другим затвердевшим включениям, некоторые разновидности ихтиоглиптов кварца в полевом шпате стали твердыми несколько позднее вмещающего их минерала-хозяина («пассивные письменные» включения) или, в наиболее распространенном случае, кристаллизовались согласованно и одновременно с включающим минералом

¹ В порядке постановки вопроса (Н. Е.)

(«активные» ихтиоглипты). В первом случае в процессе кристаллизации полевой шпат захватывал и сохранял их вначале в виде обогащенного газами «остаточного» расплава, о чем наиболее наглядно свидетельствует совершенно подчиненная, часто округлая форма подобных «письменных» включений.

Последние не показывают обычного для случая твердых включений собственного кристаллического ограничения и содержат много пузырьков «сухих» газов (рис. 14 нашей таблицы I), которыми иногда переполнен и включающий минерал-хозяин¹. Как включения газового расплава, так и газовые пузырьки часто вытягиваются полосками в зонах кристаллизации полевого шпата, изгибающимися под углом в 50—60°, параллельном наружным граням вмещающего кристалла. Подобные, иногда сложно-ступенчатые, изгибы наблюдаются и в отдельных включениях ихтиоглиптов. Если бы кварц кристаллизовался ранее или даже одновременно с включающим полевым шпатом, он должен был обладать или собственными или индукционными гранями.

Небольшие газовые пузырьки, присутствующие в большом количестве не только в подобных включениях, но и в теле кристалла-хозяина, свидетельствуют о сильном насыщении материнского расплава летучими веществами. Резкое преобладание твердой фазы внутри пор полевого шпата не позволяет рассматривать маточную среду, захваченную последним, иначе как остаточный расплав, обильно насыщенный «сухими» газами, родственное вещество из капли которого, когда она была еще жидкой, отложилось на стенках включения. Своеобразие сугубо подчиненной формы «письменных» включений, повидимому, целиком зависело от скорости роста кристалла-хозяина. Быстрый рост вызывал быструю консервацию капелек расплава и обуславливал неправильную и подчиненную их форму. Граниты кварца пегматитовых включений с вмещающим минералом-хозяином часто округлые, с «заливами» миниатюрной величины, совсем лишаящие возможность говорить о каких-либо окаймляющих включениях реликтах кристаллической структуры кварца, хотя бы в виде индукционных граней². Письменные включения подобного вида мы и назвали «пассивными». Характерными для них являются червеобразно изогнутые, прямоугельно изогнутые и мозаично-неправильные формы, а также одновременное угасание включений, расположенных как в центральной части кристалла, так и по периферии. Одинаковая ориентировка их ныне кристаллического вещества обусловлена тем, что все они твердели одновременно и подвергались одинаковому ориентирующему влиянию вмещающего кристалла полевого шпата.

¹ «Сухими» газами автор называет газы (SiF_4 , SiCl_4 , BF_3 , HF и др.) относительно слабо насыщенные парами воды. Будучи изолированными в порах минералов, они при охлаждении становятся двухфазовыми и содержат при комнатной температуре до 10% жидкости.

² Подобные формы часто имеют и вторичные кварцевые включения «метаморфогенных пегматитов», однако, в отличие от описываемого вида первичных включений, соотношения кварца и полевого шпата таких «псевдописьменных» гранитов резко нарушено и распределение кварца обычно совсем не подчиняется граням роста полевого шпата.

Относительно медленный рост вмещающего кристалла обуславливал наблюдающееся своеобразие «письменных» включений, по сравнению с остальными затвердевшими включениями. Начавшая захватываться полевым шпатом капля остаточного расплава стала кристаллизоваться еще до своей полной изоляции внутри кристалла, и в дальнейшем, если рост последнего был замедленным, происходило как бы соревнование в скорости роста «ихтиоглиптов» и минерала, их включающего. Абсолютно подчиненный рост ихтиоглиптов, с образованием индукционных штрихов-следов поверхности граней кристалла-хозяина, прекращался в тот момент, когда они изолировались от питающей среды веществом вмещающего минерала. Иногда это осуществлялось сразу, и тогда «активные письменные» включения оказывались как бы «обрезанными» гранью полевого шпата. Такой случай представлен А. Е. Ферсманом на таблице XI (108) в микроклинпертите Южной Норвегии.

Таким образом, можно различать два вида ихтиоглиптов, возникших как первичные включения: захваченные капли расплава, не успевшие начать кристаллизацию до того момента, как они были замкнуты («пассивные включения»), и капли расплава, успевшие начать кристаллизацию до своей полной изоляции и соревновавшиеся некоторое время, иногда продолжительное время, в скорости роста с кристаллом-хозяином («активные включения»). Прекрасный пример случая активных включений описан Иддингсом и приведен Д. П. Григорьевым и И. И. Шафрановским (31, рис. 3). На этом рисунке можно видеть, как активные включения в ортоклазе, по мере захвата их кристаллом-хозяином, возникали в различные моменты его развития и соревновались в скорости роста с последним почти все время его образования. Только в заключительный этап кристаллизации, когда из расплава, повидимому, иссяк избыточный кремнезем, они были законсервированы остаточными порциями полевошпатового вещества. Часть активных включений иногда до конца образования полевого шпата остается незаконсервированной и выступает на поверхность граней кристаллов. Окончания подобных раскристаллизованных письменных включений обычно являются фундаментом для роста уже ограненных кристаллов β -кварца, кристаллов свободного, равноправного с полевым шпатом, роста. Подобные кристаллы неверно называть головками ихтиоглиптов, так как слишком велики различия в способе образования тех и других. Прямая генетическая связь между ними отсутствует, хотя концы ихтиоглиптов являлись часто зародышами для новых кристаллов кварца и оказывали ориентирующее закономерное влияние на рост последних, происходивший уже в среде иного состояния. Казалось бы, несмотря на наличие в этой новой минералообразующей среде и вещества для образования полевых шпатов, и кремнезема для образования кварца, и боро-фторо-силикатов, и многих других веществ, обуславливающих минеральное разнообразие «пегматитов», — мы тщетно искали здесь в минералах затвердевшие включения. Мы находили в ограненном дымчатом и черном β -кварце, микроклине, топазе, берилле и других минералах только газовые

включения с содержанием в них жидкости при комнатной температуре в пределах от 10 до 45% объема включения.

Из 10 выделенных А. Е. Ферсманом типов пегматитов чистой линии (107, 108) только первый тип обычного письменного и апографического пегматита образовался из остаточного газорасплава. Образование продуктов газорасплава — аплитов и письменных гранитов, в жилах с блоковой текстурой с силекситами, ограничивается геофазой «С» А. Е. Ферсмана. Все последующее минералообразование, в том числе и в миаролитовых пустотах, как показывают включения, протекало в среде иных состояний (газорастворы и жидкие водные растворы) и приводило уже к возникновению полигенных жил, часто пространственно совмещенных с письменными гранитами. Приведенная трактовка природы ихтиоглиптов, как «письменных» включений расплава, содержащего большие количества «сухих» газов, для видов, имеющих индукционные грани, утверждает одновременность образования кварца с включающим полевым шпатом, но это было не эвтектическое быстрое выпадение, а совместный рост, при котором кварц находился в угнетенном положении. Зарождение «активных» ихтиоглиптов и исходная ориентировка письменных сростаний объяснима не эвтектикой, а механизмом возникновения включений.

В многообразии природных процессов минералообразования встречаются и случаи образования «псевдописьменных» гранитов, образовавшихся в результате замещения кристаллов полевого шпата веществом пневматолитического кварца, в отличие от нормального случая, уже не содержащего включений «сухих» газов. Вторичный кварц подобных прорастаний в качестве своих первичных включений содержит только газоводные включения (см. ниже), которые встречаются и в обычном письменном кварце исключительно в виде вторичных образований. Сложность указанных метаморфических процессов, вызывающих переотложение веществ в жилах и интенсивно воздействующих на продукты более ранних стадий минералообразования, требует глубоких качественных и количественных исследований, подобных исследованиям К. А. Власова (19, 20), и может быть точно отображена с помощью физико-химического анализа, столь прогрессирующего в геолого-минералогических науках благодаря работам А. Н. Заварицкого, Д. С. Коржинского, В. А. Николаева и В. С. Соболева.

5. СПОСОБЫ ОБРАЗОВАНИЯ И ГЕНЕТИЧЕСКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ЖИДКИХ И ГАЗОВЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ В МИНЕРАЛАХ

Жидкие и газовые включения распространены в минералах, участвующих в образовании наибольшего количества внемагматических рудных месторождений. Вопросам происхождения, генетической классификации жидких включений, их диагностике, форме, размерам и количеству их в гидротермальных минералах мы уже посвятили отдельную статью (35), которая существенно облегчает сейчас нашу задачу. Классификация включений по их составу и состоянию приведена на нашей схеме I (стр. 18—19).

При оценке генезиса включающих минералов и интерпретации данных, полученных по включениям, каждому исследователю необходимо четкое понимание разнообразной природы тех или иных включений и механизма их образования в кристаллах. Первое достигается исследованием состава и состояния включений, второе — выяснением их морфологии и пространственного распределения в теле кристалла.

Последнее мы и должны были вынести для краткого освещения в эту главу, предваряющую рассмотрение критериев для пневматолитических и гидротермальных минералов.

Способы образования включений и расположение их в теле вмещающего кристалла весьма различны так же, как различно и время их возникновения. Фактор времени имеет первостепенное значение при геологической интерпретации результатов экспериментов с включениями и может оцениваться только по отношению ко времени образования вмещающего кристалла¹.

Именно благодаря тому, что исследователями прошлого века не учитывалось разнообразие способов и времени образования включений, они приходили к противоречивым результатам, в связи с чем интерес к включениям был надолго утрачен. Для иллюстрации сказанного достаточно напомнить старый спор между непунистами и плутонистами относительно происхождения гранитов, в котором первые аргументировали водное происхождение гранитов наличием в кварце этих пород жидких водных включений. Только значительно позднее стало ясно, что эти включения безусловно вторичны по отношению к пирогенным минералам и образовались значительно позднее гранитов в результате гидротермального метаморфизма.

В предыдущих главах мы почти не вникали в механизм образования включений минералообразующей среды, отмечая лишь, что они могут быть первичными, одновременными по своему происхождению с вмещающим минералом, и вторичными, возникающими позднее в результате наложения новых стадий минералообразования.

Характерным признаком первичных включений до сих пор считалась приуроченность их к былым граням роста кристаллов, а вторичных, наоборот, отсутствие такой приуроченности, а именно, расположение их по былым, ныне залеченным, трещинкам в минерале, пересекающим эти зоны роста, а иногда и друг друга. Эти диагностические признаки в мировой литературе превратились в правило, и этими признаками при интерпретации геологических данных до сих пор пользуются все геологи. Более детальное исследование этого вопроса привело нас к выводу о наличии в минералах очень распространенных в природе первично-вторичных включений, совмещающих в себе признаки тех и других. Опубликование специальной заметки по этим включениям снимает с нас необходимость подробного освещения механизма образования этих включений.

¹ Только некоторые твердые радиоактивные включения в минералах образующие вокруг себя «плеохроические дворники», могут служить в качестве абсолютных минералогических хронометров.

К настоящему времени выявлены таким образом три типа первичных, первично-вторичных и вторичных включений, которые по способу образования и расположению в теле кристалла подразделяются на виды.

На таблице II (стр. 34—35) показано почти все генетическое разнообразие типов и видов жидких и газовых включений.

Здесь следует отметить, что столь дробное генетическое подразделение включений оказалось возможным исключительно благодаря трудам советских ученых—А. В. Шубникова, Г. Г. Леммлейна, Н. Н. Шефталя, Д. П. Григорьева, И. И. Шафрановского, О. М. Аншелеса, Г. Г. Грушкина и др. Далеко не все эти исследователи интересовались генетическим значением включений в минералах, но все внесли многое в понимание механизма роста кристаллов. Особенно многое в выяснении образования вторичных включений было сделано Г. Г. Леммлейном.

1) Первичные включения

Можно различать два главных способа образования первичных включений минералообразующей среды в монокристаллах: включения скелетного и дендритного роста и включения многоглавого роста.

О. М. Аншелес¹ показал, что у нормально растущих кристаллов отложение каждого нового слоя вещества начинается с ребер и вершины, а затем распространяется на всю грань. Случается и так, что, в результате застоя раствора у нарастающей таким образом грани или накопления на ее поверхности не поглощающихся примесей, в средней ее части происходит задержка в отложении вещества, а дальнейшее нарастание кристалла осуществляется только полосками вдоль ребер, образующими коробчатые углубления на гранях. Такой и более сложный обедненный рост приводит к образованию пустотелых и дендритных кристаллов. Этого не случается, если условия скелетного роста сменяются нормальным ростом, сопровождающимся выдвиганием от реберных «полосок» к центру граней слоев вещества, перекрывающих углубления на гранях. Это вызывает захват и изоляцию частиц минералообразующей среды с образованием в центральной части граней относительно крупных включений. Естественно, что неоднократное чередование скелетного и нормального роста приводит к образованию серий одновременных первичных включений, располагающихся в разных плоскостях граней кристалла.

А. В. Шубников на опыте с выращиванием алюмо-калиевых квасцов установил, что одни грани (грани октаэдра) могут расти нормально, а другие (грани куба) скелетно, и, таким образом, одни пирамиды нарастания кристалла могут содержать большое количество включений, а в других они будут отсутствовать. В зонарных кристаллах мутные зоны с обильными включениями образуются в

¹ Ученые записки Ленинградского университета, сер. геол.-почв., вып. 5 (1933).

результате быстрого роста, а прозрачные—в моменты замедленного нормального отложения на гранях вещества.

В плоскостях граней некоторых кристаллов кварца, а чаще топаза и берилла, наблюдаются трубчатые включения, которые в связи с разработкой визуального метода определения температур и выявления типов гомогенизации включений привлекали наибольшее наше внимание. Судя по исследованиям Н. Н. Шефталя, включения подобной формы, вероятно, возникают вначале на гранях в виде желобчатых углублений (с разделяющими их валиками), образовавшихся в условиях местных недосыщений концентрационных потоков, имеющих ламинарное строение. Даже незначительные изменения в направлении последних вызывало перекрывание «желобков» с образованием включений трубчатой формы.

Включения иногда образуются в следу движения ребра кристалла, растущего из раствора большого пересыщения. При встрече над ребром омывающих кристалл концентрационных потоков возникает область застоя, в которой на ребре возникает притупляющая грань. Выдвижение над нею соседних габитусных граней вызывает образование удлиненного, параллельного ребру, включения. При периодических повторениях этого в плоскости продвижения ребра кристалла возникает серия параллельно вытянутых включений раствора (118).

Почти аналогично возникают включения по трассе перемещения вершины при росте кристалла.

Первичные включения в ступенчатых поверхностях чередующегося роста смежных граней были впервые установлены и описаны Г. Г. Грушкиным (28, рис. 7 и 9).

Включения многоглавого роста возникают при возобновлении кристаллизации после перерывов роста (часто сопровождающихся сменой габитусов) и регенерации механически, химически или физически (оплавление) поврежденных участков кристалла. Из новых порций растворов, на тех или иных поверхностях кристалла, возникает множество центров кристаллизации, обуславливающих многоглавый рост. В углублениях, между растущими миниатюрными головками, застревают частицы маточного раствора и образуются ограненные первичные включения. Иногда подобные слои с включениями образуют «рубашку» кристалла, облекая его со всех сторон (некоторые кварцы Тетюхе), а в более редких случаях располагаются только в головке кристаллов с образованием белой «фарфоровидной насадки» («коневьи зубы» Шерловой горы).

Регенерационные включения концентрируются на границе обычно неровной поверхности сколов, растворения или, редко, оплавления, делая эту границу залечивания кристалла более отчетливой. Естественно, что выше этой границы, в одевающем слое новой генерации также возникают первичные включения многоглавого роста.

2) Первично-вторичные включения

Сочетают в себе признаки первичного и вторичного происхождения. Этот тип включений особенно распространен в трещинах,

пересекающих некоторые внутренние зоны роста кристаллов и не выходящих в пределы тех или иных наружных зон. В непрерывно-прерывистом процессе роста кристалла эти трещинки возникают в различные моменты роста из-за внутренних напряжений или под воздействием внешних факторов. В следующие моменты роста происходит их залечивание, одновременно с образованием следующей зоны роста кристалла, или же, после перерыва, в результате наращивания кристалла веществом последующей генерации.

Залечивание трещинок в кристаллах обусловлено выделением родственного вещества на их стенках из проникающих в них растворов. Закристаллизованные трещинки обычно содержат множество включений этих растворов благодаря дендритообразному или реже многоглавому зарастанию, происходящему в условиях затрудненной диффузии вещества.

В так называемых «свилеватых» кристаллах кварца ранее были установлены очень мелкие первично-вторичные включения, возникающие в плоскости двойникования на границе раздела соседних «ломтей». Поскольку в мозаично разветвленных «свилеватых» кристаллах различные ломти пересекают зонарные слои, мы можем видеть, что двойниковые включения, возникающие в процессе роста кристаллов, как бы объединяют в себе признаки и первичного и вторичного происхождения. Границы раздела между «ломтями» сходятся друг с другом по направлению к центру, и в одной и той же граничной плоскости двойниковые включения, расположенные ближе к центру «свилеватого кристалла, будут показывать несколько более высокую температуру гомогенизации.

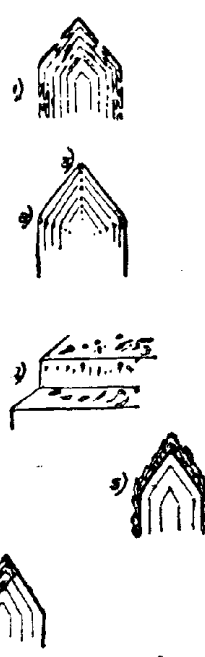
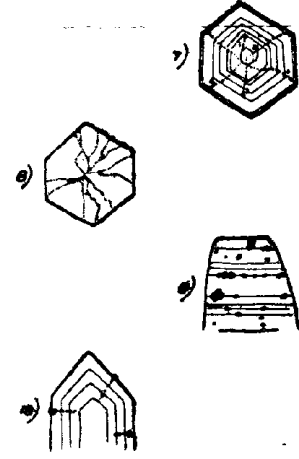
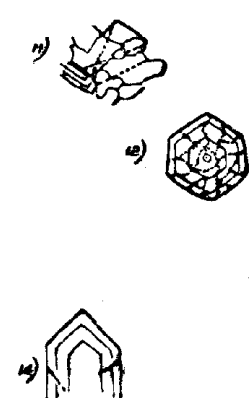
На границе соприкосновения срастающихся в друзьях кристаллов Д. П. Григорьев¹ установил новый вид включений, располагающихся в индукционных поверхностях. Поскольку ориентировка кристаллов в друзьях чаще всего бывает различной, индукционные включения могут возникать на поверхности смыкания граней различных индексов и, следовательно, имеют иной способ распределения, чем наблюдается в случаях образования чисто первичных включений. Индукционные включения поэтому правильнее отнести также к типу первично-вторичных включений. Поскольку швы срастания соседних кристаллов одновременного роста также являются формами роста, индукционные включения при их исследовании методом гомогенизации могут показывать минимальную температуру образования кристаллов, несколько более высокую, ближе к месту прирастания кристаллов.

Включения, образующиеся на пути отталкивания чужеродных кристаллу частиц, выявленные впервые А. В. Шубниковым, также по своему выполнению в теле минерала должны быть отнесены к типу первично-вторичных включений. Механически попавшие на былую грань минерала чужеродные частицы в месте перекрытия грани вызывают местное ее голодание. В процессе нарастания грани часто происходит подня-

¹ См. Минер. сборник № 2 Львов. геол. об-ва (1948).

