*Н. П. Ермаков*

# ГЕОХИМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЙ В МИНЕРАЛАХ



*Н. П. Ермаков*

550.4+549
Е 72

# ГЕОХИМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЙ В МИНЕРАЛАХ

(ВКЛЮЧЕНИЯ МИНЕРАЛООБРАЗУЮЩИХ СРЕД — ИСТОЧНИК ГЕНЕТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ)

45

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НЕДРА»
МОСКВА, 1972



*Ермаков Н. П.* **Геохимические системы включений в минералах.** «Недра», 1972, 376 с.

В книге представлены элементы методологии исследования минерального мира и раскрыто значение учета геохимической среды в познании эндогенного минералообразования. Детально описаны и классифицированы геохимические системы включений в минералах и показана содержащаяся в них обширная генетическая информация. Представлены разнообразные методы и техника изучения включений минералообразующих растворов и расплавов в их статическом состоянии. Содержание книги является основой развития термобарогеохимии по термодинамическим и аналитическим исследованиям включений в минералах.

Книга предназначена для геологов, минералогов, геохимиков, аспирантов и студентов старших курсов геолого-минералогических специальностей.

Таблиц 27, иллюстраций 57, фототаблиц 27, списки литературы 297 названий.

2-9-2
30-71

*Светлой памяти*
*жены, помощника, друга*
*Ольги Александровны*
*ВИЛЬКОНСКОЙ*

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В минеральной природе Земли имеются три главных источника генетической информации: 1) обнажения и вулканы в земной коре, 2) минералы и их сочетания в образцах и обнажениях, 3) включения разнообразных растворов и расплавов в минералах.

В соответствии с этим в геологических науках, связанных с познанием эндогенных процессов минералообразования, теперь нельзя не использовать всех трех каналов природной информации.

I. Геолого-геофизическое изучение разнородного строения земной коры, состава пород и их деформаций в естественных и искусственных обнажениях с отбором и описанием образцов пород, руд, минералов и окаменелостей, а также проб жидкостей и газов (особенно связанных с вулканической деятельностью), составлением карт и разрезов, отражающих пространственное распределение результатов древних и современных эндогенных геологических процессов и явлений и др. Вся эта первостепенной важности информация может быть обобщена под названием *полевой и камеральной геологии.*

II. Микроскопическое и иное специальное изучение эндогенных или полигенных минеральных продуктов былых процессов и явлений, прочно и надолго стабилизированных в земной коре в виде минералов и их парагенезисов, фиксированных в текстурах и структурах их агрегатов, кристаллохимические исследования закономерного атомарного (редко молекулярного) строения минеральных индивидов, онтографические наблюдения за их внутренним строением, испытания физических свойств и определения их элементного состава и т. п. входят в сферу деятельности *минералогов, кристаллографов, геохимиков и петрографов,* очень успешно использующих новые технические средства для разносторонних испытаний минеральных веществ в их статическом состоянии.

III. Экспериментальное и аналитическое исследование природных физико-химических микросистем минералообразующих геохимических сред, законсервированных в вакуолях минералов в процессе их кристаллизации. В отличие от обнажений горных пород, руд и минералов,

их образующих, включения расплавов, газовых и жидких эндогенных растворов допускают возможность искусственной реставрации физико-химических параметров, представлять объективные данные о ходе изменения этих параметров, состава и реакций минералообразующих сред.

В этом заключается главная особенность третьего природного канала генетической информации, обеспечивающего выявление с мерой и числом динамики процессов и явлений эндогенного минералообразования в координатах времени и пространства. Эта отрасль науки может быть названа термодинамической геохимией, или *термобарогеохимией.*

Монография в основном посвящена использованию включений минералообразующих растворов и расплавов в обширной области геохимии процессов эндогенного рудообразования. Подвижные минералообразующие среды в тесном взаимодействии с геологической обстановкой на разных уровнях температур и давлений вызывали и регулировали в земной коре процессы и явления минерализации. Эти геохимические среды ювенильного и смешанного происхождения являлись теми материальными носителями энергии и вещества, которые обеспечивали кристаллизацию минералов, в основном из расплавов и истинных растворов. Иногда происходило отложение руд из коллоидных водных растворов. Ионно-молекулярные газовые и жидкие растворы осуществляли гидротермально-пневматолитовый метасоматоз рудовмещающих пород и позднейшие преобразования минеральных залежей.

Такое рудообразование происходило в результате постепенных или скачкообразных (эволюционных и флуктуационных) изменений важнейших взаимосвязанных физико-химических параметров — температуры и давления, агрегатного состояния (плотности), состава и концентрации, характера реакций минерализующих растворов и расплавов, в подавляющем большинстве случаев действовавших на значительной глубине земной коры.

Познание сложной динамики эндогенного рудообразования оказалось возможным не только через изучение макрообъектов неорганической природы (геология месторождений и минеральный состав руд), но и через ее микрообъекты (включения растворов и расплавов в минералах), длительное время остававшиеся вне поля зрения геологов, изучавших месторождения глубинного генезиса.

Между тем научное значение природных объектов не зависит от их размеров. Даже в самых мелких «микроавтоклавах» включений, герметизированных минеральной природой, скрыты факты большого теоретического и прикладного значения. Как будет показано, их можно выявлять с мерой и числом с помощью визуального изучения включений в статическом виде, а затем путем экспериментов и анализов.

Генетические аспекты геохимии и теории глубинного рудообразования наиболее успешно можно разрешать только при комплексном изучении природных макро- и микрообъектов в следующей триаде: *геологическая обстановка — геохимическая среда — минеральные парагенезисы руд.* Недостаточное внимание к связующему, промежуточному

звену триады до сих пор сказывалось на развитии геолого-минералогических наук, занимающихся минеральными месторождениями. Настоящая монография в основном посвящена разностороннему рассмотрению микрообъектов включений в их статическом состоянии (при обычной температуре), что всегда должно предварять термодинамические и аналитические исследования. Изучение геологического строения макрообъектов и минералого-петрографического состава руд и вмещающих пород эндогенных месторождений также осуществляется в стабильном виде их современного существования.

Изучение объектов минеральной природы даже в статическом состоянии, если оно проводится для выяснения взаимоотношений их элементов (пластов пород и их дислокаций, минерализованных трещин, текстур и структур руд, их химического состава и др.) приносит весьма полезную информацию о формировании месторождений во времени и пространстве. Информация становится значительно более полной, если при этом использовать и микрообразцы подвижных минералообразующих и преобразующих растворов и расплавов, генерировавших руды того или иного эндогенного месторождения. Показ значения такого совместного использования макро- и микрообъектов, освещение техники и разнообразных методов познания последних в их статическом состоянии являются главной задачей книги.

Однако, если пока мы имеем ограниченные возможности экспериментирования с природными макрообъектами, то для герметизированных в вакуолях включений микропорций минералообразующих геохимических сред возможно возрождение их до исходного состояния в период образования месторождения. Они дают возможность восстановления объективно фиксирующихся относительных и абсолютных числовых значений физико-химических параметров, существовавших при глубинном минералообразовании геологического прошлого.

Следует отметить намечающиеся новые аспекты научно-прикладного использования включений при генетическом изучении постмагматических месторождений и при поисках рудных тел, не выходящих на поверхность. Выявляются также возможности использования физико-химических данных, полученных по природным системам включений, для искусственного выращивания минералов, синтеза некоторых минеральных веществ, использующихся в современной технике, и для их качественной оценки.

Таким образом, книга, представляющая статику включений во всем их разнообразии, предваряет термодинамические и химические их исследования и раскрытие научно-прикладного значения полученных данных. Это следующая книга автора «Термобарогеохимия эндогенных процессов».

С большой благодарностью автор отмечает таких крупных отечественных ученых, как Д. С. Белянкин, Ю. А. Билибин, К. А. Власов, А. Н. Заварицкий, Д. С. Коржинский, А. В. Королев, В. М. Крейтер, В. А. Николаев, В. А. Обручев, В. И. Смирнов, С. С. Смирнов, В. С. Соболев, А. Е. Ферсман, Н. И. Хитаров, Д. И. Щербаков, которые в начальный период становления минералогической термометрии и учения о минералообразующей среде помогли ему не только своим научным

авторитетом, дружеской критикой и поддержкой, но и поделились глубокими знаниями проблем эндогенного рудообразования.

Из зарубежных ученых наибольшую пользу автор получил от встреч и обсуждения проблем геохимии глубинных процессов с Э. Ингерсоном и Э. Роддером (США), М. Рубо и Г. Дейша (Франция), З. Поуба и Я. Кутиной (Чехословакия), Ч. Давидсоном (Англия), М. Савулом (Румыния), А. Дебом (Индия) и др.

Особенно большую помощь в проведении экспериментов автору оказали его многочисленные аспиранты и другие ученики.

Автор благодарен всему коллективу исследователей включений, объединенному в Советскую национальную секцию международной Комиссии по рудообразующим растворам и расплавам во включениях и соответствующую секцию Научного совета по рудообразованию Академии наук СССР. Члены этого большого научного товарищества в течение последних 20 лет участвовали в развитии методов познания геохимии глубинных процессов и параметров минералообразующей среды былого рудообразования.

Неоценимую повседневную помощь в работе и в отыскании минеральных включений автор более четверти века получал от ближайшего друга О. А. Вильконской, светлой памяти которой он посвящает этот труд.

Монография рассчитана на широкий круг геологов, занимающихся эндогенными полезными ископаемыми, поисковиков и разведчиков, геохимиков и минералогов, петрографов и петрологов, кристаллографов и специалистов по выращиванию кристаллосырья, а также на аспирантов и студентов старших курсов указанных специальностей.

Автор выражает большую благодарность за советы и помощь в подготовке рукописи Д. Н. Хитарову, И. В. Богоявленской, Ф. П. Мельникову, А. А. Максимову и Н. И. Андрусенко.

# ВВЕДЕНИЕ

Эндогенные геохимические процессы минералообразования, обусловливающие все разнообразие рудных полезных ископаемых в земной коре, привлекали с XVI века внимание геологов. Однако их усилия по выявлению особенностей происхождения эндогенных месторождений в основном базировались на изучении геологической обстановки формирования месторождений и минеральных парагенезисов руд.

В XX веке параллельно с бурным развитием точных наук, их техники и методов возникло новое важное физико-химическое направление, имеющее источником фактов для точной интерпретации искусственное воспроизведение минералообразующих систем и кристаллов в лабораторных условиях. Роль этого направления велика. Однако при генетических интерпретациях эндогенных процессов возникал вопрос о степени соответствия экспериментальных физико-химических данных с параметрами более сложных и бесконечно разнообразных подвижных природных систем растворов и расплавов, действовавших в земной коре в геологическом прошлом.

К решению этой важнейшей проблемы соответствия в середине XX века были привлечены в качестве источника информации микрообъекты самой минеральной природы в виде включений расплавов и газово-жидких включений растворов. Последние известны со времен раннего средневековья (Ал-Бируни), но впервые подверглись научному осмысливанию в середине XIX века (Г. Сорби). Однако слабые технические возможности того времени для успешного проведения экспериментов, недостаточный общий уровень развития точных наук, нерешенность многих методических вопросов, связанных с исследованиями, и не понимание генетического и временного разнообразия этих включений почти на целый век затормозили использование их для теории и практики.

Первым, кто в советской научной литературе привлек внимание исследователей к газово-жидким включениям в минералах, был выдающийся естествоиспытатель нашего века, основоположник геохимии и ряда других наук академик В. И. Вернадский. Во втором томе своей знаменитой «Истории минералов земной коры» [18] он обратился с призывом *к самому тщательному, настойчивому и систематическому* изучению газово-жидких включений. Они, по его мнению, должны изменить наши представления о минералообразующих и преобразующих водных растворах глубоких участков земной коры. Он считал, что «тот, кто возьмется за эту работу сейчас, имеет перед собою область огромных и важных достижений» [18].

Эти включения В. И. Вернадский принимал не за что-то случайное, изолированное от общего пневматолито-гидротермального процесса, а за органически связанное в своем образовании с той общей, «губчатой системой, тем водным скелетом, который характерен для всякого минерала и горной породы земной коры в форме пленчатой волосной воды» [18]. Количество водных растворов включений вместе с волосной водой горных пород он признавал сопоставимыми с массой воды океана [18, § 175 и 398].

Его ближайший ученик академик А. П. Виноградов [20], считает, что в процессе зонной плавки мантии нашей планеты и образования земных оболочек в гигантских масштабах происходил процесс дегазации, и газово-водные растворы пронизывали всю толщу формирующейся земной коры в направлении снизу вверх.

С образованием последней ювенильные и иные растворы создавали в каркасе твердых пород вокруг магматических интрузий локальные ореолы глубинной атмогидросферы — той активной геохимической среды, которая обеспечивала миграцию элементов и из которой кристаллизовались минералы и руды постмагматического происхождения. В них герметизировалось огромное количество первичных включений этих минералообразующих растворов, а в залеченных волосных трещинах минералов пропаренных пород происходила самоконсервация вторичных для них газово-жидких включений.

Именно эти включения, хорошо различимые под микроскопом и допускающие эксперименты с ними, явились важной основой конкретного познания термодинамики и химизма глубинных процессов минерализации. Газовые и жидкие растворы обеспечили в благоприятных геологических структурах локализации постмагматическое рудообразование во всем разнообразии промышленно-генетических типов глубинных месторождений.

Как будет показано, через экспериментальное возрождение включений растворов и расплавов до исходного состояния, наиболее надежно и объективно можно выявить с мерой и числом, со степенью точности, свойственной физике и химии, физико-химические условия и термодинамические параметры былого эндогенного рудообразования.

*Природные «микроавтоклавы» включений* допускают эксперименты по фазовым изменениям в широкой области температуры (от обычной до $+1600°$ С и от $+20$ до $-180°$ С), непосредственно наблюдающимся под микроскопом. Здесь термодинамические исследования включений геохимических сред тесно ассоциируют с экспериментами в искусственных физико-химических системах автоклавов и могут корректировать их соответствие природным эталонам геохимических систем растворов и расплавов, порождавших в геологическом прошлом минералы, руды и интрузивные породы. При этом и сама геохимия эндогенных процессов оснащается научными данными не только через природные макро- и микрообъекты, но и через искусственно созданные лабораторные системы минералообразующих сред, помогающие успешно интерпретировать природные процессы и явления глубинной миграции элементов и минералообразования. Под последним с самых общих позиций мы не можем понимать ничего иного, кроме проявления в электрических полях геохимических сред основной минеральной формы движения материи, т. е. абсолютно закономерных группировок атомов (ионов, радикалов) в электрически нейтральных пространственных решетках кристаллов. В свою очередь кристаллические минералы образуют свои закономерные семейства в агрегатах руд и пород и ощутимо реагируют на медленные и быстрые изменения термодинамических параметров в окружающей геологической и геохимической среде (см. главу 3).

Современная геохимия выходит на путь познания динамики про-

цессов, а не только долговременно стабилизированного распределения элементов в земной коре. Здесь вопросы физической химии природных систем включений и искусственных систем растворов и расплавов выступили на первый план точных минералогенетических изысканий, без которых не может обойтись и теория рудообразования.

Миграция в подвижных геохимических средах и объединение элементов в кристаллических решетках минералов в глубинных условиях земной коры в очень значительной степени зависят не только от строения электронных орбит атомов, способности их входить в легкоподвижные молекулярные соединения и пр., но и от термодинамических условий их существования в растворах и расплавах. Поэтому у геохимиков всегда было стремление учитывать интенсивные термодинамические параметры, в первую очередь температуру процессов эндогенной миграции элементов и минералообразования. Однако точные подходы в определениях этих параметров до недавнего времени казались недоступными.

За последние 20—25 лет интенсивно развивалась *минералогическая термобарометрия* по включениям в минералах. К 60-м годам нашего века в связи с успешной разработкой многих собственных методов для определения агрегатного состояния, химического состава, концентраций и реакций растворов она вышла далеко за пределы научного направления, определявшегося этим названием. В советской геохимической школе и в теории эндогенного рудообразования оформилась и оснастилась многими собственными методами и техникой экспериментов новая отрасль науки, требующая выбора и утверждения своего названия.

История показывает, что каждая отрасль науки, доказавшая полезность своего развития, получала право на самостоятельное существование и наименование в случаях, если она базировалась на *своих определенных объектах* для получения научной информации и создала *собственный арсенал методов, методик и аппаратуры* для их изучения. Наша отрасль глубоко специфических исследований располагает всем этим и уже получила международное признание и организационное оформление (COFFJ) в рамках Ассоциации по генезису рудных месторождений и Международного союза геологических наук. Более того она имеет тесные связи с практикой по линии генетического изучения, поисков и оценки эндогенных месторождений, выращивания искусственных минералов, синтеза некоторых новых неорганических материалов и располагает значительными кадрами специалистов.