СПОСОБЫ ОБРАЗОВАНИЯ И ГЕНЕТИЧЕСКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ЖИДКИХ И ГАЗОВЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ В КРИСТАЛЛАХ

Составил Н.П.Ермаков
1948 г.

Типы включений	Виды включений и их расположение в кристаллах	Схемы образования и распределение включений в кристаллах
<p>I Первичные включения в монокристаллах</p> <p>1. Включения скелетного и дендритообразного роста</p> <p>2. Включения многоглобового роста</p>	<p>1) В плоскостях граней.</p> <p>2) В следу движения ребра.</p> <p>3) В трассе движения вершины.</p> <p>4) В ступенчатой поверхности чередования роста смежных граней.</p> <p>5) В одевающем слое новой генерации.</p> <p>6) На границе неровной поверхности регенерации.</p>	
<p>II Первично-вторичные включения</p>	<p>7) В трещинах различных зон роста кристалла.</p> <p>8) На границе раздела двойниковых "ломтей"</p> <p>9) В плоскостях индукционных грузовых сростков.</p> <p>10) На пути отталкивания гранями чужеродных частиц.</p>	
<p>III Вторичные включения.</p>	<p>11) В трещинах механического происхождения</p> <p>12) В трещинках напряжений и скольжений при полиморфных превращениях</p> <p>13) В трещинках термического воздействия.</p> <p>14) В трещинах денудационного происхождения.</p>	

тие осевшей частицы и в следу ее перемещения остаются заполненные раствором каплевидные и трубчатые вакуоли включений, располагающиеся друг за другом цепочкой, перпендикулярной наружной грани и, следовательно, секущей различные зоны роста кристалла. Иногда образуется только одно включение, так как относительно крупная частица не перемещается и обрастается кристаллом-хозяином.

Характернейшей чертой выделенного нами типа первично-вторичных включений является то, что эти включения вторичны только по отношению к тем или иным частям кристалла и образовались одновременно или раньше других его частей.

Таким образом, в общем, по отношению ко всему минералу, они являются сингенетическими.

3) Вторичные включения

В отличие от описанных выше двух типов включений, вторичные включения по отношению ко всему вмещающему минералу являются эпигенетическими. Они располагаются в трещинах, секущих все зоны роста кристалла, а также те или иные границы пирамид нарастания, двойниковые швы, поверхности регенерации, индукционные грани кристаллов и внутриминеральные трещинки, содержащие первично-вторичные включения. Часто разновременные трещины в кристалле пересекают друг друга и одновременно проходят через целый ряд кристаллов (35). Характернейшей чертой вторичных включений является отсутствие связи их с процессом роста включающего кристалла. Они образуются залечиванием выходящих на поверхность последнего трещин в позднейший период минералообразования и метаморфизма, когда уже не происходило наращивания кристалла-хозяина.

Трещины в минералах различны по своему происхождению. Чаще всего они обязаны механическому воздействию на кристаллы тектонических усилий или же явлению полиморфных превращений, вызывающему резкие изменения удельного объема минерала. Этот способ образования трещин в кристаллах, как известно, был впервые разъяснен А. Е. Ферсманом¹ на примере превращений α - β -кварца.

В качестве одной из вероятных причин возникновения трещиноватости в минералах можно назвать и температурное воздействие. В условиях поверхности земли трещины в минералах возникают, главным образом, в результате воздействия различных агентов денудации, однако залечивание трещин здесь почти не происходит, и вторичные жидкие включения в них носят характер затеков (35).

Надежно изолированные внутри кристаллов вторичные включения образуются в гипогенных условиях в процессе залечивания трещин того или иного способа образования. Это залечивание уже полностью образованных кристаллов осуществляется раство-

¹ См. Известия Российской Академии Наук (сер. 6), т. 7 (1913).

рами других этапов или стадий минералообразования. Так, трещины в пирогенном кварце обычно залечиваются пневматолитическим β -кварцем или кварцем гидротермального происхождения. Трещины в кристаллах кварца ранних генераций часто залечиваются позднейшим кварцем, образующим на месторождении обособленные индивиды другой генерации и измененного габитуса.

Механизм заполнения этих трещин и образование в них вторичных включений был впервые и исчерпывающим образом разрешен опытами Г. Г. Леммлейна¹. Им было показано, что залечивание капиллярных трещинок начинается у выклинивающегося их внутреннего конца и происходит в результате дендритообразного нарастания. При отсутствии конвекции и в условиях затрудненной диффузии смена залечивающих растворов в трещинках оказывается почти невозможной, поэтому зародыши в слое нарастания трещины быстро переходят к скелетному и дендритообразному росту. При этом смыкание балочек дендритов обуславливает надежную изоляцию между ними мельчайших капелек истощенного (по отношению к родственному веществу) раствора включений. Залечивание относительно широких трещинок осуществляется многоголовым их нарастанием, при котором, в промежутках между головками микрокристалликов замыкаются капельки раствора в вакуолях ограненной формы.

Изложенное выше имеет принципиально важное значение, так как показывает, каким образом минералообразующая среда может захватываться кристаллами, образуя включения того или иного генетического типа. Форма этих включений не имеет значения для целей настоящей работы и по ней лишь в некоторых случаях можно судить об условиях роста вмещающих минералов. Кстати сказать, во многих случаях она не является изначально образовавшейся, а представляет собою окончательный результат процесса установления равновесия между включенным раствором и кристаллом-хозяином. В частности, как это было показано Г. Г. Леммлейном, причудливая с большой удельной поверхностью форма включений не является устойчивой, и включения при неизменном объеме стремятся приобрести форму, обладающую наименьшей поверхностной энергией. Вещество в нем переносится с выступов на входящие углы, форма включения становится округлой, а при достижении полного равновесия превращается в негативный кристалл. Приведенные в нашей таблице формы включений для различных их генетических типов отражают лишь наиболее часто встречающиеся случаи, кроме того, различные кристаллические структуры минералов накладывают на форму включений свой отпечаток.

В большинстве случаев нельзя рассматривать форму включений как прямой показатель принадлежности их к тому или иному генетическому типу, что делают некоторые иностранные авторы. Данные о размерах и количестве включений в минералах приводились нами в другой работе (35).

Подводя итоги сказанному, мы должны подчеркнуть, что первичные и первично-вторичные включения имеют прямое и непосредственное отношение к среде, в которой образовался данный минерал, в то время как вторичные включения могут захватывать и сохранять частицы среды иного состояния, не имеющей прямого отношения к кристаллизации изучающегося минерала. Поэтому в качестве объективных критериев познания генезиса минералов мы можем с уверенностью использовать только первые два генетические типа включений. Однако вторичные включения важны нам для выяснения последующих процессов, происходивших на месторождениях после главного этапа их образования.

6. ТИПЫ ГОМОГЕНИЗАЦИИ ЖИДКО-ГАЗОВЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ И ГРАНИЦЫ ПНЕВМАТОЛИТИЧЕСКОГО МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЯ

На рисунках нашей таблицы I (стр. 24—25), сделанных по микрофотографиям, изображены типичные газовые включения (рис. 12, 13, 14) и включения водных растворов (рис. 17, 18), которые, кроме жидкости, имеют внутри газовой пузырьки с темным контуром. При сопоставлении этих рисунков бросается в глаза резко различная степень наполнения полости поры жидкостью, обусловленная различным соотношением газовой и жидкой фаз внутри включений. Было давно уже установлено, что небольшие газовые пузырьки жидких включений исчезают при нагревании. Если герметически закрывающийся сосуд целиком заполнить нагретой до 100°C водой, а затем его охладить до комнатной температуры, жидкость, вследствие большего по сравнению с замыкающими стенками сжатия, не будет уже заполнять сосуд целиком и образуется пузырек пара, находящийся в равновесии с жидкостью. Вторая — газовая фаза, таким образом, является результатом изменения температурных условий, причем она уничтожается нагреванием жидкости в сосуде до исходной температуры в 100°C. Этот примитивный опыт указывает на то, что наблюдающиеся в природных включениях разные фазы есть результат изменения внешних условий существования минералов до условий поверхности. Чтобы распространить этот опыт на природные явления достаточно напомнить, что при температуре до 100°C даже при 2000 атм. давления сжимаемость воды более чем в 13 раз выше кварца, а при исходных высоких температурах эти различия еще больше.

Газовые включения так же, как и жидкие, будучи законсервированы в порах минералов в резко иных, глубинных физико-химических условиях, при их изучении на поверхности земли оказываются гетерогенными, существенно преобразованными в своем физическом состоянии. Они, как видно, содержат в этих условиях относительно небольшое количество жидкой фазы, а жидкие включения нагретых растворов — относительно малое количество газовой фазы. Таким образом, для установления первичного состояния, в котором произошло их пленение, обычно требуются эксперименты. Изменения, происшедшие с ними, мы можем проследить в лабораторных условиях, искусственно восстанавливая один из факто-

¹ См. Леммлейн Г., *Zeitschrift für Kristallographie*, Bd. 71, N. 3, 237-256 (1929).

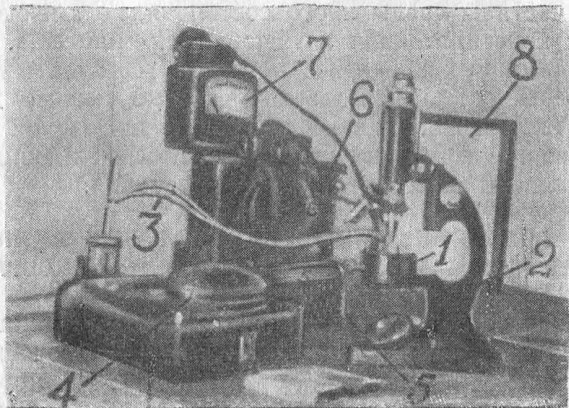


Фото № 1. Стандартная установка микротермокамеры Ермакова на микроскопе МИН — 2.

- | | |
|----------------------|------------------|
| 1. Микротермокамера. | 5. Реостат. |
| 2. Микроскоп. | 6. Трансформатор |
| 3. Термопара. | 7. Амперметр. |
| 4. Милливольтметр. | 8. Осветитель. |

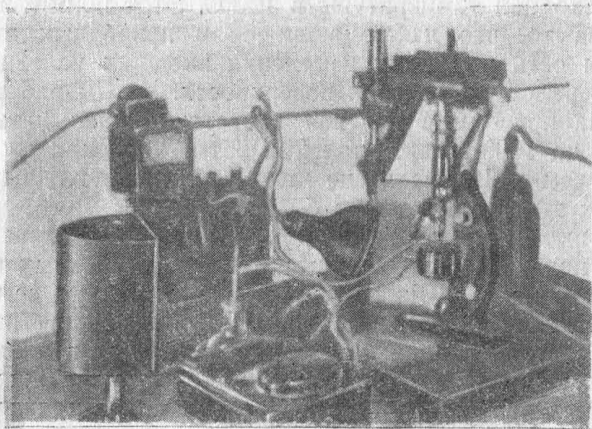


Фото № 2. Общий вид установки для микротермометрических исследований и микрофотографирования.

ров их первичного состояния — температуру, что в условиях надежно замкнутых в минералах систем включений ведет к восстановлению в них первичного внутреннего давления и концентрации, пока еще слабо поддающихся непосредственным измерениям. Восстановление и измерение первичной минимальной температуры внутри включений, фиксирующееся их полной гомогенизацией, оказалось возможным с помощью сконструированной нами микротермокамеры, установка которой для минералотермометрических исследований показана на photographиях № 1 и 2.

Благодаря тому, что новая конструкция позволяла производить непрерывное наблюдение за включениями до высоких температур (700°C) и одновременно измерять температуру, нам удалось установить два типа гомогенизации газовой-жидких включений. До настоящего времени в природных кристаллах был известен только один тип гомогенизации жидких включений, когда по мере нагревания их газовый пузырек постепенно уменьшался и наконец исчезал, а пора включения оказывалась при определенной температуре целиком заполненной жидкой фазой. Микрофотография № 10 показывает жидкие включения в низкотемпературном кварце (Средний Урал), микрофотография № 11 иллюстрирует те же, но уже гомогенизированные при 130°C , включения, а микрофотография № 12 схватывает момент, когда при охлаждении до 115° в правом включении произошло «вскипание» и мелкие газовые пузырьки мгновенно дали два объединенных газовых пузырька, которые образуют в следующий момент охлаждения один газовый пузырек. При температуре 30°C оба включения приобретут тот же вид, что и на микрофото № 10.

В ранних генерациях волынского кварца и топаза с помощью тщательных измерений в соотношениях газовой и жидкой фаз по мере нагревания препарата впервые было установлено, что во включениях, содержащих при температуре $18-20^{\circ}\text{C}$ более 76% газовой фазы, во время нагревания препарата газовый пузырек постепенно увеличивается и, наконец, при той или иной, обычно высокой, температуре целиком заполняет включение. Дальнейшие исследования включений с иными соотношениями фаз и иным положением в кристаллах установили еще один, промежуточный между ними, третий тип гомогенизации. Он оказался характерным для включений, в которых газовый пузырек занимает объем от 55 до 76% по отношению к объему всей поры. При нагревании подобных включений на значительном температурном интервале гомогенизация протекает по первому типу, т. е. газовый пузырек сначала медленно, а затем несколько быстрее, уменьшается. Однако при достижении высокой температуры нагревания, границы между газовой и жидкой фазами вследствие сближения их показателей преломления становятся менее четкими и, наконец, при определенной температуре быстро раздвигаются в сторону жидкой фазы. На этом заключительном этапе нагревания, в сравнительно небольшом, но изменчивом для разных

включений температурном интервале, происходит полная гомогенизация быстрым расширением газового пузырька и заполнением всего включения газовой фазой. Судя по тому, что показатели преломления газа и жидкости уже в точке перехода становятся близкими, отчего граница между фазами как бы стирается, наблюдаясь в виде нежного контура, истинное состояние вещества включения занимает по плотности какое-то промежуточное между этими двумя состояниями положение и, повидимому, отвечает очень сильно сжатому пару. Включения, гомогенизация которых происходит по 3-му промежуточному типу, мы назвали газоводными и включениями (тип 7-й схемы I).

На микрофотографиях № 1—8 представлены различные соотношения фаз в первичных и первично-вторичных включениях топаза, характеризующие различные моменты эволюции пневматолитической среды: на микрофотографии № 1 — 54,45% газа, № 2 — 54%, № 3 — 55,00%, № 4 — 60,74%, № 5 — 66,27% № 6 — 66,67% газа. Все изображенные на микрофотографиях №№ 1—6 включения при нагревании гомогенизировались по 3-му промежуточному типу. На микрофотографиях № 7 с 79,31% газа и № 8 с 82,76% газа включения гомогенизировались по 2-му типу.

Для максимально возможной точности измерения соотношений нам, как видно по многочисленным микрофотографиям, всегда удавалось подобрать сильно вытянутые ампулообразные или трубчатые включения, вообще довольно характерные для топазов. Изменения объема газовой фазы в них в процессе нагревания через определенные интервалы температур легко фиксировались с помощью микрометрической линейки и микрофотографирования. Были установлены некоторые закономерности в ходе гомогенизации каждого из трех типов и зависимости температур гомогенизации от разных соотношений фаз.

Для первого типа гомогенизации они в первом приближении были намечены нами еще ранее на примере флюорита и барита (31). Увеличенный объем газового пузырька по отношению к жидкости вызывает в двухфазовых включениях почти закономерное повышение температуры гомогенизации с небольшими вариациями, чаще зависящими от степени точности измерения соотношений фаз во включениях¹. Еще в 1943 г. на этом принципе для ориентировочного визуального определения под микроскопом температур образования указанных минералов были построены две кривые. В последнее время на подобранном нами для этой цели очень разнообразном материале, с помощью студента-дипломанта Львовского университета Р. Ф. Сухорского, была выведена кривая для кварца, из которой видно, что 0,7% газа в жидком включении отвечает температуре гомогенизации в 55°C, 3% — 90°, 5% — 110°, 7,2% — 130°, 13,7% — 165°, 17,2% — 185°, 21% — 200°, 26% примерно 220° и т. д.² Однако для бо-

¹ Мы стараемся применять линейные соотношения как наиболее точные, затем, когда это невозможно, плоскостные и редко объемные, требующие сложных измерений и расчетов.

² См. заметку в Минерал. сборнике № 3 Львовск. геол. об-ва (1949).

лее высокотемпературных минералов подобная зависимость соотношений фаз и температуры гомогенизации для различных минералов и разных минералогических провинций, могущая быть выраженной математически, уже утрачивается полностью или частично, главным образом, вследствие повышенных внешних давлений и наличия твердых фаз.

Для получения каждой из 20 точек кривой для кварца необходимо было делать тщательные измерения фазовых отношений и после их выявления производить гомогенизацию нагреванием. Ход гидротермальной гомогенизации можно проследить по кристаллу кварца из Забайкалья, содержащего, наряду с ограниченными включениями («негативные кристаллы»), включения трубчатой формы. На микрофотографии № 9 изображено одно такое включение, причем выше и ниже него два других включения ранее были взорваны нагреванием. Трещинки, куда оказалась выдавлена жидкость, хорошо заметны на микрофотографии, а включения, оказавшиеся вследствие этого заполненными только газовой фазой, представляются черными. На микрофотографиях №№ 13—16 изображена при большем увеличении та же зона в кристалле. Здесь, ниже отмеченного ограниченного включения, видны включения трубчатого вида, позволяющие проследить изменения в соотношениях фаз при нагревании. В исходном положении (микрофото 13) при 30°C можно видеть между 4-м и 6-м делениями линейки, на вертикальной нити, черный газовый пузырек, занимающий 21% объема включения. Ход гомогенизации последовательным уменьшением газового пузырька протекал следующим образом: 2) температура 140° — газ 13% (микрофото № 14); 3) 160° — 11%; 4) 170° — 9%; 5) 180° — 8% (микрофото № 15) и 6) 200° — 0% (микрофото № 16). Дальнейшее нагревание вызывает взрывы жидких включений, которые представлены на микрофотографии № 45. Значительно более трудно проследивать ход гомогенизации в многофазовых жидких включениях высокотемпературных гидротермальных растворов. Влияние больших концентраций и внешних давлений очень осложняет минерало-термометрические исследования и требует для своего выяснения начатой нами кропотливой работы.

Относительно простой случай представляют трехфазовые включения, когда, кроме жидкости и газового пузырька, присутствует лишь один минерал-«узник» в кристаллах кварца из Алдана и Памира обычно кубического габитуса (NaCl или KCl). Однако на пневматолитических и высокотемпературных гидротермальных месторождениях во включениях маточной среды, кроме жидкости и газа, присутствует, обычно, целая коллекция внутренних изотропных и анизотропных минералов-«узников», отличающихся по кристаллографической форме и оптическим свойствам. Такие вторичные включения в топазах Волыни изображены на микрофотографиях №№ 17—28, а первичные в кварцах Памира на микрофотографиях №№ 29—32¹.

¹ О размерах включений можно судить по микрометрической линейке, одно деление которой равно 0,008 мм (микрофото №№ 1—24) и 0,014 мм (микрофото №№ 25—48).

Во включениях водных и газодных растворов в топазах Волыни, представляющих собою первичные и первично-вторичные включения, обычно можно различать 6 и более различных кристаллов (хлориды и фториды K и Na, а также, повидимому, соединения алюминия и кремнезема и др.).

Определение и исследование минералов-«узников» встречается с очень большими трудностями. Мы пока, чтобы не впасть в ошибки, даем им порядковые номера по убывающему отношению их объемов к объему всего включения при температуре 20—30°.