При выборе названия новой научной отрасли необходимо в первую очередь определить науку, к которой она ближе всего стоит по объекту и задачам исследований, и подобрать ей отраслевое определение по главному методу получения научной информации и ее содержанию. Кроме того, это определение не должно быть ранее использовано в литературе в какой-либо другой отрасли этой науки. Включения микрообразцов минералообразующей среды сами по себе не могут обеспечить название нашей отрасли науки, хотя она и опирается на фактические данные, полученные с мерой и числом, экспериментом и анализом. Ведь и геологические обнажения горных пород не могли быть определяющими для названия какой-либо отрасли геологии и даже полевая геология является только методическим руководством.

Наша отрасль науки относится к геохимии, что вытекает из следующего определения, данного А. Е. Ферсманом [109, стр. 25]: «Геохимия имеет целью изучение элемента-атома в условиях земной коры; геохимия изучает: а) количественное распространение и распределение химических элементов в земной коре, рассеяние и местную концентрацию; б) сочетания различных элементов в различных частях земной коры и их пространственное и хронологическое распределение при различных природных химических процессах; в) миграцию элемен-

тов и ее законы при изменении термодинамических условий обстановки и д) поведение элемента как в условиях земной коры вообще, так и при сочетании с другими элементами, в частности в природной кристаллической постройке».

Однако в первой половине нашего века это правильное определение геохимии в отношении глубинного постмагматического минералообразования звучало только как призыв, как необходимое направление ее развития в перспективе. Точное определение термодинамических параметров, да еще в подвижных системах равновесия и во времени, тогда могло быть доступным лишь для геохимии экзогенных процессов и современного океана, а также наземных и приповерхностных вод и рассолов. Консерваты глубинных минералообразующих сред во включениях предоставили нам в настоящее время ту же возможность для познания процессов эндогенного минералообразования в далеком геологическом прошлом. С помощью исследования включений растворов и расплавов оказалось возможным получать сведения почти по всем перечисленным А. Е. Ферсманом пунктам: на основании выявления химизма включений можно изучать процессы рассеяния и концентрации элементов и судить об их концентрации в подвижных природных геохимических средах (пункт «а»), изучать не только пространственное, но и хронологическое распределение элементов при различных глубинных геохимических процессах (пункт «б»), путем выявления истинных и относительных значений температур и давлений судить о миграции элементов в зависимости от термодинамических условий минералообразующей среды и геологической обстановки (пункт «в»), экспериментально исследовать поведение элементов в системах включений, герметизированных в природной кристаллической постройке и в минералах-узниках этих включений (пункт «д»).

При обычной и повышенной температуре включения, эти свидетели былых процессов минералообразования, представляют собой консерваты микропорций подвижных, обычно ионно-молекулярных сред. Это в большинстве случаев надежно герметизированные эталоны («модели») термодинамических систем, обеспечивающих в геологическом прошлом миграцию элементов в виде легкорастворимых соединений и структурно закономерную концентрацию их в кристаллических постройках минералов, происходившую при непрерывно изменявшихся термодинамических параметрах. Выявление по ним изменений относительного или истинного уровня последних, в первую очередь температуры, проводится по системам включений также термодинамически, т. е. за счет привноса или удаления тепла (термометрия и криометрия). Химическое изучение состава микровключений глубинных природных растворов, их концентраций и реакций относится, конечно, к области геохимии глубинных процессов минералообразования. Именно поэтому в 1967 г. на одном из очередных заседаний Московского отделения исследователей рудообразующих растворов во включениях мы предложили для этой отрасли науки название *термодинамическая геохимия* эндогенных процессов минералообразования в отличие от общепризнанной геохимии эндогенных процессов, общей геохимии элементов и минералогии, которые используют для получения научной информации состав, свойства, морфологию, строение и т. п. самих минералов и их агрегатов.

Правомерность выбора термина «термодинамическая» может быть доказана исходя из двух позиций. Во-первых, как известно, термодинамика изучает свойства энергии и законы ее превращений, а также процессы и состояния равновесия в термодинамических системах. Последними называются системы, для которых возможны теплообмен и другие взаимодействия между составляющими их телами. С этой точки зрения главные источники генетической информации новой отрасли

науки — включения — несомненно являются термодинамическими системами. Во-вторых, в ходе исследования включений не только выясняются основные термодинамические параметры состояния системы — температура, давление, вещественный состав, но и само исследование также ведется термодинамически, т. е. за счет привноса тепла в систему или его удаления.

Накопленные к настоящему времени результаты исследований природных минералообразующих сред позволяют следующим образом сформулировать определение новой отрасли науки.

*Термодинамическая геохимия (термобарогеохимия) исследует с мерой и числом физико-химические параметры развития былых процессов и явлений глубинного минералообразования в подвижных системах равновесия природных растворов и расплавов, законсервированных в виде включений в минералах, с учетом парагенезисов последних и геологической обстановки их нахождения.*

Термодинамическая геохимия эндогенных процессов основана: 1) на реальном выявлении относительных и истинных значений основных интенсивных параметров ($T — P — X$) геохимических сред, транспортировавших элементы в разных, иногда сложных соединениях; 2) на анализах химического состава и реакций растворов и расплавов во включениях образцов этих сред; 3) на учете кристаллохимических закономерностей относительного времени и надежности консервации минералообразующих растворов в минералах; 4) на выявлении относительного возраста включающих минералов в парагенезисах руд и пород; 5) на установлении геологической позиции минеральных залежей в зависимости от физико-химических свойств рудовмещающих пород и генезиса структур локализации полезных ископаемых.

Таким образом, эта отрасль геохимической и рудогенетической науки имеет главной целью восстановить былой комплекс термодинамических, геохимических и геологических условий в каждом данном участке земной коры, вмещающем ныне эндогенное месторождение. На фоне выявленных геолого-минералогических сведений по взаимоотношению макрообъектов главным источником научной информации в термодинамической геохимии (термобарогеохимии) являются микрообъекты включений минералообразующих растворов и расплавов.

Термодинамическая геохимия эндогенных процессов через включающие минералы имеет прямые связи с кристаллографией, минералогией и петрографией, которые разносторонне и все более точно изучают современное существование, физические свойства и состав минералов, теперь находящихся уже в виде прочно стабилизированных равновесных кристаллических и реже плохо организованных, аморфных неорганических веществ. Однако основной задачей этой отрасли науки в отличие от указанных наук, занимающихся изучением физических свойств и состава стабилизированных объектов, является исследование геохимических *закономерностей движения* элементов на *пути* к временной, но очень длительной организации их в минералах руд и пород. Эта задача диалектически может решаться только с учетом изменений физико-химических параметров активных минералообразующих сред, разнообразия в геологической обстановке формирования и современного нахождения эндогенных месторождений в земной коре (рис. 1).

Для физико-химических интерпретаций фактических данных, полученных по включениям минералообразующих сред, радикальное значение имеют экспериментальная геохимия, физическая химия и термодинамика искусственных систем растворов и расплавов, знание геологии эндогенных месторождений и минеральных парагенезисов руд и пород. В свою очередь разнообразные исследования подвижных природных геохимических систем, герметизированных в минералах, в значительной мере содействуют синтетическому использованию данных всех этих