На микрофотографии № 21 во включении виден справа внизу крупный черный пузырек, выше которого находится изотропный кристалл № 1 почти кубического габитуса; влево от него минерал № 2, обычно округлый, изотропный; анизотропный, с высоким дву-преломлением минерал № 3 находится в верхнем углу включения, два шестигранных кристаллика внутреннего минерала № 4 находятся у левого нижнего угла кристалла № 1, на котором здесь вырос (см. также и на микрофото 28) черный, возможно рудный, минерал № 5. Призматический, прозрачный, слегка голубоватый анизотропный минерал № 6 вырос внизу кристалла № 2. Все эти внутренние минералы и газовый пузырек находятся в маточном жидком насыщенном растворе, заполняющем включение.

Нами были подобраны препараты, в которых можно было в одной и той же зоне кристалла топаза наблюдать крупные включения (до 0,25 мм в длину) и трубчатые включения, в которых все фазы располагаются «по линейке». Одновременная гомогенизация нагреванием тех и других включений показывала их идентичность. В процессе гомогенизации производились измерения через определенные температурные интервалы, показывающие ход изменений в отношениях фаз. Целый ряд измерений в исходном положении (при нормальной температуре) показали для подобных многофазовых включений, гомогенизирующихся при температуре 300—310°C, следующие соотношения: водный раствор—55%, газовый пузырек—19,6%, твердые фазы—25,4%. Различные внутренние кристаллы по отношению ко всему объему твердого вещества имеют следующие объемы (в%): № 1—60, № 2—21, № 3—12, № 4—4—4,2, № 5—1,5, № 6—1,3.

В опыте, задокументированном на микрофотографиях №№ 17—24, показаны общие для включения фазовые соотношения при температуре 40°C: насыщенный водный раствор — 56,5%, газовый пузырек—19,6%, твердые фазы (в%): № 1—14,9, № 2—5, № 3—3, № 4—1, № 5—0,55, № 6—0,45. После закрытия микротермокамеры температура повысилась с 20° до 40°C, и такой небольшой нагрев все же вызвал некоторое закругление углов кристалла № 1, ранее выглядевшего так, как на микрофотографии № 26.

Измерения в процессе гомогенизации удавалось производить только для газовой фазы и твердой фазы № 1. Одновременно осуществлялось микрофотографирование, служившее контролем при этих измерениях. На микрофотографиях трубчатого включения газовый пузырек, представляющийся черным, располагается между следующими делениями линейки: на микрофото № 17 между 3, 5

и 4, твердая фаза (белое) на делении 5 (вертикальная нить), на микрофото № 18, 19 и 20 соответственно между 5—5,5 и 6,5—7. На микрофотографиях №№ 21—24 эти фазы отчетливы, и можно видеть, что гомогенизация осуществлялась последовательным уменьшением газового пузырька и растворением твердых фаз, т. е. по первому типу. Процесс гомогенизации нагреванием дал следующие результаты:

№№ наблюдений	Температура °C	% газа	% тверд. фазы 1	№№ наблюдений	Температура °C	% газа	% тверд. фазы 1
1	40	19,6	14,9	6	275	2,5	3,4
2	100	15,6	12,75	7	280	2,2	3,0
3	150	12,23	10,2	8	290	1,0	2,5
4	180	10,0	8,6	9	300	0,0	1,5
5	250	5,0	5,0	10	310	0,0	0,0

Различным моментам наблюдений отвечают: 1 — микрофото №№ 17 и 21, 3 — №№ 18 и 22, 4 — №№ 19 и 23, 6 — №№ 20 и 24. В интервале температур от 70 до 100° первыми растаяли внутренние кристаллы №№ 2, 3 и 6, кристаллы №№ 4 и 5 последовательно уменьшались в размере и исчезли совсем в интервале температур от 290° до 310°C. Последним растаял при температуре 310° кристалл № 1 и во включении осталась только жидкая фаза. При восстановлении гетерогенного состояния включения, при медленном охлаждении, почти вместе с газовым пузырьком начинает расти кристалл № 1, приобретая сразу же острые ребра и плоские грани, а затем в обратной растворности последовательности выпадают и другие твердые фазы. Чем быстрее происходит охлаждение, тем беспорядочнее рост внутренних кристаллов и менее совершенна их внешняя форма. Получить включение в прежнем виде с исходной, очень совершенной гранкой внутренних минералов-«узников» не удается, так как скорость охлаждения в природе была несравнимо более медленной. Однако соотношения фаз в оставшихся замкнутых системах включений сохраняются, и опыт без перегрева можно повторять с одним и тем же результатом много раз.

Перейдем к рассмотрению кривых, представленных на нашей диаграмме типов гомогенизации включений минералообразующей среды (см. диаграмму). На ней изображены все типы гомогенизации выявленные на конкретных примерах исследования включений, главным образом, в топазах Волыни и отчасти Шерловой горы. Эта диаграмма в общих закономерностях характерна и для других пневматолитических и гидротермальных минералов с соответствующими типами включений. Поскольку такие диаграммы пока отсутствуют в литературе, необходимо сделать несколько пояснений.

По оси абсцисс внизу отложены процентные содержания газовой фазы во включениях, причем с левой ординатой, на которой

отложены температуры, совпадает 100% газа и 0% жидкости, а с правой—100% жидкости, 0% газа. Цифры на абсциссе внизу указывают промежуточные содержания газа в процентах, а сверху им отвечают цифры, характеризующие проценты жидкости во включениях. Вертикальный пунктир разграничивает пневматолитический этап от гидротермального (на 50%). Отрезки вертикальных линий внизу диаграммы разделяют указанные этапы на стадии, характеризующиеся соответствующим процентным отношением газа и жидкости во включениях.

Кривые диаграммы естественно начинаются не от оси абсцисс, так как при 0°C соотношения фаз во включениях мы не измеряли.

Результаты описанного выше опыта с многофазовыми включениями в винно-желтом топазе Волыни нанесены на кривой I нашей диаграммы, причем сплошная линия отвечает ходу гомогенизации, прослеженному по газовому пузырьку, а пунктирная по внутреннему кристаллу № 1 того же включения. Цифры на кривых отвечают порядковым номерам наблюдений. Цифры в кружочках представляют возможности увязать номера наблюдений с микрофотографиями №№ 17—24, документирующими соотношения фаз во включениях. Мы видим, что уменьшение газового пузырька опережает в точке 5 при температуре 250° таяние минерала № 1, поэтому кривые пересекаются, газовый пузырек исчезает при температуре 300°, а остатки твердой фазы при температуре 310°C, когда наступает полная гомогенизация включения и дальнейшее, даже небольшое, нагревание вызывает его взрыв.

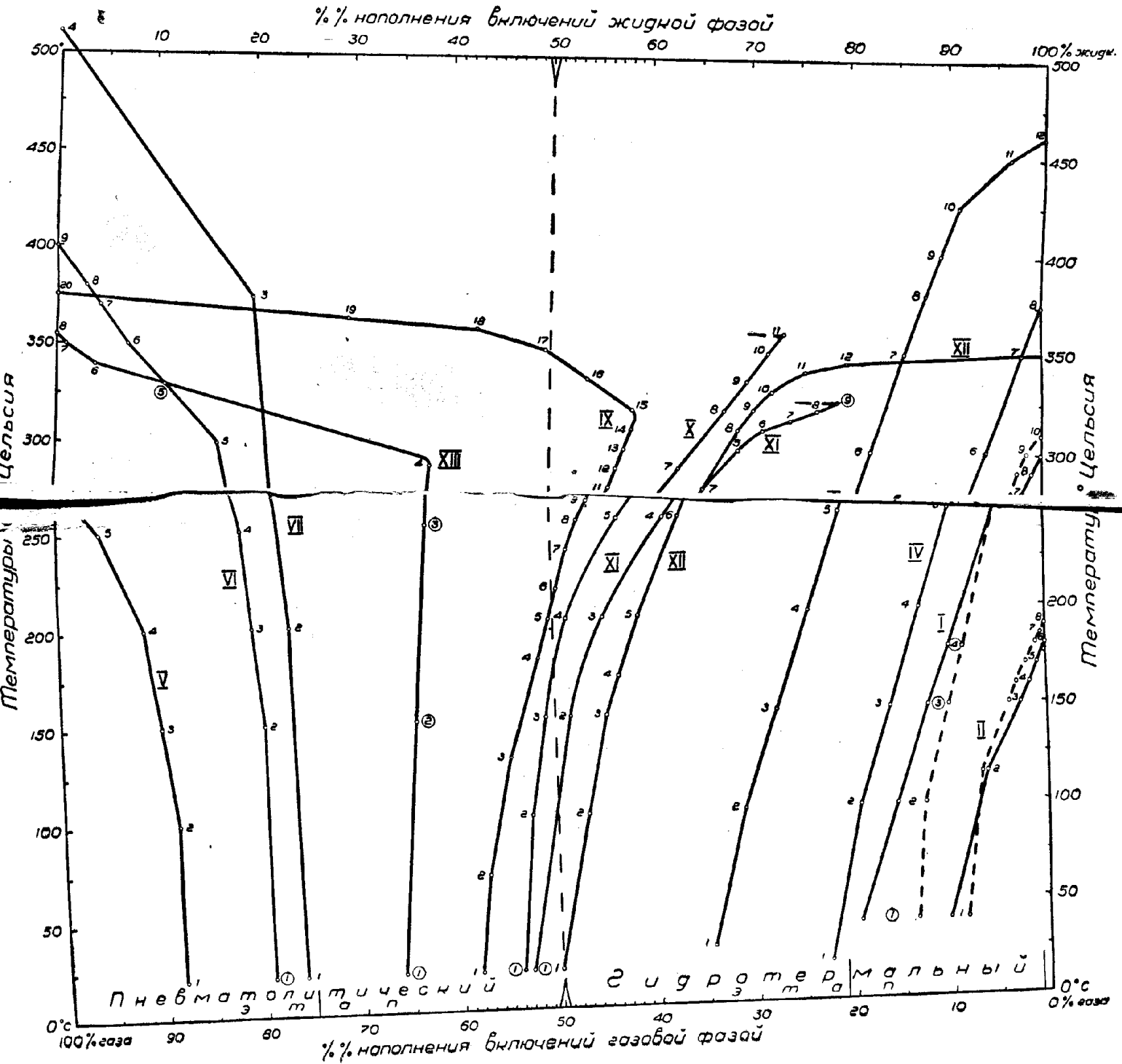
Как было выявлено на примере кварца, флюорита, барита, кальцита и других минералов, двухфазовые включения в них с содержанием газа до 21% и жидкости от 79% и более гомогенизируются при температурах до 200°C. Подобных двухфазовых включений в топазах встречено не было, а наличие твердых фаз и, следовательно, очень высокая концентрация веществ в минералообразующих растворах включений повышает температуру гомогенизации до 300—310°C. Поэтому, если гомогенизация двухфазовых включений в низкотемпературных минералах небольшой глубины показывает минимальную температуру их образования, близкую к истинной¹, то к использованию для целей минералогической термометрии трех- и многофазовых включений окажется возможным подойти лишь в будущем, после большой работы в этом направлении.

Кривая II нашей диаграммы аналогична кривой I, но построена для вторичных включений самых последних моментов гидротермальной активности на Волыни. Растворы залечивали трещинки в крупных кристаллах топазов, уже выходящие к поверхности современных граней, и образовывали таким образом вторичные включения. Подобные включения при температуре в 40° содержат 79% водного раствора, 10,4% газовой фазы и 10,6% твердых фаз. Из них на минерал № 1 приходится 8,6%, на № 2—1,3%, на № 3—0,6% и на № 4—0,1%. Твердые фазы №№ 5 и 6 скорее всего отсутст-

¹ Ввиду малых давлений и низкой концентрации растворенных веществ, которая может быть установлена методом замораживания включений.

ТИПОВ ГОМОГЕНИЗАЦИИ ВКЛЮЧЕНИЙ МИНЕРАЛОБРАЗУЮЩЕЙ СРЕДЫ В ТОПАЗАХ ВОЛЫНИ И ШЕРЛОВОЙ ГОРЫ

Составил Н.П.Ермаков
1948 г.



вуют, во всяком случае они не наблюдались при значительных увеличениях микроскопа.

Процесс гомогенизации характеризуется следующими цифрами:

№№ наблюдений	Температура °С	% газа	% тверд. фазы 1	№№ наблюдений	Температура °С	% газа	% тверд. фазы 1
1	40	10,4	8,6	5	170	1,0	2,2
2	115	6,4	8,8	6	180	0,0	1,0
3	150	2,8	4,0	7	185	0,0	6,4
4	160	1,8	3,2	8	190	0,0	0,0

Построение кривых II не требует пояснений. Следует только отметить, что для двухфазовых включений с отношением газа и жидкости 10,4 : 89,6 гомогенизация происходит до температуры в 150°С. Таким образом, и здесь высокая концентрация веществ в минералообразующем растворе дала значительное повышение температуры гомогенизации. Гомогенизация включений в топазе Шерловой горы, содержащих относительно малое количество твердых фаз, протекала по первому типу. Газовый пузырек при температуре 40°С занимал 34,5% объема включения, жидкость 64%, твердые фазы 1,5%. Увеличение объема жидкости (и соответствующее уменьшение газового пузырька) характеризуется следующими цифрами (в%): 2)100°С — 68 жидкости, 3)150° — 72,4, 4)200°—75,9, 5)250°—79,3, 6)300°—82,5, 7)350°—85,9, 8)380°—88, 9)400°—89,5, 10)425°—93,1, 11)440°—94,8, 12)450°—96,6, 13)462°—100% жидкости, 0% газа.

Как видно из этих цифр, гомогенизация до 400°С протекала равномерно и медленно, от 400° до 440° она стала быстрее, а выше происходила еще быстрее. На кривой III диаграммы ход гомогенизации представлен наглядно.

В топазе Волыни вторичные включения, содержащие больше твердой фазы чем в этом опыте и меньше чем в опыте, относящемся к кривой I, при нормальной температуре содержали 22,6% газа. Гомогенизация их протекала по I типу исключительно равномерно, и исчезновение газовой фазы медленным уменьшением газового пузырька изображено не в виде кривой, а в виде почти прямой IV нашей диаграммы. Об этом можно судить на основании следующих замеров: 1) температура 25°С—22,6% газа, 2)100°—19,4, 3)150°—16,1, 4)200°—13, 5)250°—9,7, 6)300°—5,8, 7)350°С—2% газа, а при 375°С газовый пузырек исчез, но твердая фаза еще присутствовала. К сожалению, провести полную гомогенизацию включения не удалось.

Для второго типа газовой гомогенизации, по сравнению с первым типом, наблюдается обратная зависимость между температурой гомогенизации и отношениями фаз. Чем больший процент зани-

мает газовая фаза во включении (в указанном определенном интервале для этого типа гомогенизации, когда газа 76% или более), тем при более низких температурах осуществляется гомогенизация. Так, первичные включения в топазе Волыни при наличии газа, занимающего 88,2% всего объема, гомонизировались при температуре 270°C; при 79,3% — при температуре 400°C (микрофото № 7); при 76% газа гомогенизация при заполнении всего включения газовой фазой осуществлялась при 510°C.

На нашей диаграмме изображены кривые хода гомогенизации для этих случаев фазовых соотношений. Первый случай, с содержанием 11,8% жидкости и соответственно 88,2% газа, иллюстрируется кривой V, на которой видно последовательное уменьшение жидкости во включениях по мере нагревания. Ход гомогенизации следующий: 1) температура 20°C—11,8% жидкости, 2)100°—11,8, 3)150°—10,3, 4)200°—8,8, 5)250°—4,4, 6)260°—2,9, 7)270°—жидкость исчезла, и газ целиком заполнил включение. Таким образом, начиная с 200° и особенно с 250°C превращение жидкости в газ в замкнутой системе включений убыстрялось.

Второй случай, исходное положение включений которого зафиксировано на микрофотографии № 7, характеризовался следующим ходом гомогенизации, отраженным на кривой VI: 1)температура 20°C — 20,8% жидкости, 2)150° — 20,8, 3)200° — 19,8, 4)250° — 18,8, 5)300°—16,7, 6)350°—7,3, 7)370°—4,4, 8)380°—3, 9)400°—жидкость, хорошо различимая в левой части включения и справа занимающая 2,5 деления (микрофото № 7), полностью исчезла, и все включение стало черным.

Третий случай гомогенизации включений, содержащих 24% жидкости и 76% газа, иллюстрирован кривой VII, на которой видно, что до 200°C процентные соотношения фаз оставались почти неизменными, до 370° количество жидкости уменьшалось очень мало, а выше 375° началась довольно быстрая гомогенизация, закончившаяся при 510°C заполнением включения газовой фазой.

Проведенные опыты и установленные новые типы гомогенизации пока не позволяют нам разделить оптимистического утверждения Э. Ингерсона (127) о возможности уже теперь дать оценку истинным температурам отлагающих флюидов в надкритической области, если давление может быть установлено по геологическим данным¹. Во всяком случае, здесь предстоит еще очень много работы, прежде чем будут получены желаемые результаты. То же можно сказать и относительно минералов, содержащих включения, гомогенизирующиеся по промежуточному типу с «точкой инверсии».

Не имея возможности осветить здесь все разнообразие хода гомогенизации включений по третьему типу, мы возьмем для интервала объемных соотношений фаз от 50 до 76% газа только три типичных кривых.

На микрофотографии № 6 включение содержит при обычной температуре поверхности 66% газа и 34% жидкости. Главнейшие моменты в ходе гомогенизации этого и подобных ему включений

зафиксированы на микрофотографиях №№ 33, 34, 35 и 36 и на кривой VIII нашей диаграммы. Изменения в соотношениях фаз включения протекали следующим образом: 2) температура 150°C—64% газа (микрофото № 33), 3)250°—62,5, 4)290°—62,5, 5)330—88,8 (микрофото № 35), 6)340°—96, 7)350°—99, 8)355°—100% газа во включении (микрофото № 36). При охлаждении на 10—15° происходит восстановление положения 6, быстро прогрессирующее до положения 5 (микрофото 35) и т. д.

Как видно из приведенных данных, равномерное и очень медленное уменьшение газового пузырька в процессе нагревания парата сменилось при температуре 300°C очень быстрым его расширением, примерно 1% на 1° повышающейся температуры. Начиная с 300°, это расширение замедлилось, примерно, в 2,5 раза, причем двигавшаяся в сторону жидкости фазовая граница перемещалась вперед, как бы толчками, то наступая, то отталкиваясь назад и снова продвигаясь вперед в процессе нагревания. Гомогенизация наступила только при температуре 355°C. По этим причинам в точке 6 обнаружился новый перелом кривой.

Кривая IX нашей диаграммы представляет иные объемные соотношения фаз (58,2% газа и 41,8% жидкости), и здесь точки перелома кривой занимают другое положение. Ход гомогенизации, прослеженный в очень удачном по форме включении, следующий: 2) температуры 75°C—57,1% газа, 3)130° — 54,6, 4)180°—51,6, 5)200°—50,5, 6)215°—49,5, 7)235°—48,4, 8)250°—47,3, 9)260°—46,2, 10)270°—45,1, 11)280°—44,3, 12)290°—43,3, 13)300°—42,6, 14)310°—41,8, 15)320° — 41,7, 16)340° — 46,2, 17)350° — 50,5, 18)360° — 59,3, 19)365°—70,3, 20)375°—100% газа.

Как видно из этих данных, до температуры 315° газовый пузырек медленно сокращается, затем до 350° он расширяется, обнаруживая точку поворота («инверсии») при 315—320°. Начиная с температуры 350°, когда он занимает 50,5% объема, до температуры в 375° происходит быстрая гомогенизация движением границы фаз в сторону жидкости. Газовый пузырек разрастается со скоростью 2% на 1°. Очень сходный ход гомогенизации с инверсией был прослежен во включениях, изображенных на микрофотографии № 39 (микрофото № 40 фиксирует ее конечный результат) и на микрофотографии № 3. В последнем случае в исходном положении газа было 55%, жидкости 45%, и, таким образом, он представляет собою крайний случай для рассматриваемого интервала. До 150° происходило почти незаметное уменьшение газовой фазы, от 150 до 330° газ сократился до 42%, затем началось его расширение, медленное до 360°, когда он занял исходное положение, и очень быстрое в дальнейшем, до момента гомогенизации при температуре 380—390°.

Для интервала в соотношениях фаз, характеризующегося 55—76% газа и соответственно 45—24% жидкости, на основании целой серии опытов устанавливается, что чем больший процент газовой фазы во включениях, тем ниже в температурном отношении находятся точки гомогенизации и инверсии.

У границы пневматолитического и гидротермального этапов, где

¹ См. нашу критическую заметку в Минерал. сборнике № 3 Львовск. геол. об-ва (1949).

отношения газа к жидкости во включениях очень близки 1 : 1 (газа больше на 2—4%), ход гомогенизации включений оказался несколько своеобразным. На микрофотографии № 1 зафиксированы подобные включения, содержащие 54% газа. Гомогенизация их протекала следующим образом: 1) 20°С—54% газа, 2) 100°—52,7, 3) 150°—51, 4) 200°—48,6, 5) 250°—43,2, 6) 270°—40, 7) 300°—37, 8) 320°—32,4, 9) 335°—32,2, 10) 350°—30, 11) 360°—произошел мгновенный сдвиг фазовой границы в сторону жидкости, а при 362°С наступила внезапная гомогенизация, причем, по существу, невозможно было решить, какая же фаза, жидкая или газовая, заполнила все включение. Поэтому кривую X нашей диаграммы мы были вынуждены оборвать. Повторные опыты показывали ту же картину. Для ее уяснения нам удалось подобрать особенно крупное трубчатое включение, имеющее около 0,5 мм в длину и 0,05 мм в толщину. Это включение изображено на микрофотографиях №№ 37, 38. Ход гомогенизации, представленный на кривой XI, оказался следующим: 1) 20°С—53% газа 2) 150°—48,5, 3) 200°—45, 4) 250°—38,5, 5) 300°—31, 6) 310°—28,5, 7) 315°—25,7, 8) 320°—23, 9) 325°—21% и мгновенный сдвиг фазовой границы в сторону жидкости, не дающий возможности производства каких-либо измерений. Уменьшавшийся газовый пузырек не начинает разрастаться или постепенно сходить на нет, а, будучи еще довольно крупным (21% всего объема включения), мгновенно исчезает и мгновенно появляется при малейшем охлаждении препарата ниже 325°. Уже сравнение результатов двух приведенных опытов показывает, что для пограничной между выделенными этапами области диаграммы, характеризующейся гомогенизацией с «критической точкой», небольшое увеличение жидкости по отношению к газу резко отклоняет кривую вправо.

В одном из препаратов бесцветного топаза Волыни были встречены включения с 50% газа, 49% жидкости и 1% твердой фазы. Изменение фазовых отношений нагреванием показало следующий гидротермальный ход гомогенизации: 2) температура 100°С—47% газа, 3) 150°—44,8, 4) 170°—43,5, 5) 200°С—41,4, 6) 250°—37,1, 7) 275°—34,5, 8) 300°—31, 9) 320°—29,5 10) 330°—27,6, 11) 340°—24,1, 12) 345°—20% и 13) очень быстрое уничтожение еще крупного газового пузырька быстрым передвижением фазовой границы в сторону газа со скоростью увеличения объема на 4% при повышении температуры на 1°. Гомогенизация наступила при температуре 350—352°, но остатки твердой фазы в некоторых включениях еще можно было установить. Уменьшение температуры всего на 3—4° вызывает очень быстрое восстановление газовых пузырьков, появляющихся из противоположного месту гомогенизации конца включения и образующих один общий крупный газовый пузырек. Ход гомогенизации очень быстрым уничтожением газовой фазы виден на кривой XII нашей диаграммы, представляющей собою почти негативное отображение кривой VIII гомогенизации в газовой фазе с точкой инверсии. Точка перелома на кривой XII наступила при температуре 340°, причем теоретически можно предвидеть, что некоторое дальнейшее увеличение процента жидкости в подобных вклю-

чениях вблизи границы пневматолитического и гидротермального этапов вызовет повышение этой температурной точки на нашей диаграмме.

Подведем некоторые итоги рассмотрению типов и видов гомогенизации включений минералообразующей среды, отображенных на диаграмме в виде эмпирических кривых. Таких кривых мы вывели значительно больше не только для топаза, но и для других минералов. На диаграмме приведено минимально необходимое их количество для иллюстрации выводов по затронутой нами теме.

В намеченных выше интервалах различных фазовых соотношений, для которых характерны свои типы и виды кривых хода гомогенизации, намечается ряд закономерностей, которые следует подчеркнуть.

Первый тип гомогенизации, иллюстрирующийся типичными кривыми I, II и III нашей диаграммы, характерен плавным уменьшением до точечных размеров и конечным исчезновением газового пузырька и твердых фаз во включениях. Для жидких двухфазовых включений в низкотемпературных гидротермальных минералах величина газового пузырька и температура гомогенизации находятся в зависимости друг от друга (чем больше газовый пузырек, тем выше температура). Такая взаимозависимость выдерживается до температуры 200°С и относительной величины газового пузырька от 1% до 21%. Наличие твердых фаз во включениях значительно повышает температуру гомогенизации и нарушает эту зависимость. Относительное объемное количество твердых фаз, по сравнению с другими фазами во включениях, начиная с температур гомогенизации, примерно, в 150°, увеличивается, достигая максимума около 300°С при 20% объема газового пузырька, а затем доходит до минимума при 50% объема на границе гидротермального и пневматолитического этапов. Ход гомогенизации здесь иллюстрируется особым видом кривой XII с резкой точкой перелома, за которой еще крупный газовый пузырек очень быстро уменьшается и сходит на нет.

Второй тип гомогенизации иллюстрируется кривыми V, VI и VII с последовательным увеличением газовой фазы, в конце нагревания заполняющей все включения. В противоположность первому типу, здесь величина газового пузырька, при обычной температуре поверхности занимающего больше 76% объема, обратно пропорциональна температуре гомогенизации (чем больше газовый пузырек, тем ниже температура гомогенизации). Твердые фазы внутри включений почти не встречаются.

Третий тип «поворотной» гомогенизации (с точкой инверсии) кривые VIII и IX характерны для средней области нашей диаграммы с отношением газового пузырька к объему всего включения от 55 до 76%. Величина газового пузырька в этом интервале так же, как и для второго типа, обратно пропорциональна температуре гомогенизации, а температура точки инверсии становится ниже, если газовый пузы-

рек при комнатной температуре занимает в указанных пределах больший относительный объем.

Вид «критической» гомогенизации, осуществляющийся внезапным исчезновением границы фазового раздела или, в последний момент, мгновенным проскальзыванием ее в сторону жидкости, как это показано на кривых X и XI, характерен для пограничной между пневмолитическим и гидротермальным этапами узкой области с относительным объемом газового пузырька в 51—55%.

Опыты по изучению типов и видов гомогенизации включений минералообразующей среды, конечно, еще не достигли желательной полноты. Они нуждаются в проверке и уточнении на разнообразном природном материале из различных месторождений. Однако автор считал полезным уже сейчас привести эти данные, чтобы к продолжению подобной работы привлечь внимание других исследователей, а к ее физико-химической интерпретации наших выдающихся специалистов.

Результаты подобной коллективной работы трудно предвидеть, и, может быть, температурное положение «точки инверсии» и «критической точки» сможет оказать, например, существенную помощь для определения внешних давлений при формировании месторождений в надкритической области.

В настоящее время нам ясно одно, что если в определениях температур минералообразующих газо-флюидов по включениям нужно подойти еще с большей осторожностью, то выявленные в природных минералах типы гомогенизации их включений позволят объективно определять пределы участия растворов того или иного агрегатного состояния в образовании месторождений. Кстати сказать, температура не может служить критерием для разделения пневмолитового и гидротермального минералообразования.

Нижний предел ограничивается письменным гранитом и другими минералообразованиями, содержащими затвердевшие включения, верхний предел их деятельности ограничивается минералообразованиями, содержащими первичные жидкие двух- и однофазовые включения.

Различные соотношения фаз, наблюдающиеся во включениях при температуре поверхности, изображенные на микрофотографиях, позволяют проследить эволюцию материнской среды в пределах газо-флюидного этапа и уже сейчас разделить его на две стадии: первую — собственно пневмолитическую, первичные включения в минералах которой гомогенизируются по II типу, и вторую «газоводную», в первичных включениях минералов которой устанавливается «поворотная гомогенизация» III типа или гомогенизация «критической точкой».

Таким образом, если попрежнему будет необходимо выделять между группой собственно пневмолитических месторождений и группой гидротермальных месторождений переходную между ними группу

пневматогидатогенных минералов и месторождений, то, может быть, третий тип гомогенизации включений с содержанием в них газовой фазы от 50 до 76% и явится тем, отсутствующим до настоящего времени, критерием для распознавания минералов этой группы.

Следует отметить, что во включениях «эпимагматических» минералов наблюдаются пузырьки «сухих» газов (микрофотографии 46 и 47), в которых жидкая фаза отсутствует или распределена тонкой пленкой по стенкам включения в количестве, колеблющемся, по видимому, в пределах около 4—5%. Естественно, что для вторичных включений могут встречаться в этих минералах разнообразные объемные соотношения этих фаз.

7. ЖИДКИЕ ВКЛЮЧЕНИЯ И ЭТАП ГИДРОТЕРМАЛЬНОГО МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЯ

Большой интерес для темы нашей работы имеют включения водных растворов, которые могут быть в условиях поверхности однофазовыми, двухфазовыми и многофазовыми (35). Эти виды включений являются не только показателями состояния минералообразующей среды как водного раствора, но и предоставляют исследователям возможность получить определенные указания о температуре образования гидротермальных минералов или, по меньшей мере, иметь суждения о нижнем пределе температур в условиях значительных внешних давлений (32).

Исследование ряда природных минералов холодноводного происхождения, проведенное нами получение искусственных кристаллов из холодных и теплых растворов, а также опыты с включениями растворов в прозрачной пластмассе показали, что для подобных случаев минералообразования в период кристаллизации возникают только однофазовые включения водных растворов (вид «а» нашей схемы I, см. стр. 18—19). Эти опыты, с достаточной степенью уверенности, позволяют рассматривать аналогичные однофазовые жидкие включения в природных минералах в качестве критериев распознавания холодноводного или тепловодного происхождения природных минералов.

Здесь следует оговориться, что в кристаллах галита, сильвина, карналлита и других легкорастворимых минералов часто можно наблюдать также и двухфазовые включения, что, как показали последние наши опыты, никоим образом не может рассматриваться как показатель горячего состояния растворов. Дело оказалось в том, что в подобных минералах газовые пузырьки образуются с течением времени, а иногда и довольно быстро, в связи с «усыханием» жидкости этих включений вследствие некоторой диффузии ее через стенки пор в подобных минералах. В то же время мы должны констатировать отсутствие подобной проницаемости для подавляющего большинства остальных природных минералов, например, кварца, гипса, кальцита, флюорита и многих других. Это утверждение можно подтвердить как экспериментальными данными, так и, главным образом, самим фактом наличия

однофазовых включений в кристаллах кварца из Мармароша, да-толита и апсфиллита последних генераций из Тетюхе, гипса из раз-ных мест, флюорита последней генерации из Забайкалья, целестина из Пинегы, анальцита из Архангельской области, а также вклю-чений жидкой уголекислоты с внутренним давлением более 50 ат-мосфер, сохранившейся во многих минералах. Совершенно несом-ненно, что эти минералы, образовавшиеся многие десятки миллио-нов лет тому назад, в течение этого времени надежно сохраняли в своих порах гомогенные жидкие включения и включения жидкой уголекислоты. В то же время кристаллы галита, сильвина и квасцов не гарантируют надежной изоляции включений, и в однофазовых жидких включениях, располагающихся в периферических зонах кри-сталлов, возникают газовые пузырьки даже на второй или третий день, а во внутренних зонах позднее. Проводящиеся нами в течение последних лет наблюдения за крупным ограненным макровключе-нием (длина 7 мм, ширина 5 мм, высота 3,7 мм) в природном кри-сталле галита из месторождения Велички показали медленное, но все же заметное, увеличение в нем из года в год газового пузырька за счет подобной проницаемости (диаметр последнего увеличился за 3 года с 3,8 до 4 мм).

В последние годы за границей и в особенности в Америке резко возрос интерес к исследованиям минералообразующей среды, со-хранившейся во включениях. Из номера в номер в *Economic Geology* и *American Mineralogist* начали появляться статьи, посвященные этому вопросу (Твенхофел, Ингерсон, Скотт и др.). Од-нако отсутствие там систематической работы над включениями при-вело к тому, что в этих статьях обнаруживается большая отста-лость во многих радикальных вопросах, касающихся природы вклю-чений, методики их исследования и границ их применения при раз-решении геологических проблем. В работе Скотта (133) и в осо-бенности в статье Р. Драйера, Р. Гаррельса и А. Хов-ланда (134), появившейся в последних номерах *American Mine-ralogist*, авторы пытаются определять методом гомогенизации вклю-чений в галите бывшие температуры рапы, отлагавшей соль Канзас-ских месторождений пермского возраста. Получив температуры го-могенизации, варьирующие от 70 до 100°C, они объясняют столь высокие температуры минералообразования на поверхности земли теплом, якобы возникающим в результате экзотермических реак-ций в процессе кристаллизации соли. Таким образом, не понимая указанных нами выше причин аномальной гетерогенности включе-ний в галите и вытекающей из них недопустимости использования подобных «аномальных» включений в минералогической термоме-трии, они пришли к большим заблуждениям.

Двухфазовые и многофазовые включения в гидротермальных минералах распространены очень широко. Образование в них твер-дых фаз, как показали наши опыты, проведенные с участием асс. В. Ф. Лесняка, зависит не только от высокой температуры раство-ров, но и от степени насыщения их чуждыми кристаллу-хозяйину веществами. Так, в квасцах удалось воспроизвести первичные трех-фазовые включения с «внутренними кристаллами» сильвина всего

при температуре в 70°C. В природных минералах, однако, трех- и многофазовые включения обычно наблюдаются в кристаллах, обра-зовавшихся при температуре выше 150°C. После окончания процес-са минералообразования включения, благодаря понижению темпе-ратуры и пересыщению растворов в порах минералов, превраща-лись в гетерогенные. В условиях поверхности, наконец, отношения разных фаз достигали наибольшего значения, и они являются ис-ходными при термометрических исследованиях минералов.

Проведенные нами опыты с искусственным выращиванием кри-сталлов из водных растворов показывают, что возникновение обо-собленного газового пузырька во включениях начинается обычно с температур 65—70°C, причем эти температуры могут несколько варьировать в зависимости от формы и размеров включений. После охлаждения кристаллов объем подобных пузырьков при темпе-ратурах от 65 до 90° изменяется в пределах от 1,5 до 3% всего объема поры. Обособленные газовые пузырьки во вторичных вклю-чениях природных растворов более низких температур были обнару-жены только в кварце Полярного Урала, где они занимали 0,7% объема и гомогенизировались при температуре в 55°C.

Весьма вероятно, что, как показывают опыты и просмотр мно-гочисленных природных минералов, вследствие незначительной ве-личины сокращения объема слабо нагретой маточной жидкости, в капсулированных растворах, имеющих температуру ниже 50°C, обособленные газовые пузырьки не возникают, за исключением ука-занных выше случаев, связанных с «усыханием» включений в лег-корастворимых минералах.

Наличие однофазовых жидких включений в минералах, по свое-му парагенезису являющихся даже гидротермальными, должно истолковываться как критерий их образования из растворов, име-ющих температуру ниже 50—60°C. Таким образом, эта нижняя тем-пературная граница, объективно устанавливающая по однофазовым и двухфазовым включениям в минералах, может служить показате-лем нагретого или холодного состояния водных растворов, участ-вующих в минералообразовании.

Разрешение вопроса о том, вадозное или ювенильное про-исхождение имеют минералообразующие растворы, весьма ослож-няется тем обстоятельством, что в верхней зоне циркуляции раство-ров безусловно происходит смешивание тех и других.

Кроме того, и «метаморфогенные растворы», как это показали А. Н. Заварицкий (40) и затем А. Г. Бетехтин (8), играют существенную роль в процессах минералообразования. Дискусии о происхождении месторождений пьезо- и оптических минералов (18, 33, 34, 61, 66) показывают нам, что далеко не всегда оказывается возможным отличать горячие метаморфогенные растворы, форми-рующие месторождения альпийского типа, от растворов, тесно свя-занных в происхождении своего минерального содержимого с маг-матическим очагом, т. е. собственно гидротермальными. Последние, однако, трудно представить стерильно магматогенными без обога-щения теми или иными минеральными компонентами из вмещаю-щих пород, измененность которых на путях длительного странст-

вованя растворов широко известна. Активность гидротерм, несомненно, повышается от наличия в них углекислоты, играющей большую роль в минералообразовании и часто встречающейся во включениях девятого типа (см. нашу схему I) и сложных включениях (см. микрофото 41, 42).

Таким образом, при определении самого понятия «гидротермальный раствор» мы сталкиваемся с большими затруднениями. Давно ведущий спор по этому вопросу вряд ли можно считать окончательно завершенным. В верхней зоне земли несомненно происходит смешивание истинно гидротермальных растворов с нагретыми метаморфогенными и даже водозными растворами, образующими «псевдогидротермы» (34).

Конечно, по геологическим данным, каждый раз учитывая всю историю развития процессов минералообразования, мы в общих чертах можем с большой долей вероятности установить какое происхождение, магматическое или поверхностное, имели минералообразующие растворы. Особенно успешно это делается на месторождениях с учетом богатого опыта изменений минералов под влиянием несомненно поверхностных растворов (95). Вадозные воды, циркулирующие даже на глубине в 1 км, где уже прекращается влияние колебаний температурных условий поверхности (пояс вековых температур), вряд ли могли быть нагретыми выше 34°C (89) и, следовательно, в продуктах их отложения мы не можем встретить (за исключением отмеченных ранее аномальных случаев) двухфазовых жидких включений.

В то же время в продуктах угасания несомненно гидротермального процесса (флюориты Забайкалья, некоторые минералы Тетюхе и других месторождений) мы также встречаемся с однофазовыми включениями, характерными для холодноводных и тепловодных минералов.

Поэтому, говоря о нижнем температурном пределе развития гидротермального процесса, следует учитывать среди продуктов последнего и холодноводные минералы, которые в генетическом отношении нуждаются в подразделении на магматогенные и экзогенные. Таким образом, мы, во-первых, приходим к выводу о том, что гидротермальный процесс может начинаться значительно выше критической температуры воды¹ (топазы Шерловой горы — 460°C) и заканчиваться отложением минералов с однофазовыми включениями при температуре ниже 50°C². С другой стороны, вадозные растворы, а тем более растворы метаморфогенные, при циркуляции на глубине в 2 км и более, отлагают минералы, в которых возникают двухфазовые включения.