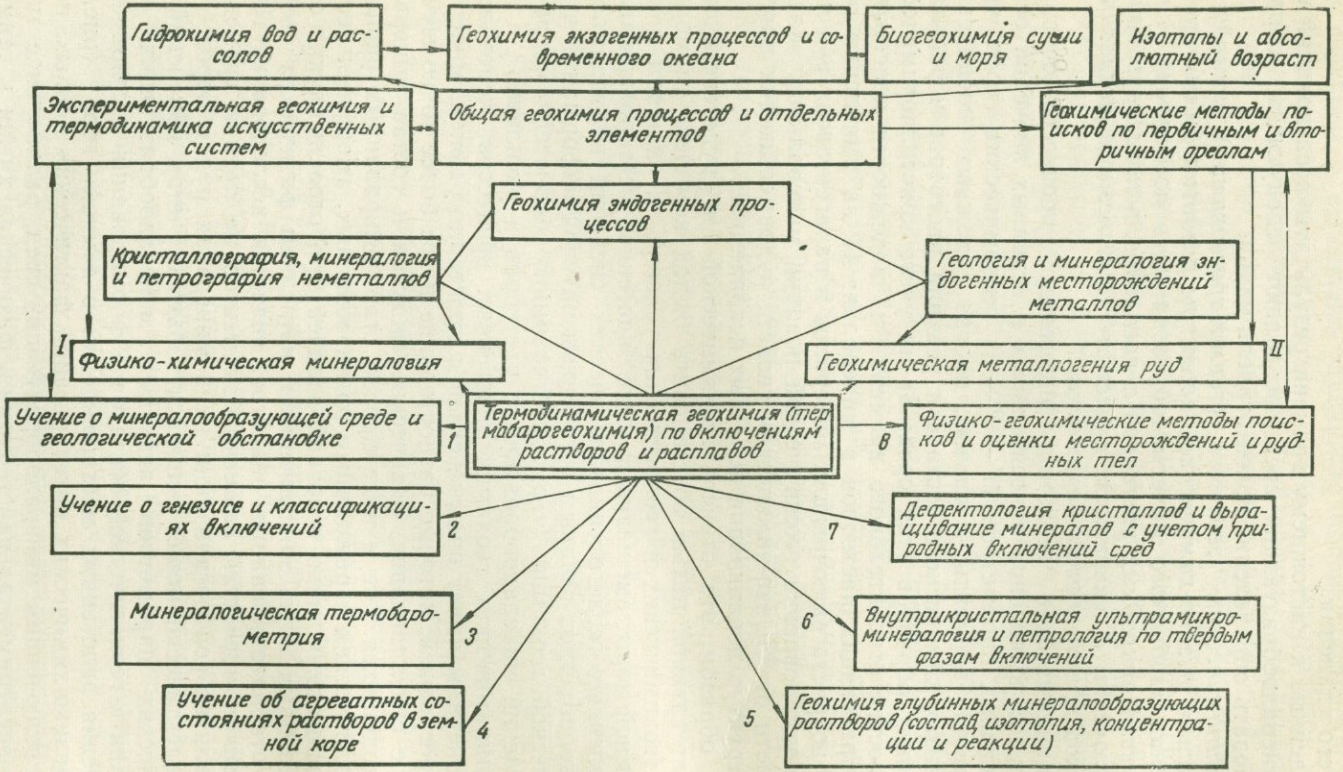



Рис. 1. Положение термодинамической геохимии (термобарогеохимии) среди смежных наук, ее главнейшие ответвления (*I—II*) и направления развития (*1—8*).

наук в генетическом аспекте, в координатах пространства и относительного времени становления минеральных объектов.

Обширная и разнообразная научная информация, которую доставляют системы включений в минералах, позволяет уверенно рассчитывать на успешное комплексное развитие в пределах термодинамической геохимии (термобарогеохимии) глубинных процессов минералообразования следующих направлений (см. рис. 1), уже теперь вызывающих необходимость специализации и среди самих исследователей включений.

1. *Учение о минералообразующей среде и геологической обстановке,* которое с учетом их взаимодействия позволяет разрешать серию методологических вопросов при раскрытии генезиса эндогенных месторождений, детально классифицировать последние и синхронизировать стадийное образование руд с изменением окружающих пород.

2. *Учение о генезисе и классификациях включений* в минералах по составу, состоянию, количеству и объемному соотношению фаз, наблюдающихся при обычной температуре, по происхождению и относительному времени образования нормальных и аномальных включений. Это должно обеспечивать точное использование полученных данных для интерпретаций результатов экспериментов и анализов и для разработки кода генетической информации в эндогенном минералообразовании вообще и на каждом конкретном месторождении металлических и неметаллических полезных ископаемых в частности, не говоря уже о сопоставлениях с минералами Луны, космическими минералами метеоритов и включениями в тектитах.

3. *Минералогическая термобарометрия* глубинных процессов минералообразования и метаморфизма пород, осуществляющаяся в первую очередь путем гомогенизации термодинамических систем включений их нагреванием до исходного состояния, а иногда и охлаждением до отрицательных температур. Воспроизведение искусственных включений в автоклавах для получения поправок.

4. *Учение об агрегатных состояниях* растворов в земной коре по включениям в минералах, развивающееся путем измерения соотношений фаз в статическом состоянии и термодинамически посредством выявления типов и видов гомогенизации включений растворов различной плотности.

5. *Геохимия глубинных минералообразующих растворов включений* обеспечивает выявление состава путем микроспектроанализа, нейтронной активации и ультрамикроанализа индивидуальных включений, валовые анализы их вытяжек, определение и фракционирование изотопов легких элементов, а также суждения о концентрациях и реакциях глубинных растворов с помощью криометрии и микроэлектрометрии газово-жидких включений и др.

6. *Внутривакуольная ультрамикроминералогия и петрология по твердым фазам включений,* обособившимся из капсюлированных микропорций высококонцентрированных природных геохимических сред (растворов и расплавов). Эти очень разнообразные и зримо растворяющиеся или расплавляющиеся при нагревании минералы-узники снова кристаллизуются в вакуолях минералов при охлаждении до обычной или отрицательной температуры и, несмотря на ультрамалые размеры, при современных методах рентгеноспектрального и электронографического изучения допускают выявление их строения и состава, но не всегда их названия (новые минералы).

7. *Дефектология кристаллов и выращивание минералов с учетом природных включений сред* для получения искусственных дефицитных кристаллов и аморфных веществ исследованием геохимических систем разнообразными методами во многих указанных направлениях.

8. *Физико-геохимические методы поисков и оценки месторождений и рудных тел* по ореолам пропаривания и легкой фракции шлихов (декрептофонический и шлиховзрывной методы).

Таким образом, термодинамическая геохимия (термобарогеохимия) глубинных природных процессов, занимая вполне определенное положение на стыке ряда важнейших наук, сама по себе является комплексной научной дисциплиной, оснащенной собственными методами и техникой экспериментов. Она уже начала питать обильным фактическим материалом породившие ее науки и постепенно обеспечивает прикладное преломление полученных научных результатов.

Автор монографии в течение последней четверти века пытался выполнить в своей научной и организационной деятельности пожелание В. И. Вернадского [19] о *настойчивом и систематическом* изучении включений в минералах. Первоначальные итоги такой работы были опубликованы в книгах «Критерии познания генезиса минералов и среда рудообразования» (1949 г.) и «Исследования минералообразующих растворов» [33].

Настоящая монография представляет собой результат усилий не только автора, но и целого большого коллектива советских геологов. Многие аспиранты автора и сотни его последователей в научной, методической и технической работе по созданию основ термодинамической геохимии эндогенных процессов вносят посильный вклад в генетическое познание природы эндогенного минералообразования.

Раздел первый

# ЭЛЕМЕНТЫ МЕТОДОЛОГИИ И ЗНАЧЕНИЕ СРЕДЫ В ПОЗНАНИИ ЭНДОГЕННОГО МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЯ

---

Условие познания всех процессов мира в их *«самодвижении»*, в их спонтанейном развитии, в их живой жизни, есть познание их как единства противоположностей. Развитие есть «борьба» противоположностей.

*В. И. Ленин.* Полн. собр. соч., т. 29, стр. 317

Часть I

# ОСНОВНЫЕ И ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ФОРМЫ ДВИЖЕНИЯ МАТЕРИИ И СРЕДА РАЗВИТИЯ РАЗЛИЧНЫХ ПРОЦЕССОВ

Естествознание познает тела, только рассматривая их в отношении друг к другу, в движении. Познание различных форм движения и есть познание тел. Таким образом, изучение этих различных форм движения является главным предметом естествознания.

*К. Маркс* и *Ф. Энгельс*. Соч., т. 33, стр. 68

## Глава 1

## ОСНОВНАЯ МИНЕРАЛОГИЧЕСКАЯ ФОРМА ДВИЖЕНИЯ СРЕДИ ДРУГИХ ФОРМ РАЗВИТИЯ МАТЕРИИ

Силы кристаллизационные представляются в явлениях Космоса и нашей Земли фактором огромного значения... Кристаллическое состояние материи... есть одна из форм закрепления связи между отдельными элементами (ионами), одна из сил мешающих их свободному передвижению... является в общем случае некоторою конечною формою накопления вещества, происходящею с выделением энергии и потому относительно более устойчивою.

*А. Е. Ферсман* [109]

Геолого-минералогические науки, исторические по своему существу, во 2-й половине XX века начинают все более интенсивно переходить на путь генетического исследования минеральной природы, надежно сохранившей внутри кристаллов, слагающих земную кору, живые геохимические системы включений минералообразующих расплавов и растворов. Эти мельчайшие объекты, в наш век научно-технической революции оказавшиеся доступными для разносторонних термодинамических испытаний и ультромикрохимических анализов, предоставили широкие возможности для расшифровки динамики процессов далекого геологического прошлого, происходивших в глубинах земной коры. Именно поэтому первый раздел этой книги, предваряющей монографию о новой отрасли науки «Термобарогеохимии эндогенных процессов», носит методологический характер, пока еще мало популярный в некоторых современных академических геологических кругах, не имеющих возможности или не желающих овладеть материалистической диалектикой развития минеральной природы.

### *Некоторые особенности познания минерального мира*

Как становится все более признанным, в развитии наук об относительно стабилизированном веществе Земли и Космоса, его быстрых и замедленных трансформациях, очень большое значение имеют философские представления об основных формах движения материи, законах и категориях диалектики природы. Ни одно частное явление, фиксирующее качественное и количественное изменение того или иного природного, в том числе минерального, объекта на пути от его зарож-

дения, последующего развития и становления в относительно устойчивой форме, вплоть до утраты им цельности (разложения), с превращением в другое вещество не может быть генетически осмыслено вне связей с окружающей его средой, изменения которой регулируют ход развития системы *среда — объект* в единстве и борьбе внутренних и внешних противоречий.

Анализ изменений вещества и процесса до элементарных их составляющих и затем синтез полученных результатов для раскрытия общих связей на более высоком уровне лежат в основе любой генетической, а следовательно, диалектической науки. Это оказалось особенно необходимым в общем *землеведении и минералогии*, где описательное направление доминировало в течение последних столетий.

Классики материалистической диалектики Ф. Энгельс и В. И. Ленин даже на основе ограниченных данных естественных наук прошлого и начала нашего века представили общие незыблемые основы познания причин качественного разнообразия материи.

Исходя из темы монографии, мы можем уделить только ограниченное внимание общим вопросам формирования очень многообразного *минерального мира* нашей планеты, развивающегося по специфическим законам. Основное внимание будет уделено возможности генетической расшифровки эндогенных скоплений минеральных веществ, образующих так называемые «магматические и постмагматические» месторождения твердых металлических и неметаллических полезных ископаемых.

Образование последних во времени и пространстве, как и все на Земле, следует диалектическим законам природы. Однако в области геолого-минералогических наук субординация частного с общим на современном уровне знаний вызывала и вызывает еще очень много трудностей на путях генетического исследования эндогенных месторождений, отставшего от сопредельных естественных и точных наук: физики, химии и биологии.

Это объяснялось некоторыми крупными учеными тем обстоятельством, что представители каждой из этих наук могли действовать успешнее потому, что целеустремленно шли по пути раскрытия «своих» основных форм движения материи: физической, химической и биологической. Это мнение, высказывавшееся в начале 60-х годов нашего века президентом АН СССР А. Н. Несмеяновым, не может быть признано правильным.

Философское осмысливание неорганического мира Земли показывает, что у представителей геолого-минералогических наук тоже имеется своя путеводная линия, т. е. их основная вполне специфическая минералогическая, или *минеральная, форма движения материи,* которая ранее в силу субъективных и объективных причин не могла быть раскрыта и обоснована *, хотя предположения о ней уже имеются в «Диалектике природы» Ф. Энгельса.

Следует подчеркнуть, что по сравнению с физиками, химиками и биологами, конкретные объекты изучения которых современны и находятся в их «руках» или в доступных пределах для исследования их с помощью точнейших приборов, у геологов (минералогов) они оказались относящимися к очень далекому прошлому планеты или часто связаны с процессами, происходившими и происходящими на больших, недоступных для непосредственного познания глубинах земной коры.

Систематическое экспериментальное исследование микрообразцов минералообразующих сред, герметизированных во включениях в минералах, открывает совершенно новые пути преодоления этих двух кардинальных трудностей и широкие возможности введения меры и числа

---

* Первая попытка в этом направлении была сделана Н. П. Ермаковым [36]. *(Прим. ред.).*

в анализ процессов древнего глубинного минералообразования. Именно здесь наметился новый качественный скачок, обеспечивающий *генетическое познание развития минерального мира в геологическом прошлом на уровне точных наук*. Такой уровень выдерживался пока только при статическом минералого-петрографическом и химическом изучении самих минералов, руд и пород земной коры, но не процессов и явлений, их создававших, что становится доступным с присоединением III канала информации.

Возникновение литосферы и гигантских материковых глыб нашей планеты, состоящих более чем на 95% из кристаллов разнообразного, но всегда очень закономерного строения и находящихся в закономерных сочетаниях друг с другом, обязано не только физическим и химическим процессам. Последние всегда предшествуют и в известной мере сопровождают и регулируют закономерную минеральную организацию веществ как в грандиозных масштабах земной коры, так и на локальных ее участках, при образовании отдельных месторождений.

Законы физической химии предоставляют нам очень важные общие основы для интерпретаций, но сами по себе не обеспечивают конкретных возможностей генетического познания эндогенного минерального мира.

Искусственное получение минералов из разных кристаллизующих сред — расплавов, газовых и жидких растворов, представляющих в автоклавах искусственные минералообразующие физико-химические системы, показывает, что в них происходит *не химический синтез вещества, а рост кристаллов*; эти понятия, как известно, далеко не идентичны. Мы хотим особо подчеркнуть то очень важное обстоятельство, что в подавляющем большинстве случаев и в природе происходило не простое осаждение минералов из жидких и газовых сред в результате химических реакций, а *первичная кристаллизация* — быстрый или замедленный рост каждого минерального, даже самого мелкого индивида ныне твердой кристаллически-зернистой породы или руды.

Этот своеобразный процесс минералообразования заключается в *пространственной «упаковке»* ионов, атомов и радикалов тех или иных разнообразных веществ в абсолютно закономерные кристаллические решетки минералов. Особенно наглядно результаты такого минералообразования, роста кристаллических индивидов и их агрегатов можно видеть в интрузивах, на месторождениях и в рудных телах выполнения, образовавшихся в открытых тектонических и атектонических полостях.

Другая группа месторождений и тел замещения (метасоматоза) и собирательной кристаллизации развивается по уже существовавшим твердым минеральным веществам, и возникающие новые минералы и руды с общей точки зрения получают как бы вторичное рождение. В природе это довольно распространенный способ минералообразования. Доминанта при интерпретации таких явлений находится здесь наиболее близко к области, промежуточной между основной химической и минералогической формами движения материи.

При метаморфических и гидротермальных преобразованиях пород и руд происходит иногда настолько интенсивная перестройка кристаллических веществ, что они теряют свои первичные свойства и превращаются в новые минералы и их агрегаты. Специфика этих вторичных процессов преобразования первичных пород и руд связана с *ретроградными* проявлениями основных химической и физической форм движения материи в геологических циклах развития земной коры.

Кроме доминирующих эндогенных процессов кристаллообразования и преобразования минералов в глубинах земной коры, на поверхности Земли постоянно происходит экзогенное уничтожение и новое воспроизведение кристаллов, а также *отложение аморфных веществ* из колло-

идных ювенильных, вадозных и смешанных растворов. Эти проявления закона единства и борьбы противоположностей и закона отрицания оказываются сложно взаимодействующими и занимают в минеральной природе вполне определенное место. Развиваясь в результате действия «экзогенных» физико-химических сред, вызывающих реакции между веществами под воздействием солнечной энергии, они обусловливают общие и частные геологические формы движения материи. Сведение к физике и химии минералого-петрогенных, литогенных и других геологических процессов, сформировавших, например, грандиозные по размерам кристаллические континентальные глыбы материков с их осадочным чехлом, представляется попросту невозможным.

Все многообразные процессы и явления минералообразования и преобразования минеральных веществ, связанные друг с другом сложными сочетаниями, подчиняются и характеризуют в своей совокупности основную минералогическую форму движения материи, закономерно проявляющуюся среди других основных форм ее движения на нашей планете.

### *Основная минералогическая форма движения материи*

В выдающейся философской работе «Материализм и эмпириокритицизм» В. И. Ленин писал о том, что если вчера углубление человеческого познания объектов «не шло дальше атома, сегодня — дальше электрона и эфира, то диалектический материализм настаивает на временном, относительном, приблизительном характере всех этих *вех* познания природы прогрессирующей наукой человека. Электрон так же *неисчерпаем,* как и атом»... (Ленин В. И. Полн. собр. соч., т. 18, стр. 277).

Двадцать пять лет назад стали известны протоны и нейтроны, позитроны и фотоны, а сейчас насчитывается уже более 100 простейших частиц материи и 104 элемента. Уже получены новейшие данные ядерной физики о том, что протоны и нейтроны, слагающие ядра атомов и постоянно превращающиеся друг в друга, сами имеют сложное строение. Микрочастицы материи прямо или через ряд промежуточных форм могут превращаться друг в друга.