¹ Само собою разумеется, начало образования гидротермальных растворов, в зависимости от конкретных условий, может лежать и при более низких температурах, но оно только в порядке исключения может совпадать с критической температурой воды в 374°C.

² Здесь любопытно отметить, что по экспериментам Н. И. Хитарова и др. (110) в водном растворе гидрата окиси алюминия критические явления не развивались до 460°C при концентрации всего 0,17 мол/л, а для едкого натра 442,3°C при концентрации 0,22 мол/л.

8. СХЕМА ГЛАВНЕЙШИХ ЭТАПОВ И СТАДИЙ РАЗВИТИЯ ПРОЦЕССОВ РУДООБРАЗОВАНИЯ

Если исключить вопросы генезиса внутриматических и осадочных месторождений, а также месторождений зоны выветривания, столь обстоятельно разработанные нашими учеными, в теории внемагматического рудообразования успехи пока «более чем скромные». «Неудовлетворительными представляются основные положения учения о магматогенных рудных месторождениях» (96). Именно этих-то положений мы и касались на основании исследования минералообразующей среды, захваченной и сохраненной во включениях самими минералами. Когда подобные исследования привлекут широкий круг советских геологов и минералогов, будет создана общая стройная теория рудообразования, фрагменты которой начинают вырисовываться уже сейчас.

Период магматической активности, в результате которой возникли минеральные сообщества тех или иных рудных месторождений, в приводимой нами схеме II, подразделяется на этапы и стадии, для которых были выявлены объективные критерии их распознавания.

Каждый этап ограничивается пределами действия изменяющейся во времени и пространстве минералообразующей среды, сохраняющей, однако, общее свое состояние в пределах этапа. Этапы отграничиваются один от другого, соседнего, скачкообразными превращениями среды, следствием которых являются резкие качественные и количественные изменения в минеральных сообществах и их структурах.

Стадия охватывает некоторый промежуток эволюционного развития процесса. Она характеризуется изменениями ряда физико-химических факторов, реализующихся не в превращениях общего состояния среды, а в качественных и количественных ее особенностях на данном отрезке течения процесса. Например, в 1-й стадии пневматолитического процесса во включениях наблюдается увеличивающееся до 25% количество водяных паров, а в конце 2-й стадии, перед превращением газообразной среды в жидкость, водяные пары составляют не менее 45—50% раствора.

Минералообразование в пределах одного этапа или даже стадии отнюдь не равномерный, спокойный процесс. Сопровождаясь непрерывными изменениями химизма среды, мягкими и резкими скачками в температуре и давлении, этот процесс, как бы спроектированный на экран каждого данного месторождения в суммарном виде, благодаря наличию различных минеральных генераций и модификаций, представляется непрерывно-прерывистым. Даже отдельные, например, зонарные, кристаллы выдают целый ряд мелких и мельчайших прерывов постепенности, наиболее ярко вражающихся в период роста в образовании зон, в изменениях кристаллической формы, в растворении и регенерации и т. д. Таким образом, можно говорить лишь об относительной спокойном эволюционном развитии в пределах этапа, противоположном бурным превращениям на его границах.

На нашей схеме II, в графе 10-й, в пределах каждого этапа можно видеть доминирующее значение главнейших минералов. Это представляет собою результат естественного отбора среди них, происходящего в процессе изменения минералообразующей среды. Однако и в отдельных минералах улавливается также процесс развития — изменение их состава, кристаллографической формы, окраски, оптических свойств, плотности и т. д.

Проведенное в схеме II разделение на этапы и стадии показывает нам направление развития минералообразующей среды (слева направо) в определенной хронологической последовательности. Таким образом, оно дает понятие и об относительном в определенном положении месторождений и их минеральных сообществах, формировавшихся на протяжении жизни одного и того же магматического очага.

Стрелки 3-й графы схемы II показывают пределы существования обогащенного «сухими» газами расплава, сильно кислого газораствора (эволюционирующего до кислого и, возможно, нейтрального газодного раствора) и водного щелочного раствора¹, в котором растворенные вещества частично переходят от молекулярных к коллоидным.

Графы 4-я, 5-я, 6-я и 7-я представляют отсутствовавшие до сих пор объективные физико-химические данные, полученные из непосредственных наблюдений в природных минералах и подтвержденные экспериментами над искусственными кристаллами. Они являются главными для всей схемы и, как было показано выше, позволяют объективно различать выделенные этапы и стадии в минеральных месторождениях. Последние, таким образом, находят свое место в общем процессе минералообразования.

Интервалы максимальной и минимальной температур пневматолитического и гидротермального этапов 8-й графы представляют собою результат многих сотен экспериментов по определению температур методом гомогенизации включений. При последующих дополнительных исследованиях они могут несколько измениться. Это касается, главным образом, минимальной цифры, полученной для пневматолитического минерала, и максимальной цифры, характеризующей температуру гидротермального минерала. Не вызывает сомнений, что в фазовых превращениях минералообразующей среды весьма существенную роль играет концентрация растворов и внешнее давление, которые для разных месторождений варьируют в широких пределах. В частности, весьма вероятное наличие сильных кислот в газорастворах, повидимому, должно понижать их критическую температуру, поэтому в условиях малого внешнего давления последняя может оказаться меньше чем 250°C, а при высоких давлениях и концентрациях веществ в растворах гидротермальные минералы могут образоваться и при температуре выше чем полученная нами цифра в 460°C.

В графе 9-й схемы II приводится общий характер жильного заполнения, различный для разных этапов.

¹ Автор считает, что pH в растворах включений можно определять, но это, к сожалению, никем еще не было проделано.

СХЕМА ЭТАПОВ И СТАДИЙ РАЗВИТИЯ МИНЕРАЛООБРАЗУЮЩИХ МАГМАТИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДНЫХ И КРИТЕРИИ ИХ ПОЗНАВАНИЯ

Составил *И. И. Макаров*

19

1	Этапы	I Магматический		II Пневматический	III Гидротермальный			
2	Стадии	Внутри-магматическая	1. Аппит-Пегматитовая (газорасплава)	2. Пневматитовая (газовая)	3. Плазменная (газо-водная)	4. Высоко-температурная	5. Низко-температурная	6. Холодно-водная
3	Состояние минералообразующей среды и характерные реакции	Расплавы	Газорасплавы (кремнеземистый)	Газораст	Флюиды (сильно кислые, кислые и нейтральных)	Водные растворы (Щелочные, истинные и коллоидные)		
4	Критерии и различия по условиям среды	Группы	Затвердевшие	Газы	Жидкие			
5		Типы	"Письменные"	Собственно-газовые (пневматитовые)	Водных растворов			
6		Виды	Пассивные и активные	Двухфазовые (газа более 75% объема)	и многофазовые (от 50 до 76% объема)	Двухфазовые (газа от 21 до 45-50%)	Двухфазовые (газа от 1 до 21% объема)	Однофазовые
7	Типы	Гомогенизации		II тип (пневматический)	I тип (гидротермальный)			
8	Интервалы температур		от 800 до 600 °C	от 600 до 200 °C	от 460 до 200 °C	от 200 до 50 °C	< 50 °C	
9	Характер жильного заполнения		Аппиты и др. жильные породы	Лазонное заполнение минеральными породами	Зонарное заполнение трещин минералами	"Сухие" трещины альпийских жил последовательной кристаллизации, крустификация и монофазовые текстуры		
10	Главнейшие минеральные сообщества и их преобразования (в предварительном виде)		Кварц (без призм) Плагиоклазы, ортоклаз, микроклин Биотит, лепидомелан Турмалиновое "солнце" и исландские шерпы Ильменит Альмандин Ортит, монацит, магнетит	Морионы, раухтопазы Микроклин (амазонит) Мусковит Циннвальд Шерпы и синие турмалины Янвмарин и другие бериллы Топазы синие, вишне-желтые	Кварцы Альбит Идидит Эпидолит Хромные турмалины Бериллы плоские и столбчатые. Воробьевит Синие, фиолетовые, розовые, желтые Криолит Карбонаты?	Призматические кварцы Адуляр, альбит Жильбертит, кунцит, серицит Исландские шерпы Очень мелкие кристаллы берилла Мелкие кристаллы топазов "Камеви зубы" Фиолетовые и зелено-голубые Сидерит, аннерит, родохрозит, доломит, витерит, барит Намрит, гаптузит, диннит, монтмариллонит Базомелан, рутил исландский Касситерит, арсеналит, сфалерит, вольфрамит, лиротин, халькопирит, гематит, пирит, египетит, антимонит, киннабар, висмутин, блестящие руды, реальгар	Розовые кристаллы флюорита Абачно-зеленые и бесцветные кубы флюорита Сидерит, аннерит, родохрозит, доломит, витерит, барит Арагонит, цеолиты, гипс	
11	Главнейшие процессы замещения		Турмалинизация Грейзензация Мусковитизация	Битизация Эпидолитизация Силификация	Разведение пневматических минералов Жильбертитизация Кунцитизация	Цеолитизация Каолинизация		

Графа 10-я должна способствовать полевой генетической диагностике минеральных месторождений. Однако она, будучи правильной только в общих чертах, нуждается еще в дополнениях и исправлениях путем проведения дальнейших термометрических исследований включений в минералах. Ряды минералов, фиксированные в таблице на основании огромного опыта многих геологов, сами по себе дают еще относительно бедное, схематическое, отображение развития минеральной природы и пределов возникновения минералов в общем ходе развития магматических производных. В зависимости от температурных и иных изменений материнской среды, как уже отмечалось, меняется их состав, форма, удельный вес, окраска, оптические свойства, которые находятся в тесной взаимосвязи друг с другом, так как факторы, обуславливающие эволюцию, являются для них общими. В природе намечается взаимозависимость физических свойств минералов, например, кристаллографической формы и окраски (41), выявление которых, к сожалению, еще не привлекло должного внимания исследователей. Повидимому, процесс изменения минералообразующей среды и образования минералов в течение каждого периода магматической активности был направлен в сторону возникновения все более сложных по строению и стереохимии, но более однородных кристаллических систем (108). Однако в пределах разных этапов мы наблюдаем некоторую повторяемость свойств на новой основе, проявляющуюся наиболее наглядно, например, в порядке смены цветов минералов (см. берилл, турмалин, флюорит, кварц). Эти закономерности требуют для своего выявления глубоких исследований минералов, которые, естественно, не были бы оторваны от изучения остатков минералообразующей среды, в них законсервированных.

В 11-й графе представлена схема последовательности в процессах замещения продуктов отложения предшествующего этапа или стадии и минералов вмещающих пород, осуществляющихся при накладываемом минералообразовании. Выяснение хода процессов метаморфических изменений, столь распространенных в природе, существенно облегчается исследованиями вторичных включений растворов, участвующих в этих процессах. Является совершенно обычным, что новообразования каждого этапа откладываются уже на измененных продуктах предшествовавшего этапа. Пневмато-метаморфизм пород и минералов обычно создает фон гидротермальному минералообразованию.

Необходимо резюмировать некоторые данные по этапам, рассматривая схему II в вертикальном направлении. В нашей статье не затрагиваются вопросы внутриматматического минералообразования, поэтому в этой схеме не приведено данных, к нему относящихся.

Мы начинаем рассмотрение только с последней («эпимагматической») стадии магматического этапа, являющейся для внемагматических производных начальной. По времени ей могли предшествовать только первые моменты очень сложного процесса образова-

ния контактовых месторождений, не рассматривающегося нами, моменты, относящиеся к начальному периоду внедрения интрузии, когда она, еще не успев начать своего нормального развития, вызвала на контакте пирометаморфизм вмещающих пород и выделила в них первые порции летучих. Только с образованием замкнутой, точнее периодически замкнутой системы, чему содействовало возникновение твердой периферической магматогенной оболочки активного очага, началось нормальное развитие последнего. С этого времени магматическое минералообразование может рассматриваться как непрерывно-прерывистый эволюционный процесс, приводящий, в частности, к обогащению летучими верхней части очага с образованием здесь расплава обогащенного газами. Когда под влиянием усиливающегося внутреннего давления и внешних, например, тектонических, причин нарушается замкнутость системы, а это повторяется периодически, магматические производные начинают свое длительное развитие на путях продвижения вверх, в активном взаимодействии с геологической обстановкой.

В первой начальной стадии выдавливается в трещины магматический расплав, «остаточный» только для данного момента вскрытия системы, а таких моментов, после периодических замыканий и отодвигания вглубь активного магматического очага, как это показали В. И. Кузнецов (59), и Е. В. Шевченко (117), может быть несколько. Быстрое охлаждение и удаление из такого расплава летучих вызывает образование аплитов, характеризующихся, в отличие от письменных гранитов, образованием кристаллов кварца с собственной огранкой и мелкозернистой и панидиоморфной или порфириовидной структурой. Для аплитов характерно также развитие плагиоклазов и, иногда, зональное отложение граната и магнетита. В некоторых, чаще узких, трещинах минералообразование на этом может закончиться. В других, более обычных случаях, аплиты образуют лишь наружное окаймление трещин, а внутренняя часть их целиком или частично заполняется кристаллами олигоклаза с лейстами биотита, а затем кристаллами ортоклаза или микроклина. Наличие в последних многочисленных «письменных» включений «кремнеземистого» расплава, позднее или одновременно затвердевавших, обуславливает столь характерную графическую структуру пегматитов. Эти затвердевшие включения, целиком или почти целиком выполняющие поры в минералах твердым веществом кварца (в противоположность аплитам не имеющего свойственной ему кристаллографической огранки), могут характеризовать существовавшую минералообразующую среду только в виде расплава, возможно представляющего собою на этой стадии даже две не смешивающиеся жидкости. В случае резкого преобладания в расплаве кремнезема, избыточные остатки последнего, не плененные во включениях полевых шпатов и не израсходованные на образование кристаллического кварца аплитов, могут отложиться в средней части пегматитовой жилы в виде массы кварца, образующей так называемые силикситы, наблюдающиеся в пегматитах с блоковой структурой. На этом моменте, если он совмещен с прочным замыканием трещины, для отдельных жил может

также оборваться процесс минералообразования, а последующие порции магматических дериватов пройдут вверх через иные пути.

К сожалению, мы здесь не имеем возможности рассмотреть очень важный вопрос о происхождении, существовании и замыкании путей циркуляции магматических производных. Эти пути, возникшие по той или иной причине, имеют тенденцию быстро замкнуться вследствие большого давления сверху и с боков, чему противодействует давление из магматического очага, передающееся через немагматические расплавы и растворы. В сложном процессе формирования жил мощность, минералогический состав и строение последних зависят частично от результата борьбы указанных противоположных тенденций.

По нашим представлениям 1-я аплит-пегматитовая стадия немагматического минералообразования является по времени самой непродолжительной, хотя «остаточный» расплав, сильно обогащенный газами, может выдавливаться за пределы тела образующейся интрузии несколько раз, при повторных нарушениях замкнутости магматического очага. Замкнутость системы последнего менее характерна для первого периода его истории. Именно в этот период и образуется главная масса немагматических месторождений, начиная с момента, когда высокое напряжение, накопившееся внутри магматического очага, обуславливает расколы в его коре и выдавливание магматических производных в виде своеобразного «остаточного» расплава. После ослабления напряжения магматические производные отгоняются вверх только в виде газообразных продуктов, создающих на путях продвижения, чаще всего в средней части жил письменных гранитов, пневматолитическую среду минералообразования. Это изменение среды не осуществляется постепенно, пегматитовый расплав вне магматического очага не существует длительное время в различных условиях температуры и давления, а относительно быстро кристаллизуется в нижней части путей продвижения, уступая свое место новому пневматолитическому процессу минералообразования.

Толкование А. Н. Заварицкого (43) пегматитов как метаморфогенных образований, возникших в результате перекристаллизации гранитов вдоль проводящих флюиды трещин, нам представляется убедительным только для крупнокристаллических кварцполевошпатовых пород, не содержащих ихтиоглифтов. Вполне возможно что и ряд аплитовидных пород имеет сходное происхождение, на что в последнее время указывал Д. С. Белякин (4). Однако термин «пегматиты» стал уже объединять такие различные по способу образования минеральные жилы, что отрицание или утверждение того или иного происхождения пегматитовых жил одного типа уже не может распространяться на все пегматиты в целом. Говоря о пегматитах представляется необходимым каждый раз указывать, что имеется в виду, — письменные ли граниты, силекситовые «блоковые» пегматиты, метаморфогенные пегматиты, пневматолитические и гидротермальные пегматиты и ча-

сти пегматитовых жил, нейтрализованные пегматиты (20) или еще какие-либо образования.

Действие газовых растворов осуществлялось в большом интервале температур и давлений. Длительность их действия обуславливалась продолжительным пульсирующим характером дистилляции металлоносных газов и паров. Изменения в количественных соотношениях последних происходят во времени, в связи с тем, что предел насыщения расплава и упругость пара для летучих компонентов различны. Состав газовой среды минералообразования последовательно изменяется во времени и пространстве (на путях ее передвижения).

Развитие среды во времени существенно зависит не только от изменения температуры и давления, но и от внешней различной геологической обстановки, которая пeverно отождествляется иногда со средой. Эти изменения обуславливают отложение тех или иных продуктов на различных по отношению к контакту интрузии горизонтах минералообразования, сменяющих друг друга по мере отодвигания вглубь активной части магматического очага. Подобное эволюционное изменение газовой среды сопровождается все большим увеличением в ней количества водяного пара, что при соотношении 3:1 приводит к образованию газопарных растворов. В последних различные газы по сравнению с водяными парами приобретают все меньшее и меньшее значение, а затем, примерно при соотношении их 1:1, наступает скачкообразный переход их в водный раствор. Высокое содержание паров воды в 3-й стадии развития магматических производных существенно изменяет дальнейший ход процесса немагматического минералообразования.

Многими исследователями принимается, с учетом упругости пара различных компонентов, что газовая среда обладает кислой реакцией, постепенно ослабляющейся, а жидкий водный раствор имеет уже щелочные свойства. Это представление базируется на наблюдениях за вулканическими эманациями и на том факте, что карбонаты не характерны для пневматолитического этапа и так обычны для гидротермального этапа развития магматических производных. Однако только дальнейшие исследования включений, сопровождающиеся определениями pH, могут внести полную определенность в этот вопрос.

Концентрация веществ в газовых растворах в общем значительно ниже чем в гидротермальных растворах. По включениям, однако, можно судить, что она, по сравнению с «сухими» газами, существенно повышается в газопарных растворах, хотя пока мы еще не можем выразить этого цифрами. Для гидротермальных растворов нами были уже произведены некоторые подсчеты по трехфазовым и многофазовым включениям, которые для 4-й стадии показывают содержание солей, преимущественно хлоридов¹, до 50%. Таким образом, высокотемпературные гидротермы вырисовываются

¹ Кроме петрогенных элементов, повидимому, в виде хлоридов (и фторидов) выносятся и многие металлы, в частности железо и др.

в виде рассолов с концентрациями растворенных веществ, не известными в условиях поверхности («гидротермальная рапа»). Широко распространенное мнение о сильно разбавленных рудоносных растворах, во всяком случае для 3-й и 4-й стадий их развития, не оправдывается наблюдениями над их включениями в минералах. Насколько можно судить по кривым гомогенизации X, XI и XII (см. диаграмму на стр. 44—45), концентрация веществ в растворах очень резко, но кратковременно, падает только на границе перехода от пневматолитического к гидротермальному этапу и в области первого скачка. Состав растворов постоянно изменяется, и в пневматолитическом этапе они ведут себя особенно активно по отношению к вмещающим породам и минералам, ранее образовавшимся. Вещество отложившихся минералов каждой данной стадии (за исключением первой) имеет не только магматогенное происхождение, но часто является переотложенным — «метаморфогенным».

После образования месторождений на той или иной глубине «отработанные» растворы в более верхних горизонтах продолжают активную роль в минералообразовании не столько за счет «наследственных» компонентов, сколько в результате взаимодействия с вмещающими породами, вызывающего приобретение по пути следования новых веществ. Здесь гидротермы начинают смыкаться с растворами, образующими альпийские жилы, и с глубиной в 3—4 км от поверхности их становится все более трудно отделять даже от нагретых вадозных растворов.

В гидротермальном минералообразовании все более и более уточняется роль и относительное значение коллоидного переноса веществ, образующих жильные и рудные минералы. Коллоидальные растворы, повидимому, возникают из истинных растворов в результате понижения температуры и давления, а также при реакциях «встречающихся» растворов разного состава и происхождения (ювенильные, метаморфогенные и вадозные). Существенную роль в процессах преобразования гидротерм, в том числе и в отношении возникновения коллоидов, может играть и отмечавшееся взаимодействие их с породами стенок на путях циркуляции. Превращения части молекулярных растворов, особенно растворов кремнезема, в коллоидальные представляются наиболее вероятными в области перехода от высокотемпературной к низкотемпературной стадиям гидротермального этапа, в интервале температур от 300 до 200°C. К сожалению, в продуктах коллоидального образования имеются только субмикроскопические жидкие включения, развитые в огромных количествах. Эти включения поддаются выявлению только в иммерсионных жидкостях при больших увеличениях микроскопа. Поэтому эксперименты с ними по определению температур и типов гомогенизации пока не дали нам желаемых результатов.

В гидротермальном этапе мы выделили на схеме только две основных стадии — высоко- и низкотемпературную и 3-ю стадию холодноводного минералообразования, в которой тесно смыкаются эндогенные и экзогенные процессы. Конечно, имея возможности

определять температуру образования минералов по включениям в них остатков маточной среды, можно было бы разделить этот этап на 3—5 стадий или еще более дробно, но в этом по существу нет практической надобности. Всем известно, что даже высокотемпературные минералы часто встречаются вместе с низкотемпературными, на одной глубине и в одном и том же рудном теле. Месторождения, в этом смысле, являются чаще всего полигенными и поэтому дробное подразделение этапа на стадии, а месторождений на мелкие классы, теряет свой смысл. Однако разделение гидротермальных месторождений на два крупных класса будет полезным, тем более, что для них намечаются минералы «антиподы», такие, например, как вольфрамит и киноварь, берилл и антимонит и др. Кроме того, для месторождений высокотемпературного класса наиболее характерны трех- и многофазовые жидкие включения. В будущей генетической классификации месторождений, кроме главного признака — состояния минералообразующей среды, должен учитываться в полной мере и очень важный температурный фактор, и фактор глубины, и степень удаленности месторождения от активного магматического очага. В этом случае в природе можно будет различать «глубинные» (главным образом, пневматолитические) месторождения, «среднеглубинные» и «неглубокие» месторождения, также как и месторождения «приближенные» (к магматическому очагу), «удаленные» и «дальние». Комбинации этих терминов с главным классификационным признаком дает довольно точное положение месторождения в ходе развития процессов минералообразования и отчасти в геологической обстановке. Естественно, что автор не ставил себе задачи и не имеет возможности охватить здесь всего многообразия факторов, определяющих облик разнообразных месторождений. Достижения советских геологов в различных разделах рудознания снимают здесь эту необходимость.

Для создания советской теории внемагматического рудообразования нашими геологами сделано уже очень многое.

Необходимо коллективными усилиями в ближайшие годы увязать имеющиеся огромные материалы по месторождениям с исследованиями в минералах материнской среды, в течение многих десятилетий выпадавшей из поля зрения ученых. К расшифровке процессов минералообразования пора подходить количественно, и тогда минеральная природа предстанет перед нами в своем постоянном движении и развитии. Без этого не может быть резких сдвигов в понимании исключительно сложного процесса рудообразования и в теоретически обоснованной постановке поисковых работ.

Теория освещает путь практике, но «при современном состоянии наших знаний геолог, занимающийся изучением рудных месторождений, должен держать свой ум свободным в отношении существующих теорий рудообразования: теории эти еще слишком несовершенны. Ключи к проблеме еще не найдены» (С. С. Смирнов, 96, 1947).

Мы уверены, что именно эти-то, одни из главнейших, недостаю-

щих «ключей» сохранены нам природой в виде остатков материнской среды в минералах и их нужно широко использовать для создания советской теории рудообразования. Как было показано выше, они дают нам необходимые критерии для суждения о составе и агрегатном состоянии минералообразующих растворов, заполняя зияющий разрыв и устанавливая необходимое взаимодействие между наблюдающимися на месторождениях фактами и теоретическими гипотезами.

В ранее вышедшей статье (35, стр. 71, 72) мы уже указывали на разнообразное теоретическое значение исследования включений минералообразующей среды для минералогии, рудознания и геохимии. Здесь нам хотелось бы подчеркнуть, что эта работа необходима и для того, чтобы научиться переносить опыт гигантской природной лаборатории по кристаллизации дефицитных минералов в лаборатории советских ученых.

Автор выносит большую благодарность за просмотр настоящей работы в рукописи и важные критические замечания по ней академиком Д. С. Белянкину и А. Н. Заварицкому, чл. корр. АН СССР А. Г. Бетехтину, Д. С. Коржинскому, Д. И. Щербакову, действительному члену АН УССР Н. П. Семенову, профессорам Д. П. Григорьеву, В. С. Соболеву, Е. К. Лазаренко и кандидатам наук Ив. Ф. Григорьеву и Е. М. Лазько.

Автор благодарит асс. В. Ф. Лесняка и лаборанта Р. Ф. Сухорского за помощь в экспериментах, а также А. Н. Маямину за вычерчивание графики.

Автор будет благодарен всем товарищам, которые пожелают сделать критические замечания по этой работе или прислать образцы кристаллов для изучения их в лаборатории минералообразующей среды. Он хотел бы, в свою очередь, поделиться опытом экспериментальных исследований с геологами и минерологами, заинтересовавшимися новой методикой генетического исследования минералов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абдуллаев Х. М. — Геология шеелитоносных скарнов Средней Азии. Изд. АН УзССР, Ташкент (1947).
2. Белянкин Д. С. — О воде в магме и магматических горных породах. Геол. Вестник, 6, № 1—3 (1926).
3. Белянкин Д. С. — Насколько же в действительности растворяется кремнекислота в водяном паре ниже критической температуры? Сб. Сов. Геология № 3 (1944).
4. Белянкин Д. С. — К вопросу о современном состоянии и перспективах, учения о магмах и магматических горных породах. Изв. АН СССР, сер. геологическая, № 5 (1947).
5. Белянкин Д. С. и Петров В. П. — О шаровом граните из Кангасниени. Тр. Петрографического института АН СССР, вып. 3 (1933).
6. Бетехтин А. Г. — О текстурах и структурах руд. Пробл. Сов. геол., т. IV, № 9 (1934). Он же — Платина (1935) и др. работы.
7. Бетехтин А. Г. — К вопросу об изучении рудных месторождений. Изв. АН СССР, сер. геол., № 2 (1939).
8. Бетехтин А. Г. — О генетических типах марганцовых месторождений. Изв. АН СССР, сер. геол., № 4 (1944).
9. Бетехтин А. Г., Домарев В. С. и др. — Курс месторождений полезных ископаемых, Гостоптехиздат (1946).
10. Билибин Ю. А. — Локализация золотоносности в связи с тектоникой северо-востока. Пробл. Сов. геол., № 5—6 (1937).
11. Билибин Ю. А. — Общие принципы металлогенетических исследований. Изв. АН СССР, сер. геол., № 5 (1947).
12. Билибин Ю. А. — О некоторых чертах металлогении золота, ЗВМО., ч. 76, вып. I (1947).
13. Богданович К. И. — Рудные месторождения, ч. I и II (1912).
14. Болдырев А. К., Бетехтин А. Г. и др. Курс минералогии, ОНТИ (1936).
15. Болдырев А. К. — Очерки высшей минералогии, изд. журнала «Колыма» (1944).
16. Врешенков Б. К. и Ермаков Н. П. — Маргусорские сурьмяные м-ния, сб. ТПЭ (1935).
17. Вернадский В. И. — Очерки геохимии, изд. 2 (1936).
18. Вертушков Г. Н. — Генезис кварца. Зап. уральского геологического об-ва, вып. I, Свердловск (1948).
19. Власов К. А. — Каталитическая роль фтора в процессе десиликации пегматитов и генезиса берилла. Тр. Ломоносовского института, сер. геохим., вып. 9 (1938).
20. Власов К. А. — О тории десиликации гранитных пегматитов. Изв. АН СССР, сер. геологич., № 2 (1938).
21. Вольфсон Ф. Н. — Отношение оруденения эндогенных месторождений к крупным тектоническим нарушениям. Изв. АН СССР, сер. геол., № 6 (1948).
22. Вольфсон Ф. И. — Основные черты металлогении западного Тянь-Шаня. Изв. АН СССР, сер. геол., вып. 3 (1942).
23. Гаврусевич Б. А. — К минералогии и геохимии пегматитов Вольныи. Тр. мин. музея АН СССР, № 4 (1930).
24. Гинзбург И. И. — Классификация полевошпатовых месторождений. Материалы совещания по полевому шпату. Изд. геолкома (1928).

25. Григорьев Д. П. — Некоторые проявления влияния силы тяжести на образование и распределение минералов в месторождениях, ЗВМО., ч. 75, № 2 (1945).
26. Григорьев Д. П. — О генезисе минералов, ЗВМО., ч. 76, № 1 (1947).
27. Григорьев Д. П. — Халькоборнит и эволюция минеральных видов. Природа № 7 (1946).
28. Грушкин Г. Г. — Температуры образования кварцев месторождения Аурахмат. Изв. АН УзССР, № 2 (1948).
29. Доливо-Добровольский В. В. — Кристаллы берилла в связи с общими вопросами классификации внешних форм кристаллов минеральных месторождений. Тр. ЦНИГРИ, в. 64, стр. 1—26 (1936).
30. Ермаков Н. П. — Геология и полиметаллические рудопроявления Зап. Дарваза. Сб. Геология и полезные ископаемые Средней Азии. Изд. АН СССР (1940).
31. Ермаков Н. П. — Температуры образования месторождений оптических минералов Средней Азии, Сб. Советская геология, № 1 (1944).
32. Ермаков Н. П. — Определение температур образования гидротермальных минералов исследованием жидких включений. ДАН СССР, т. 45, № 5 (1944).
33. Ермаков Н. П. — Геологические условия формирования месторождений исландского шпата Средней Азии. ЗВМО., ч. 74, вып. 1 (1945).
34. Ермаков Н. П. — О происхождении кварцевых жил и месторождений горного хрусталя. Сб. Советская геология, № 12 (1946).
35. Ермаков Н. П. — Происхождение и классификация жидких включений в минералах. Минерал. сборник № 2, Льв. геол. об-ва (1948).
36. Ермаков Н. П. — Использование дефектов в кристаллах флюорита для изучения естественной истории минерала. Минерал. сборник № 2 Льв. геол. об-ва (1948).
37. Заварицкий А. Н. — О классификации магматических рудных месторождений, изв. геол. ком., 45, № 2 (1926).
38. Заварицкий А. Н. — Гора Магнитная и ее месторождения железных руд. Тр. Геол. ком., новая серия, вып. 122, ч. I, II и III (1922—1927).
39. Заварицкий А. Н. — О фузивных магматических месторождениях. Изв. АН СССР, сер. геол., в. 4 (1937).
40. Заварицкий А. Н. — О генезисе колчеданных месторождений. Изв. АН СССР, сер. геол., № 3 (1943).
41. Заварицкий А. Н. — Основной вопрос физической химии процесса образования пегматитов. Изв. АН СССР, сер. геол., № 5 (1944).
42. Заварицкий А. Н. — Введение в петрохимию. Изд. АН СССР (1944).
43. Заварицкий А. Н. — О промежуточном положении пегматитов между горными породами и рудными телами, ЗВМО., ч. 76, № 1 (1947).
44. Захаров Е. Е. и Юшко С. А. — Очерки по геохимии Урала. Тр. ИМС, вып. 75 (1935).
45. Захаров Е. Е. — Металлогенический очерк Урала. Тр. Геол. и-та АН СССР, № 8 (1938).
46. Каниболоцкий П. М. — Об основных причинах рудоотложения в гидротермах. Научн. зап. Днепропетровского гос. у-та, т. XVIII, в. 1 (1940).
47. Карпинский А. П. — О нахождении в минеральных веществах включений жидкого угольного ангидрида. Гор. журнал, т. 2, № 4—5, (1880).
38. Козеренко В. Н. — Анализ глубинности интрузий при поисках рудных месторождений в средней части Зап. Тяньшаня. Сб. Советская геология, № 17 (1946).
49. Коржинский Д. С. — Понятие о геохимической подвижности элементов, ЗВМО., № 3—4 (1942).
50. Коржинский Д. С. — Образование контактовых месторождений. Изв. АН СССР, сер. геол., № 3 (1945).
51. Коржинский Д. С. — Факторы минеральных равновесий и минералогические фации глубинности. Тр. ИГН АН СССР, № 12 (1940).
52. Коржинский Д. С. — Принцип подвижности щелочей при магматич. явлениях. Сб. «Академику Д. С. Белянкину». Изд. АН СССР (1946).
53. Коржинский Д. С. — Методические направления в физико-химической петрологии СССР. Юбилейный сборник АН СССР, т. II (1947).

54. Коржинский Д. С. — Петрология турьинских скарных месторождений меди. Тр. Ин. Геол. наук, вып. 68, сер. рудн. м-й (№ 10) (1948).
55. Королев А. В. — Структура рудных полей и месторождений. Изд. САИИ, Ташкент (1935).
56. Королев А. В. — Состояние представлений о генезисе и условиях локализации поствагматических месторождений Ср. Азии. Тр. Института геологии АН Узб ССР, вып. 2 (1948).
57. Королева З. А. — Парагенетические соотношения гипогенных минералов в месторождениях Карамазара. Изд. Уз. ФАН, Ташкент (1941).
58. Крат В. А. — Маркшейдерская практика (1892—93).
59. Кузнецов В. И. — О процессе становления гранитных пегматитов. Минерал. сборник № 2, Льв. геол. об-ва (1948).
60. Лазаренко Е. К. — Минералогия медно-цинковых месторождений Среднего Урала. Изд. Львов. университета (1947).
61. Лазыко Е. М. — Геологические условия формирования алданских месторождений горного хрусталя и их генетические особенности. Сб. Геология и горное дело. Труды Моск. института цветных металлов и золота, № 16 (1947).
62. Левицкий О. Д. — Вольфрамовые месторождения Восточного Забайкалья. Месторождения редких и малых металлов СССР. Изд. АН СССР, т. II (1939).
63. Лебедев А. П. — О кварцево-кальцитовых включениях в лабрадоритах из Головина (С-З Украина). Сб. «Академику Белянкину». Изд. АН СССР (1946).
64. Леммлейн Г. Г. — Коррозия и регенерация кварцевых вкрапленников в кварц-порфирах. ДАН СССР, стр. 341 (1930).
65. Лучицкий В. И. — Щелочной метасоматоз на территории Украинского кристаллического массива, ДАН СССР, т. 55, № 1.
66. Морозенко Н. К. — Генезис хрусталеосных жил Памира, Сов. геология, сборн. № 9 (1947).
67. Николаев В. А. — О процессе отделения летучих соединений из магмы. Изв. АН СССР, сер. геол., № 5 (1944).
68. Николаев В. А. — Диаграммы равновесия бинарных систем типа силикат-вода и отделение летучих соединений из магматических расплавов. ЗВМО, ч. 75, I (1945).
69. Николаев В. А. — О тройных системах с летучими компонентами и этапах глубинного магматического процесса. ЗВМО, ч. 76, I (1947).
70. Николаев В. А. — О некоторых особенностях реакций метаморфизма с участием воды и углекислоты. Изв. АН СССР, сер. геол., № 4 (1947).
71. Нехорошев В. П. — Тектоника и металлогения ю-з Алтая. Изв. ВГРО, т. 51, вып. 15 (1932).
72. Обручев В. А. — Принципы классификации рудных месторождений. Вестн. Моск. горной Академии, I (1922).
73. Обручев В. А. — Рудные месторождения, ОНТИ, изд. 2-е, (1934).
74. Обручев В. А. — Образование гор и рудных месторождений, изд. 2-е (1944).
75. Овчинников А. М. — О гидротермальном режиме земной коры. ДАН СССР, т. 53, № 7 (1946).
76. Пилипенко П. П. — Минералогия Западного Алтая. Изв. Томского у-та, т. 62.
77. Пилипенко П. П. — Исследования в области парагенезиса химических элементов в сульфидных медных, цинковых и свинцовых рудах. Тр. МГРИ, 8 (1937).
78. Пилипенко П. П. — Скарны и оруденение. Тр. МГРИ, том. 13 (1939).
79. Пуркин А. В. — Некоторые особенности Среднеазиатских скарных месторождений. Труды УзФАН, серия III (1941).
80. Пятницкий П. П. — Тр. Укр. геол. разв. треста (1934).
81. Сатпаев К. И. — Основные черты геологии и металлогении Джезказганского меднорудного района. Тр. Каз. базы АН СССР, вып. 7 (1935).
82. Сауков А. А. — Геохимия ртути. Тр. геол. и-та АН СССР, вып. 78, мин. геох. серия (1946).
83. Семенов Н. П. — Пегматитовый процесс графитовых месторождений. Изв. АН СССР, сер. геол., № 6 (1937).