Перед нами благодаря современным успехам науки открывается целый *ряд первичных физических полей и микрочастиц материи, уходящий в бесконечность.* Мир этих материальных частиц, находящихся в непрерывном взаимодействии и разнообразных формах движения, является безграничной ареной исследований атомной и субатомной физики.

Прослеживая развитие элементарных материальных частиц по восходящим ступеням развития, мы наблюдаем в микро- и макромире все более сложную и совершенную организацию материи. На Земле она достигла появления сложнейшей комбинации миллиардов нервных клеток мозга — нейронов, позволяющих человеку не только ощущать и запоминать, но и мыслить, творить, своим трудом активно воздействовать на природу и использовать ее, выходить в космос, сознательно организовывать свою жизнь и общественную деятельность. Последнюю высшую форму движения органической материи Ф. Энгельс назвал социальной формой движения. В качестве первой наипростейшей формы он выделял *механическое движение.*

Ф. Энгельс более 80 лет назад выделил также три другие *основные формы движения материи — физическую, химическую* и *биологическую,* каждая из которых охватывает широкий круг родственных явлений и завершается последовательной организацией материи в новые элементарные частицы: атомы, молекулы, клетки живого белка. Эти качественно разные формы организации более мелких частиц материи каж-

дой предыдущей ступени в более крупные и сложные материальные единицы — ее структурные элементы, являются *вехами* (реперами), разграничивающими звенья цепи восходящего бесконечного развития в неисчерпаемом мире материи.

До сих пор спорят о критериях разграничения основных форм движения материи, особенно в связи с появлением ряда пограничных наук. Нам кажется, что для разрешения этих споров следует воспользоваться указанием В. И. Ленина (Полн. собр. соч., т. 18, стр. 277) на особое значение «*вех* познания природы» материальных носителей разных форм движения. Сколько установлено этих *элементарных реперных форм материи*, столько будет и *основных форм* ее движения.

Естественно, что в каждой новой элементарной форме материи сохраняются и материальные носители предыдущих более простых форм движения, а следовательно, в подчиненном положении и сами формы движения. Таким образом, происходит как бы *передача эстафеты от простой к более сложной основной форме движения,* реализация старого в новом объекте, находящемся на более высоком качественно ином уровне развития, со свойственными ему иными специфическими противоречиями.

Основная физическая форма движения материи проявляется во всем разнообразии от субатомных — ядерных, электромагнитных, тепловых, световых и других движений вплоть до организации и движения самих атомов, а основная химическая форма проявляется в эндотермическом соединении атомов в разнообразные *молекулы* и в молекулярных движениях.

Определение химии как науки о веществах и их превращениях очень неточное и сейчас отвергается самими химиками. Это определение, с одной стороны, как бы безмерно расширяет область деятельности химии, а с другой, наоборот, позволяет рассматривать ее как раздел физики или, по крайней мере, физической химии.

Сведение химии к физике так же неправомерно, как и сведение физики к химии или к химической физике. Несводимость химического движения к физическому, по мнению Г. В. Челинцева [121] и других, заключается в том, что «*молекулы являются не агрегатами* стянутых в пространстве неизмененных атомов, но химическими *соединениями, в которых образующих их атомов, как таковых, нет*». И далее: «Химический мир представляет собою не совокупность дискретных атомов, но совокупность дискретных молекул, а изменения в этом мире осуществляются... по способу скачкообразного качественного превращения молекул» [121, стр. 190].

Важнейшей теоретической проблемой химии является проблема *внутримолекулярных* взаимоотношений атомов, *утративших свою индивидуальность* в результате обычно быстрых химических реакций молекулообразования, происходящих с *поглощением энергии,* выявление межатомных связей в молекулах и перестройка электронных оболочек. «В стереохимической теории еще раз подтвердилось, что явление химического строения никак не сводится к явлению пространственного размещения атомов» [121, стр. 195].

В какой же реперной материальной единице мы находим совокупность ионов и атомов, воздействующих друг на друга, но почти не потерявших своих свойств и абсолютно закономерно располагающихся в пространстве? Такой формой являются *кристаллы минералов*, слагающие земную кору, вещественный состав, строение и происхождение которой освещается геолого-минералогическими науками.

Коренной особенностью твердого *кристаллического* состояния материи как особой формы ее существования является закономерная организация элементарных частиц в трехмерных пространственных решетках минералов. Основные свойства минеральных кристаллов вне зави-

симости от их химического состава характеризуются *минимальной внутренней энергией* слагающих их частиц, наибольшей относительной *статичностью, плотностью и однородностью* их «упаковки». Из термодинамики следует, что минимумом свободной энергии обладают тела с наибольшей упорядоченностью и компактностью расположения структурных частиц, т. е. отвечающие закону плотнейшей упаковки и закону энергетической выгодности состояния вещества. При кристаллообразовании минеральная природа конструирует для разных веществ определенную форму первичной элементарной ячейки и соответствующую ей макроформу минералов.

*Способность их к самограпке* в процессе роста кристаллических индивидов и геометрические свойства многогранников, выраженные в 14 типах кристаллических решеток Браве, в 32 видах симметрии Гадолина и в 230 пространственных группах симметрии Е. С. Федорова, с удивительной наглядностью подчеркивают различия между кристаллическими (минеральными) и химическими соединениями элементарных веществ. Вообще, о каком химическом соединении одинаковых атомов углерода может идти речь, например, в таких очень разных минералах, как алмаз и графит, одинаковых по составу! Этот пример в наиболее «чистом» виде подчеркивает глубокую специфичность основной минеральной формы движения материи и никак не допускает ее подмены химической формой движения.

После открытия диффракции рентгеновских лучей в 1913 г. и последующего очень широкого применения рентгеноструктурного анализа с 1920-х годов было изучено несколько тысяч кристаллических структур природных минералов и установлено почти полное отсутствие в них молекул. Прежние представления химической и других наук, таким образом, применительно к кристаллам оказались неверными, однако из этого факта не было сделано должных генетических выводов. Выяснилось, что минералы состоят из дискретных ионов и атомов, иногда с участием гидроксильных анионов и комплексных радикалов, таких как $CO_3$, $SO_3$, $TiO_3$, $SO_4$, $PO_4$, $SiO_4$, $WO_4$, $Si_2O_7$ и др.

По различиям структурных кристаллообразующих частиц выделяются четыре типа кристаллических решеток минералов: ионные, комплексные, атомные и молекулярные.

Большинство минеральных веществ имеет *ионные решетки*, узлы которых заполнены положительно заряженными катионами, сочетающимися с разным количеством отрицательно заряженных анионов (галит, галенит, флюорит, кварц, рутил, халькозин и др.).

Очень распространены в земной коре кристаллы минералов, имеющих *комплексные решетки*, в узлах которых роль катиона играют отдельные ионы, а роль анионов — комплексы (радикалы) или наоборот. Эти комплексы представляют собой также ионные пространственные сооружения с центральным катионом и периферическими анионами. Свыше половины комплексных решеток природных минералов образовано с участием наиболее устойчивых групп ионов замкнутых геометрических форм типа тетраэдра ($SO_4$, $SiO_4$, $PO_4$) или октаэдра ($TiO_3$). Реже в кристаллообразовании участвуют плоскостные ($CO_3$, $SO_3$), пирамидальные и уголковые комплексы [7]. Представители минералов с комплексными решетками очень разнообразны (силикаты, алюмосиликаты, карбонаты, сульфаты, фосфаты, вольфраматы и др.).

Самородные минералы характеризуются малоустойчивыми атомными решетками, однородные атомы которых удерживаются в равновесии только в результате некоторого резонанса движения электронов (золото, платина, серебро, медь и др.).

Только очень немногие природные минералы, такие как лед, самородная сера, реальгар и аурипигмент, по Н. В. Белову [6], построены из незаряженных дискретных молекул (рис. 2). Молекулярные природ-

ные кристаллические постройки не только очень редки, но и *очень непрочны*. Они при нагревании минералов легко превращаются в жидкость и газ. Несколько более часто встречаются комплексные ионно-молекулярные минералы-кристаллогидраты (гипс, натрон и др.), в которых нейтральные молекулы воды координируются вокруг каких-либо ионов.