84. Семсненко Н. П. — Геология и петрография Мамской кристаллической полосы. Изд. АН УССР (1948).
85. Смирнов В. И. — Главная зона разломов Тяньшаня и связь ее с оруденением. Журн. Сов. геология, № 11 (1940).
86. Смирнов В. И. — Ртутно-сурьмяные месторождения Южной Ферганы. Госгеолиздат (1947).
87. Смирнов С. С. — Заметки по некоторым вопросам о рудных месторождениях. Изв. АН СССР, сер. геол., № 3 (1946).
88. Смирнов С. С. — Рецензия на книгу П. Ниггли «Систематика магматогенных рудных месторождений». Изв. АН СССР, сер. геол., № 1 (1947).
89. Смирнов С. С. — Некоторые замечания о сульфидно-касситеритовых месторождениях. Изв. АН СССР, сер. геол., № 5 (1937).
90. Смирнов С. С. — О тихоокеанском рудном поясе. Изв. АН СССР, сер. геол., № 2 (1946).
91. Смирнов С. С. — К вопросу о зональности рудных месторождений. Изв. АН СССР, сер. геол., № 6 (1937).
92. Смирнов С. С. и Бетехтин А. Г. — Успехи в области теории образования магматогенных рудных месторождений. Юбилейный сборник АН СССР, т. II (1947).
93. Смирнов С. С. — Очерк металлогении Восточного Забайкалья. Госгеолиздат (1944).
94. Смирнов С. С. — Полиметаллические месторождения Восточного Забайкалья. Труды ВГРО, вып. 327, ОНТИ (1934).
95. Смирнов С. С. — Зона окисления сульфидных месторождений. ОНТИ (1936).
96. Смирнов С. С. — О современном состоянии теории образования магматогенных рудных месторождений. Зап. ВМО., ч. 74, № I (1947).
97. Смольянинов Н. А. — Особенности минералогии Джиддинского месторождения Бурят-Монгольской АССР. АН СССР. Тр. И-та геол. наук, вып. 39, мин. геох. серия, № 8 (1940).
98. Соболев В. С. — Энергия кристаллической решетки и законы расщепления ионов в минералах. Минерал. сборник № 2, Львов. геол. об-ва (1948).
99. Соколов Д. — Руководство к минералогии, ч. I, стр. 536—537. СПб (1832).
100. Стрелкин М. Ф. — К вопросу об оловоносных пегматитах. Изв. АН СССР, сер. геол., № 6 (1933).
101. Сыромятников Ф. В. — К вопросу о газовом переносе кремнекислоты. Тр. совещ. по эксп. минер. и петр. (1934—35).
102. Татаринов П. М., Озеров К. Н. и др. — Курс нерудных месторождений, ОНТИ, ч. I (1935).
103. Татаринов П. М. — Успехи в изучении неметаллических полезных ископаемых. Сб. Советская геология за 30 лет (1947).
104. Усанович М. И. — О кислотах и основаниях. Журн. Общей химии, т. IX (XXI), вып. 2 (1939).
105. Усов М. А. — Краткий курс рудных месторождений, 2-е изд., Кубуч, Томск (1933).
106. Ферсман А. Е. — Драгоценные и цветные камни СССР (1925).
107. Ферсман А. Е. — Геохимия, тома I, II, III, IV (1933—39).
108. Ферсман А. Е. — Пегматиты. Том I, 3-е изд. АН СССР (1940).
109. Ферсман А. Е. — Геохимические и минералогические методы поисков полезных ископаемых. Изд. АН СССР (1939).
110. Хитаров Н. И., Иванов Л. А. и Ротман Л. Э. — К познанию критических явлений в природных процессах. Сов. геология. № 2 (1939).
111. Хитаров Н. И. — О состоянии остаточного магматического раствора (по эксперимент. данным). Сов. геол., № 7 (1939).
112. Хитаров Н. И. и Иванов Л. А. — Экспериментальные данные по характеристике водных растворов в области критических температур (в приложении к вопросам геологии). Тр. 17-й сессии Международного Геол. конгресса, т. V (1940).
113. Хитаров Н. И. и Иванов Л. А. — Паровая и газовая фаза системы кремнезем—вода. Сов. геология, № 2 (1944).

114. Чирвинский П. Н. — Количественный, минералогический и химический состав гранитов и грейзенов, Москва (1911).
115. Шадлун Н. А. — Введение в курс рудных месторождений. Свердловск—Москва, (1936).
116. Шафрановский А. А. и Григорьев Д. П. — О поверхностях соприкосновения кристаллических индивидов, ЗВМО, ч. 77, № 3, (1948).
117. Шевченко Е. В. — Особенности состава, строения и оруденения некоторых пермских плутонов центрального Казахстана. Автореферат диссертации (1949).
118. Шубников А. В. — Как растут кристаллы. Изд. АН СССР (1935).
119. Щербина В. В. — Геохимия. М-ва (1939).
120. Щербина В. В. — Окислительные и восстановительные реакции в магме. Сб. посвящ. акад. Д. С. Белянкину. Изд. АН СССР (1946).
121. Щербаков Д. И. Редкие металлы, № 1, (1936).
122. Щербаков Д. И. — Сб. Научн. итоги работ ТПЭ. Изд. АН СССР (1937).
123. Якжин А. А. — К металлогении Нагольного кража. Сб. Сов. геология, № 8 (1945).
124. Brewster - Transact. of the R. Soc. of Eginburg XI, Edinb. phil. Journ. IX, 94 (1823).
125. Грейтоц, Эммонс и др. — Геология рудных месторождений Западных штатов США. Сб. посвященный В. Линдгрёну. ОНТИ (1937).
126. Hulín C. D. Factors in the Deposition of Hydrothermal Ores Ec. Geology V. XLII, N 4 (1947).
127. Ingerson Liquid Inclusions in Geologic thermometry. The Am. Mineralogist V. 32, N 78 (1947).
128. Cohen E. - Samurlung von Mikrophotographien u s w Stuttg. (1910).
129. Линдгрён В. — Минеральные месторождения, вып. I, II, III, ОНТИ (1934—35).
130. Rosenbuch H. — Mikroskopische Physiographie der Gesteine. Stuttg. II. (1907).
131. Sorby H. C. On the mikroskopical structure of crystals, indicating the origin of minerals and rocks. Quart. Jour Geol Soc. London V. 14 (1858).
132. Thenhofel W. S. — The temperature of crystallization of a fluorite crystal from Lunn County, New Mexico. Ec. Geol. v. XLII, N 1 (1947).
133. Smith G. — Transport and Deposition of the Non — sulphide vein minera s. Ec. Geology v. XLII N 1 (1948).
134. Dreyer R, Garrels R, Howland A — Liquid Inclusions in Halite as a Guide to Geologic Thermometry. The Am. Mineralogist v. 34, N1-2 (1949).

**Микрофотографии включений
минералообразующей среды
и
пояснения к ним**

№ 1 — Округло-трубчатые газо-водные включения в топазе Вольни, при комнатной температуре. Газовые пузырьки (темное) занимают 54,45% объема включений. Характеризуются гомогенизацией с критической точкой при температуре $362^{\circ}\text{C}.$ $\times 100.$

№ 2 — Уплотненно-трубчатые газо-водные включения в топазе Вольни. При комнатной температуре газовый пузырек, различающийся по выпуклости мениска на границе с жидкой фазой, занимает 54% объема включения. $\times 100.$

№ 3 — Вверху трубчатое, внизу уплотненное газо-водные включения в топазах Вольни. Газ 55% при температуре $20^{\circ}\text{C}.$ Гомогенизация происходит по III типу при температуре $390^{\circ}\text{C}.$ $\times 100.$

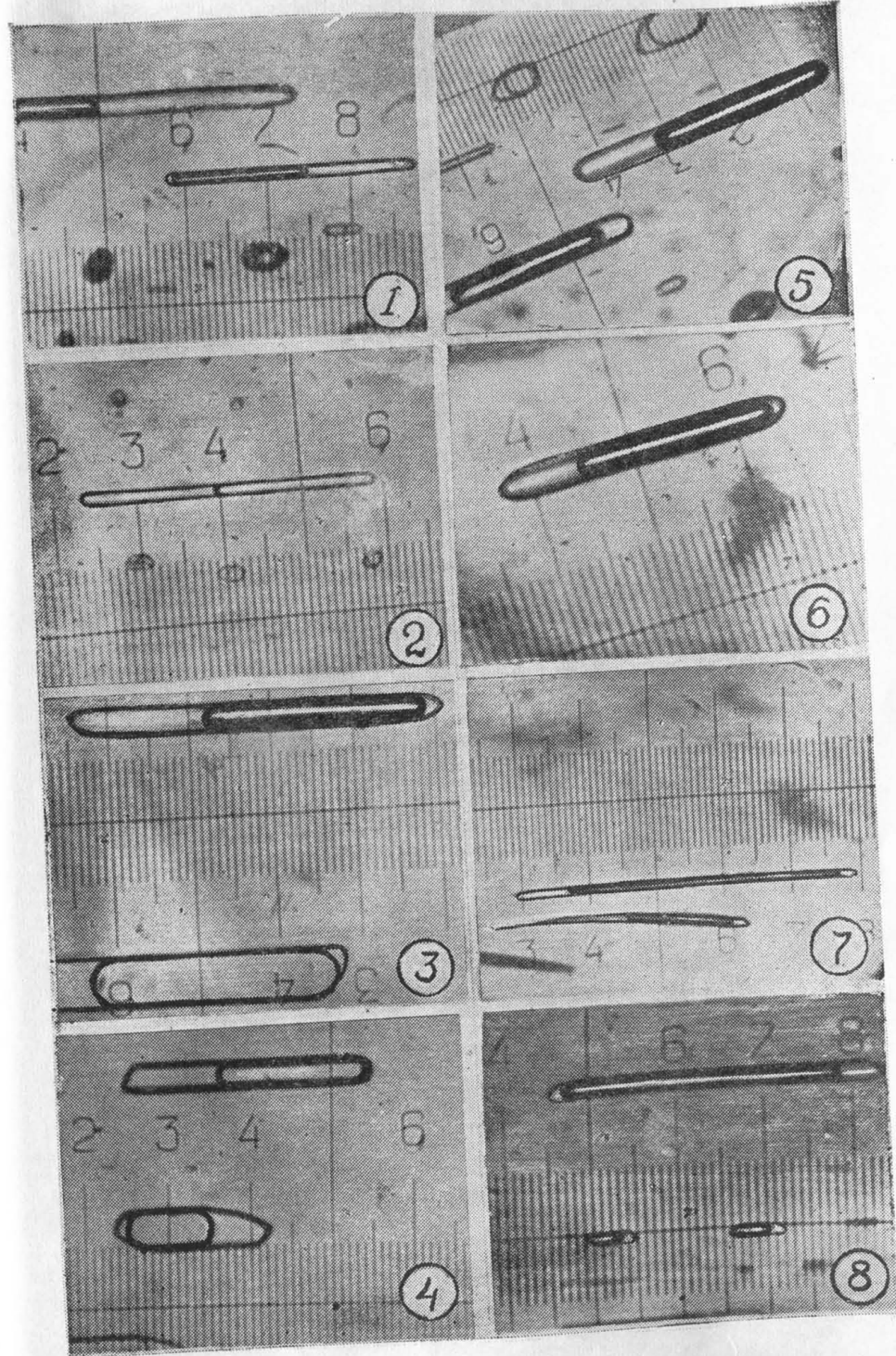
№ 4 — Уплотненно-округлые трубчатые включения в топазе Вольни. При температуре $20^{\circ}\text{C}.$ Газ 60,74%. Гомогенизация происходит по III типу. $\times 100.$

№ 5 — Трубчатые, уплотненно-трубчатые и уплотненные газо-водные включения в топазе Вольни. Газ 66,27%. Гомогенизация происходит по III типу.

№ 6 — Трубчатое газо-водное включение в топазе Вольни. Газ 66% при температуре $20^{\circ}\text{C}.$ Гомогенизация происходит по III типу. $\times 180.$

№ 7 — Округло-трубчатые и неправильно-трубчатые газовые включения в топазе Вольни. Относительный объем газа при температуре 20° —79,31%, жидкости, наблюдающейся в концах включения,—20,69%. Гомогенизация происходит по II типу при температуре $400^{\circ}\text{C}.$ $\times 100.$

№ 8 — Округло-трубчатые газовые включения в топазе Вольни. Газ 82,76%, жидкости 17,24% при температуре $20^{\circ}\text{C}.$ Гомогенизация происходит по II типу. $\times 100.$



№ 9 — Органное двухфазовое включение в кварце из Забайкалья. Ниже взорванное трубчатое включение, заполненное газом. От левого конца этого включения вниз уходит трещина, куда была выдавлена жидкость. Вверху небольшое овальное включение, тоже взорванное нагреванием. $\times 100$.

№ 10 — Двухфазовые включения в низкотемпературном кварце из Среднего Урала при комнатной температуре. $\times 100$.

№ 11 — Те же включения, гомогенизированные нагреванием до 130°C . $\times 100$.

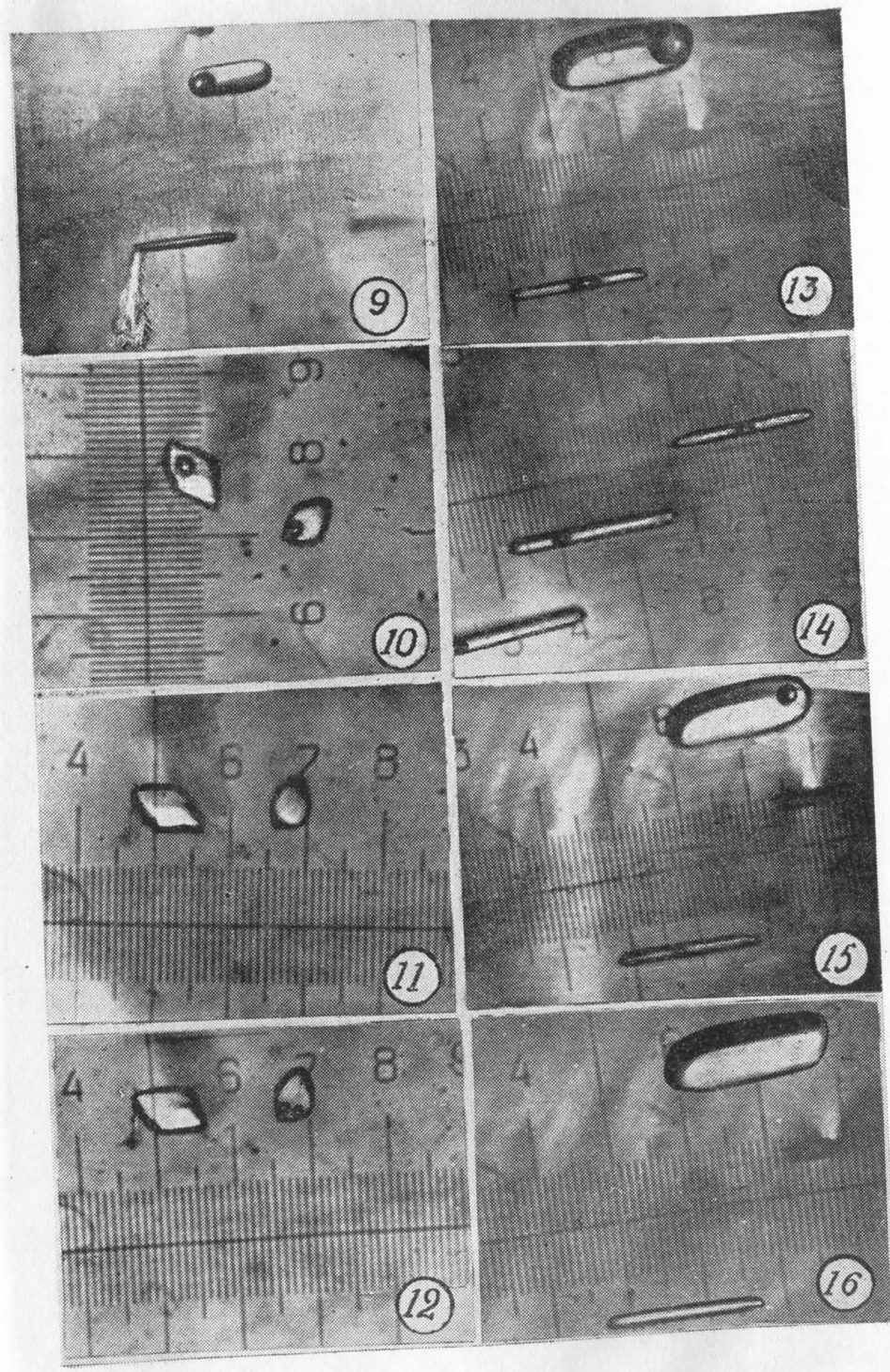
№ 12 — Те же включения, охлажденные до 115°C , причем в правом из них произошло «вскипание» — многочисленные мелкие пузырьки объединились в два газовых пузырька, которые в следующий момент объединятся в один общий пузырек и включение примет тот же вид, что и на микрофото 10. В левом включении восстановление газового пузырька задержалось на $2-3^{\circ}$. $\times 100$.

№ 13 — Ограниченное и трубчатое двухфазовые включения в кварце из Забайкалья (то же, что № 9, но при увеличении в 180 раз). Газовый пузырек при комнатной температуре здесь занимает 21% всего объема каждого включения.

№ 14 — То же, что № 13, но при температуре 140°C . Газовый пузырек занимает 13% объема каждого включения. Большое включение выведено из поля зрения, т. к. измерения производились на включениях трубчатой формы. $\times 180$.

№ 15 — То же, что № 13, но при температуре 180°C . Четко заметно резкое уменьшение газового пузырька, занимающего 8% объема включений. $\times 180$.

№ 16 — То же, что № 13, но включения гомогенизированы при температуре 200°C . Газовые пузырьки исчезли. $\times 180$.



№ 17 — Округло-трубчатое включение в топазе Волыни при температуре 40°С. Насыщенный водный раствор — 56,5% объема, газовый пузырек (черное) — 19,6% объема. Тв. фаза № 1 (сильвин? — белое), располагающаяся под вертикальной нитью — 14,9%. Тв. фазы № 2 и № 3 (белое), располагающиеся в интервале между газовым пузырьком и тв. фазой № 1, занимают соответственно 5 и 3% объема. Гомогенизируется по I типу. ×180.

№ 18 — То же, что № 17 при температуре 150°С. Газа 12,25%, тв. фазы № 1—10,2% и насыщенного водного раствора 77,55%, так как твердые фазы № 2 и № 3 растаяли при температуре около 100°С. ×180.

№ 19 — То же, что № 17 при температуре 180°С. Газа 10%, тв. фазы № 1—8,6%, насыщенного водного раствора 81,4%. ×180.

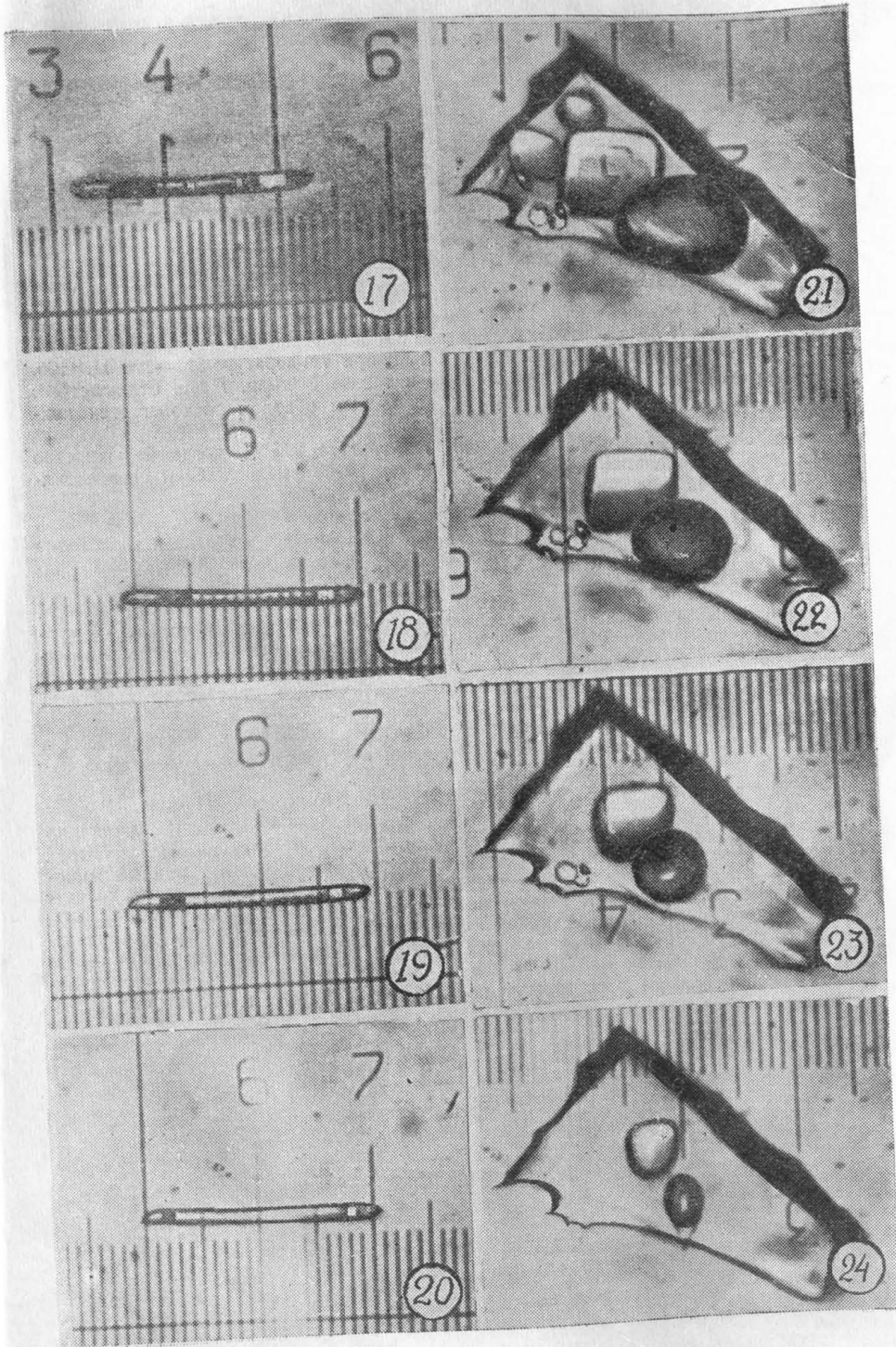
№ 20 — То же, что № 17 при температуре 275°С. Газа—2,5%, тв. фазы № 1—3,4%, насыщенного водного раствора 94,1%. ×180.

№ 21 — Крупное объемное неправильной формы включение в топазе Волыни, располагающееся в той же зоне кристалла, что и включение на микрофото № 17. Процентные отношения фаз те же. Здесь различаются только еще тв. фаза № 4 (кристаллики шестигранных очертаний у левого нижнего угла кристалла № 1) — объем их 1%, № 5 — темный, возможно рудный минерал, выросший на левом углу кристалла № 1 и № 6 — призматический голубоватый кристалл находится под тв. фазой № 2 (тв. фазы № 5 и 6 около 1% объема включения). Объем жидкой фазы — 54,5%. ×180.

№ 22 — То же, что № 21 при температуре 150°С. Объемные отношения фаз изменились соответственно с микрофото № 18. ×180.

№ 23 — То же, что № 21 при температуре 180°С. Объемные отношения фаз изменились соответственно с микрофото № 19. ×180.

№ 24 — То же, что № 21 при температуре 275°С. Объемные отношения фаз те же, что и на микрофото № 20. В дальнейшем газовый пузырек исчезает при температуре 300°, а при температуре 310° осуществляется полная гомогенизация по I типу таянием тв. фазы № 1.



№ 25 — Уплощенно-трубчатое ограненное, многофазовое включение в топазе Вольни, в левой части с четким черным обводом, различается газовый пузырек. Количество различных изотропных и анизотропных минералов — «узников» более десяти. Гомогенизация по I типу при температуре 315—320 °C. ×100.

№ 26 — Деталь крупного включения в топазе Вольни. Ниже сплюснутого, неправильной формы, газового пузырька с темным обводом располагается кристалл — «узник» № 1 и другие твердые фазы.

№ 27 — То же, что № 26, но при температуре 265 °C, когда большинство твердых фаз уже растаяло, а газовый пузырек резко уменьшился и переместился в жидкости, заполняющей пору. ×180.

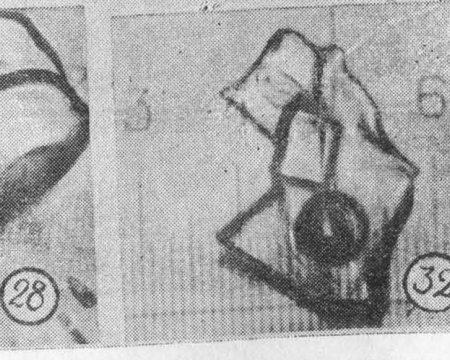
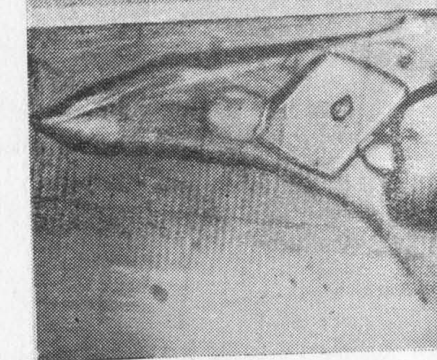
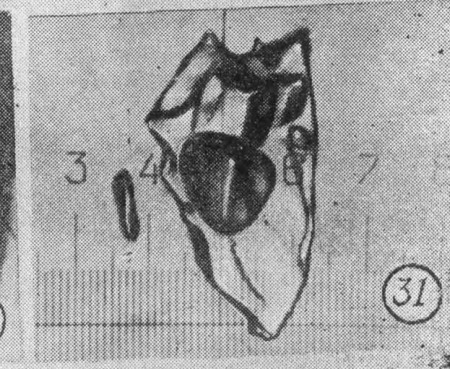
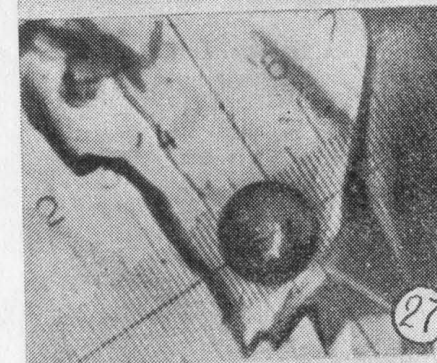
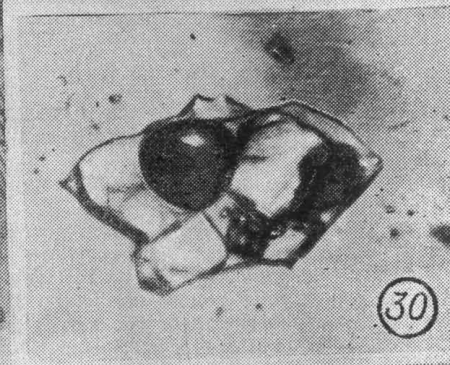
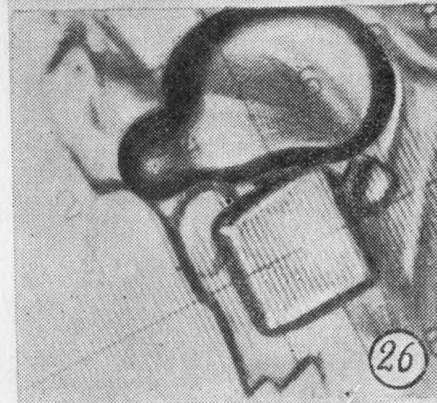
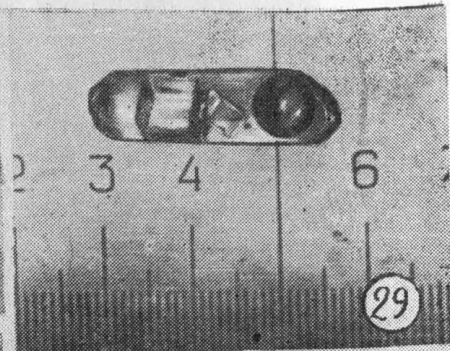
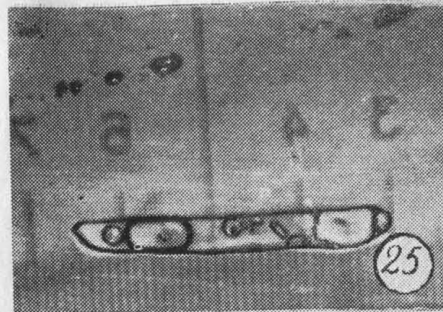
№ 28 — Часть многофазового включения в топазе Вольни (другая часть вне фокуса микроскопа). Отчетливо видны ромбовидные очертания кристалла № 1, в котором оказалась включенной тв. фаза № 5, слева изотропный кристалл № 2, а справа № 3. ×180.

№ 29 — Многофазовое включение в «негативном кристалле» кварца Памира. Справа круглый газовый пузырек, слева крупный кубический кристалл — «узник» (вероятно, сильвин), на котором вырос другой кубический внутренний минерал (вероятно, галит), а между ними сверху различается непрозрачный рудный минерал. Выше крупного кристалла еле различимы два кристаллика карбоната с высоким двупреломлением. ×180.

№ 30 — В частично ограненном многофазовом включении кварца Памира тот же парагенез минералов «узников», причем карбонат (темное) отчетливо нарастает на сильвине(?). ×180.

№ 31 — Объемное многофазовое включение в кварце Памира. Вверху один за другим наблюдается два изотропных кристалла — «узника», имеющих кубический габитус. Ниже, прижатый ими, деформированный газовый пузырек (темное), левее которого располагается очень небольшой черный рудный минерал, а правее на стенке поры (выше цифры 6 микрометрической линейки) сидит ромбоэдрический кристаллик карбоната. ×180.

№ 32 — Многофазовое включение в кварце Памира. Справа налево отчетливо различаются круглый газовый пузырек, кубический кристалл — «узник» и шестигранная оранжево-красная в проходящем свете пластинка спекуларита(?). Все остальное пространство поры, как и в других многофазовых включениях заполнено насыщенным водным раствором. ×180.



№ 33 — То же включение в топазе Волыни, что и на микрофото № 6, но при температуре 150°С. Объем газа по отношению к объему всего включения 64%.×100.

№ 34 — То же, что № 33, но при температуре 290°С. Объем газа 62,5%.×100.

№ 35 — То же, что № 33 при температуре 330°С. Объем газа с 300 до 330°С резко увеличился до 88,8%.×100.

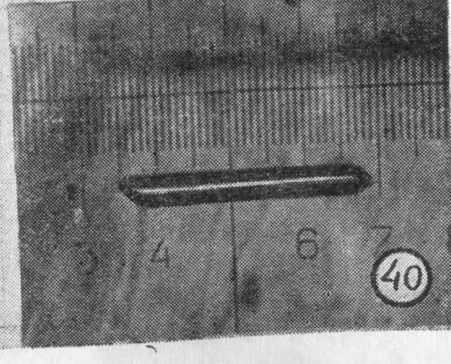
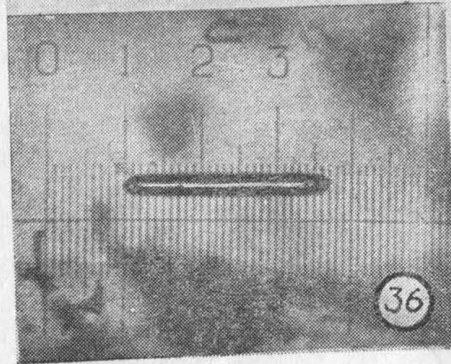
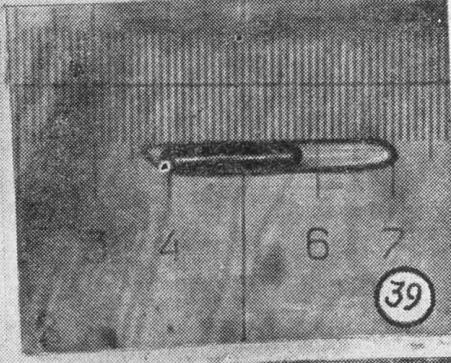
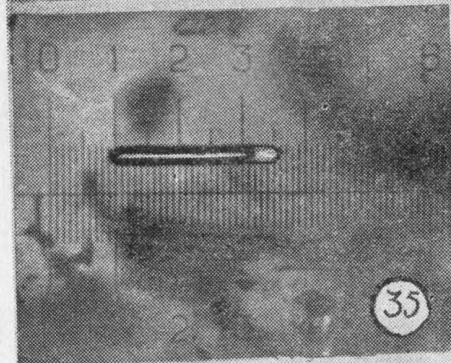
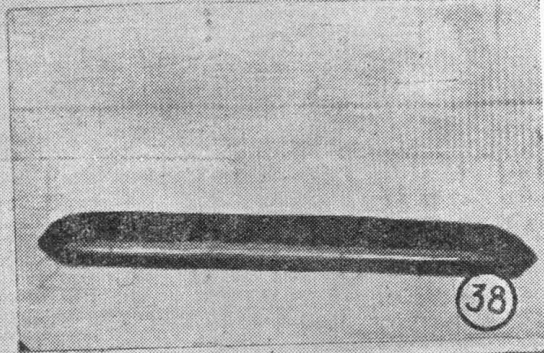
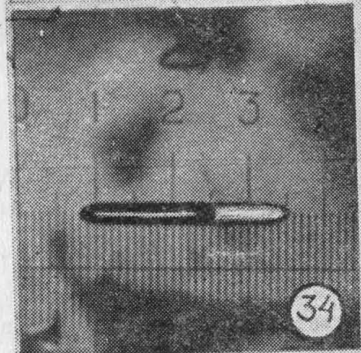
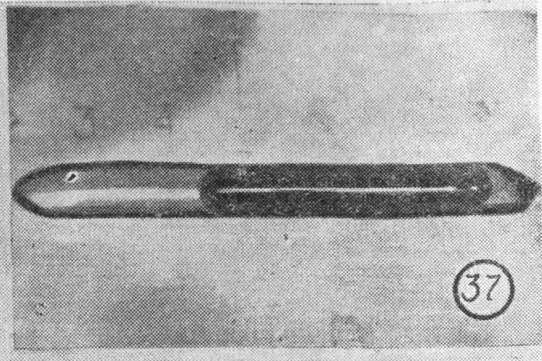
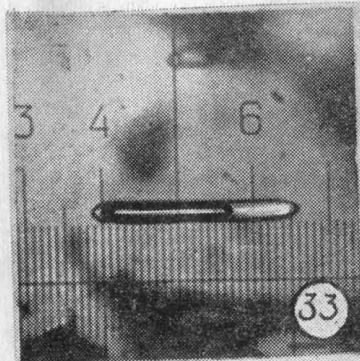
№ 36 — То же, что № 33 при температуре 335°С. Жидкая фаза исчезла и наступила полная гомогенизация по III типу.×100.

№ 37 — Округло-трубчатое включение в топазе Волыни. Газ занимает при 20°С. 53% объема всего включения.×100.

№ 38 — То же включение после того, как произошла гомогенизация с «критической точкой» при температуре 325°С.×100.

№ 39 — Округло-трубчатое включение в топазе Волыни. Объем газа 58% при температуре 40°С. Гомогенизация по III типу.×180.

№ 40 — То же включение гомогенизированное при температуре 345°С.×180.



№ 41 — Сложное трехфазовое включение в кварце из Среднего Урала с двумя не смешивающимися жидкостями (водный раствор и углекислота) и газовым пузырьком.×180.

№ 42 — Сложное трехфазовое включение в кварце Памира (водный раствор, жидкая и газообразная углекислота) при температуре 18,5°С.×180.

№ 43 — То же включение, но при температуре 25,5°С.

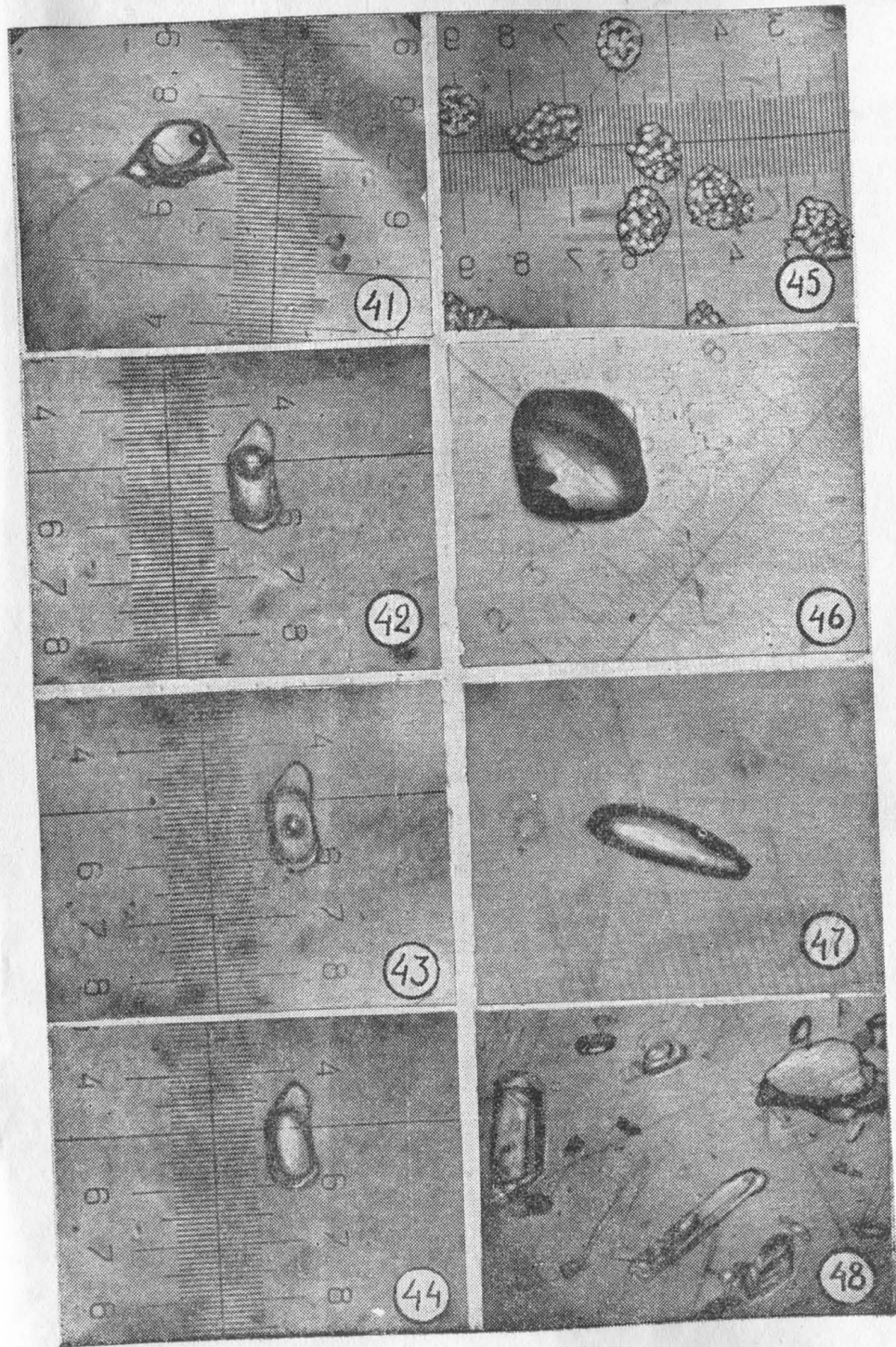
№ 44 — То же включение, при температуре 28,5°С превратившееся в двухфазовое.

№ 45 — Взорванные очень мелкие многофазовые включения в топазе Вольни.×180.

№ 46 — Газовое включение в кальците из траппов Вилюя.×180.

№ 47 — Газовое включение в топазе Вольни.×180.

№ 48 — Однофазовые жидкие ограниченные включения в датолите последней генерации с Тетюхе.×180.



О Г Л А В Л Е Н И Е

Предисловие	9
1. Современное состояние теории рудообразования	9
2. Этапы минералообразования и типы включений в минералах	14
3. Твердые включения в минералах и их генетическое значение	21
4. Магматический этап минералообразования и затвердевшие включения	22
1) Раскристаллизованные включения	23
2) Включения вулканического стекла	24
3) «Письменные» включения и механизм образования ихтиоглиптов	27
5. Способы образования и генетическая классификация жидких и газовых включений в минералах	30
1) Первичные включения	32
2) Первично-вторичные включения	33
3) Вторичные включения	35
6. Типы гомогенизации жидко-газовых включений и границы пневматолитического минералообразования	37
7. Жидкие включения и этап гидротермального минералообразования	51
8. Схема главнейших этапов и стадий развития процессов рудообразования	55
9. Литература	64
Микрофотографии и пояснения к ним	70