Разные минералы имеют свой элементный химический состав, выявляющийся *при разрушении* (анализе) их кристаллов, и разные специфические физические свойства (магнетизм, пьезо- и пироэлектри-

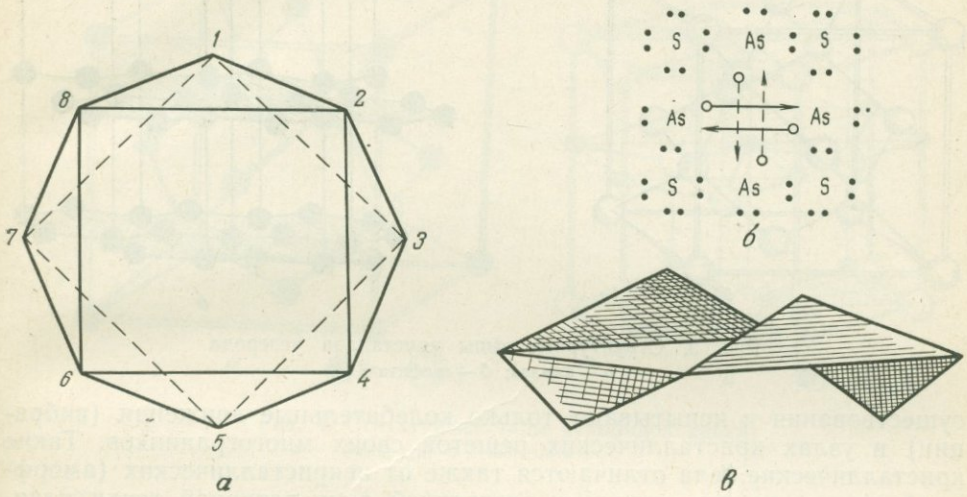



Рис. 2. Молекулярные структуры серы и реальгара (по Н. В. Белову)
*а* — молекула $S_8$ из структуры элементарной серы; *б* — электронная схема молекулы реальгара; *в* — молекула $As_4S_4$ в структуре реальгара

чество, двулучепреломление света, люминесценция и др.). Природное разрушение кристаллов может быть химическим (растворение), физическим (плавление) и даже механическим (очень тонкое измельчение). Однако их зарождение в природе и *рост с выделением энергии* путем исключительно закономерного расположения в кристаллических решетках ионов, атомов и радикалов *без утраты ими своих свойств — это отнюдь не химический синтез* веществ в молекулы, осуществляющийся с поглощением энергии. Это относительно наиболее статичное и прочное *кристаллизационное* соединение материальных структурных единиц в качественно новую, целостную систему, в которой, как было показано, отмечается особый специфический тип взаимодействия образующих ее структурных единиц, расположенных в пространстве симметрично и строго периодически.

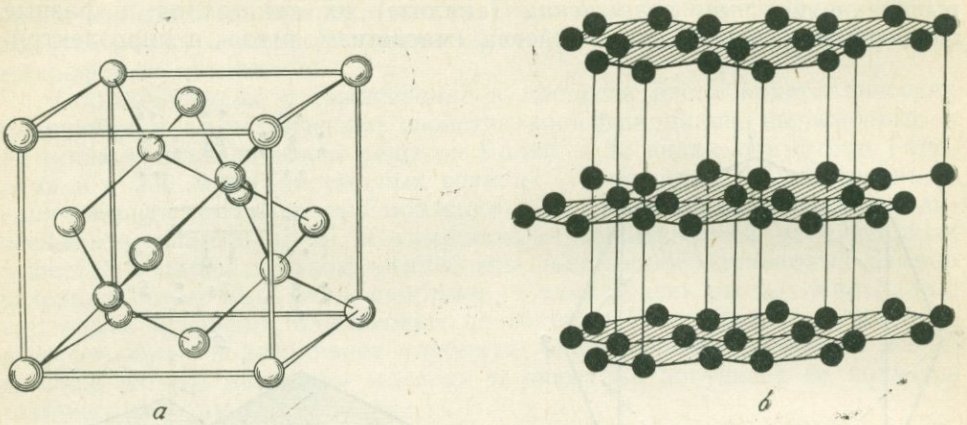
Материальные составляющие газовых сред, как известно, совершенно не организованы и, обладая большой свободной энергией, находятся в постоянном беспорядочном движении и столкновении. Они почти не связаны друг с другом и стремятся рассеяться, занять возможно больший объем.

Молекулы природных и искусственных жидких химических систем, хотя и более тесно связаны, постоянно перемещаются друг относительно друга, обусловливая текучесть веществ, способность принимать форму сосуда или, при малом объеме, сферическую форму.

«Твердые» аморфные изотропные тела лишены или почти лишены определенной упорядоченной структуры и, следовательно, многогранной формы. Слагающие их частицы могут медленно перемещаться друг

относительно друга и должны рассматриваться как аналоги жидкостей с очень большим внутренним трением*.

Напротив, структурные элементы (ионы, атомы, радикалы), образующие закономерно организованный совершенный *коллектив кристаллической системы,* не способны к свободному перемещению друг относительно друга без существенного изменения физико-химических условий



*а* *б*

Рис. 3. Структурные типы кристаллов углерода
*а* — алмаза; *б* — графита

существования и испытывают только колебательные движения (вибрации) в узлах кристаллических решеток своих многогранников. Такие кристаллические тела отличаются также от некристаллических (аморфных) «твердых» тел наличием постоянной температурной точки плавления, при которой происходит быстрое разрушение кристаллической решетки.

Проявления пространственного перемещения элементарных частиц в трех приведенных системах организации материи (газ, жидкость, твердое тело — кристалл), как видно, различны.

Кристаллы минералов, таким образом, представляют собой результат особой наиболее совершенной и устойчивой формы равновесного существования «неживой» материи, находящейся на высокой ступени организации. Они являются, как было показано, структурными элементами-носителями вполне специфической основной формы движения материи, включающей в себя другие, по отношению к ней низшие, существенно отличные химическую и физическую основные формы движения.

Конечно, каждый минерал имеет свой состав, который может быть выражен в виде стандартной химической формулы. Однако это не должно закрывать от нас глубоких различий между химическим соединением атомов в молекулы и объединением их в пространственные кристаллические решетки минералов.

По Ф. Энгельсу, взаимное воздействие частиц материи и есть движение. При этом, по его мнению, очень важно учитывать на разных ступенях развития материи не только *из чего* построены природные тела, но и *как* они построены.

Как уже отмечалось ранее, при одном и том же химическом составе (углерод) разное пространственное сочетание атомов в кристаллах (алмаз, графит) обеспечивает совершенно различные внешние

* Природные жидкости и газы не могут рассматриваться в качестве минералов, однако относительно устойчивые гиалиновые, коллоидные и метамиктные вещества сравнительно постоянного состава можно называть аморфными минералами, или минералоидами.

формы и физические свойства вещества (рис. 3). Кроме того, углерод может существовать в земной коре в «твердом» аморфном виде (уголь). Самородные металлы также представляют собой *кристаллизационные, минеральные, но не химические соединения атомов.*

Такие разные минералы, как сфалерит — вюртцит, кальцит — арагонит, рутил — анатаз — брукит, имеют соответственно одинаковый химический состав, но совсем разные физические свойства и кристаллические формы своих индивидов (рис. 4).

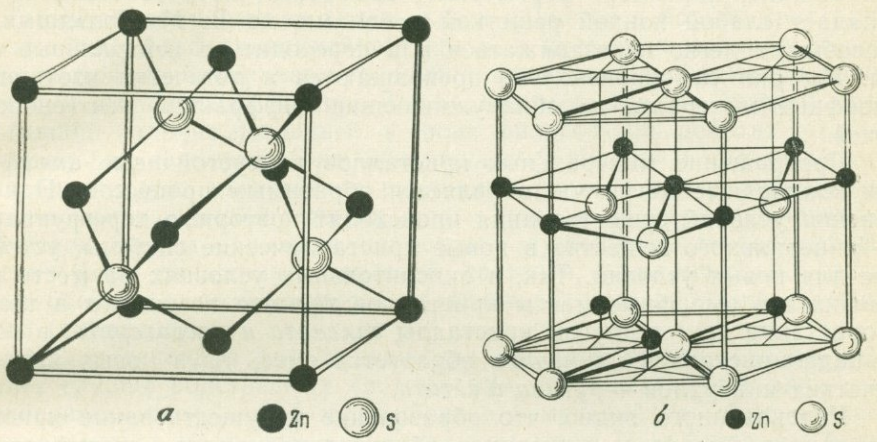



Рис. 4. Структурные типы сульфидов цинка
*а* — сфалерита; *б* — вюртцита

То же можно видеть у многих других минералов, например, в кристаллическом ряду полиморфных модификаций кремнезема — высокотемпературный α-кварц⇄β-кварц⇄гексагональный β-тридимит⇄кубический кристобалит — модификаций, которые в зависимости от изменений параметров среды существования ($t°$, $P$) могут самопроизвольно превращаться друг в друга с изменением качества (свойств) и количества (объема и удельного веса). При этом изменения происходят или скачкообразно (α—β-кварц, α—β-борацит), или же медленно, как в случае перехода ромбического α-тридимита в β-кварц и т. п.

В развитии минерального мира существуют необратимые (монотропные) превращения кристаллов, например ромбического арагонита в тригональный кальцит, и обратимые, энантиотропные (ромбическая и моноклинная самородная сера).

В зависимости от существенного изменения внешних условий существования кристаллической материи ионы, атомы и радикалы ряда минералов могут перестраиваться в образованных ими пространственных решетках. При этом возникают минералы другой разновидности, приспособленные к новым условиям. Таким образом, минералы могут изменять *физические свойства,* сохраняя прежний *состав,* и это дополнительно утверждает *самостоятельность минералогической формы движения* материи.

Более того, резкие изменения в параметрах внешней среды существования минералов и радиоактивное излучение иногда приводят к превращению кристаллов в их противоположность — аморфную массу, не обладающую упорядоченной пространственной структурой (метамиктные минералы). Например, совершенные, бесцветные, прозрачные кристаллы *ферробрусита,* будучи извлечены из недр земной коры на поверхность, через несколько дней в воздушной среде становятся бурыми, затем темно-коричневыми. В них в результате перехода двухвалентного железа в трехвалентное происходит радикальная химическая

*Дезорганизация кристаллического состояния.* Рентгеноструктурный анализ темно-коричневого ферробрусита уже не показывает признаков кристаллического строения, хотя внешняя форма минерала сохраняется прежней. Изотропизация и другие самопроизвольные преобразования первично кристаллических минералов в результате распада их структуры, по Ф. В. Чухрову [122], установлены для многих простых и сложных силикатов (циркон, торит, ортит, гадолинит, чевкинит и др.).

Целый ряд таких кристаллических минералов сложных окислов, как эшинит, пирохлор, фергюсонит, самарскит, иттротанталит и др., обладает слабой ионной решеткой с ионами, по В. М. Гольдшмидту, способными легко перезаряжаться или переходить в нейтральные атомы. Все они самопроизвольно превращаются в оптически изотропные аморфные минералы, не обнаруживающие диффракции рентгеновских лучей.

Превращение минеральных кристаллов в неустойчивые аморфные или коллоидные массы часто является обратимым процессом. При изменении условий существования происходят повторные перегруппировки минерального вещества в новые кристаллические системы, устойчивые для новых условий. Так, в окислительных условиях на месте распавшихся в аморфные массы кристаллов *тиллита* возникают в тесном прорастании друг с другом кристаллы *галенита и касситерита*, а после распада кристаллов *ильменита* образуется смесь двух новых кристаллических минералов — *рутила и гётита.*

Из сказанного видно, что образование и существование кристаллических и аморфных минералов обусловлено вполне специфической основной минеральной формой движения материи, проявляющейся в земной коре и на ее поверхности в гигантских масштабах в относительно поздний этап саморазвития нашей планеты.

Предельно упрощенное определение этой формы движения материи в земной коре можно представить в следующей формулировке:

*Природный процесс наиболее устойчивого, плотнейшего объединения и фиксации ионов, атомов и радикалов элементов в закономерных симметрично-периодических пространственных решетках и динамическое существование минералов при изменениях в окружающей среде представляют собой одну из основных — минералогическую форму движения материи, которая проявляется в единстве двух ее взаимопротивоположных частных форм движения — кристаллизационной и аморфизационной (коллоидальной).*

На нашей планете первая из этих частных форм минерального движения резко доминирует в глубинах земной коры, а вторая имеет наиболее интенсивное проявление на низких термодинамических уровнях в условиях поверхности Земли.

Кристаллические минералы как наиболее упорядоченные могут быть наилучшим образом классифицированы по сходству и различиям в генезисе и конструкциях пространственных решеток или же по элементному составу структурных единиц. «Твердые» аморфные тела, представляющие собой частично или полностью неупорядоченно-скрепленные образования слагающих их частиц, систематизируются только по генезису и по химическому составу. Вслед за Ф. В. Чухровым [122] и другими исследователями мы принимаем их разделение на гиалиновые, или стекла, метамиктовые и породиновые (коллоидные) минералы.

Стекла ближе всех остальных стоят к кристаллическому состоянию вещества, так как все же иногда имеют несимметричную и непериодичную решетку, образующуюся, например, при быстром охлаждении силикатных, фосфатных и других отвердевших расплавов.

Метамиктные минералы представляют собой продукты изотропизации при распаде первично кристаллических минералов под воздействием $\alpha$-лучей. Через нагревание до разных уровней их можно снова

переводить в кристаллические фазы, что сопровождается выделением тепла. Например, метамиктный торит при 935° С становится тетрагональным, а выше 1400° С — моноклинным.

Коллоидные минералы — первичные продукты выпадения (выделения, осаждения) аморфного вещества в основном из водной жидкой среды в результате коагуляции и сокоагуляции мицелл — всегда стремятся к раскристаллизации с образованием метаколлоидов. Каждому гелиту простого состава может соответствовать и кристаллическое вещество, образовавшееся позднее.

Таким образом, можно видеть как в единстве и борьбе кристаллизационной и аморфизационной тенденций в процессах минералообразования постоянно проявляется основная минеральная форма движения материи в неорганическом мире Земли. Как известно, Ф. Энгельс, предполагавший наличие последней, в своих философских работах выделил не только ряд *основных форм движения материи*, но и дал решение о соподчинении этих качественно различных форм в закономерном диалектическом взаимодействии их друг с другом. На примере основной физической формы движения он показал существование *частных* физических форм движения — тепловой, световой, электрической — и тем самым обосновал необходимость различать формы движения разных рангов (порядков).

Каждая основная форма движения материи, таким образом, объединяет группы родственных частных или побочных форм движения, обусловивших бесконечное многообразие изменений в безграничном материальном, в частности в минеральном мире. Чем более мы будем углубляться в познание генетических закономерностей в пределах объединенных каждой основной формой движения *сфер развития материи*, тем больше будет выявлено частных форм ее движения.

На современном уровне понимания развития неорганического мира нашей планеты представляется достаточным в пределах основной минеральной формы движения материи различать отмеченные две крайние частные формы ее организации, преобразования и существования: наиболее совершенную — кристаллическую и наименее совершенную — аморфную.

В природе наблюдается взаимодействие и взаимопроникновение материальных носителей этих частных форм. Кристаллические частицы, как известно, образуют ядра мицелл, а в обсидианах наблюдаются кристаллоиды. В то же время некоторые типичные кристаллы, так называемые кристаллозоли, содержат коллоидно-дисперсные фазы, придающие минералам разную окраску: красную из-за примеси окиси железа (барит и карналлит), черную из-за тонко распыленных сульфидов и частиц углерода (кальцит) и т. п.

Основную минералогическую форму движения материи в кристаллических породах континентальных глыб и рудах месторождений вещественно характеризуют закономерно повторяющиеся повсюду взаимные сочетания — *парагенезисы и ассоциации минералов*, возникавшие в течение всей очень длительной истории формирования земной коры и образующиеся в настоящее время.

Лишь атомы немногих так называемых рассеянных элементов (Ga, Rb, Cd, Jn, Hf, Re), а также большинства актиноидов оказались неспособными принять активное участие в минералогической форме движения на Земле, т. е. образовывать самостоятельные кристаллические системы. Рассеянные элементы встречаются главным образом в виде изоморфных примесей в кристаллах, образованных атомами других элементов. Некоторые из элементов, по В. И. Вернадскому [17], вероятно, по этой причине исчезли на нашей планете (прометий, франций, нептуний, америций, кюрий и др.) или находятся в стадии вы-

рождения (актиний, один изотоп калия, рубидия и др.), а другие элементы, начиная с № 94 менделеевской таблицы (до № 104), были получены лишь искусственным путем.

### *Материальные носители основных форм движения материи на Земле и их взаимодействие*

Процессы, происходящие в минеральном мире нашей планеты, очень разнообразны. Также очень различны источники энергии, среда, место и способы проявления того или иного процесса в земной коре и на ее поверхности.

Химическая форма движения материи, широко проявляющаяся в возникновении и деятельности подвижных субстанций — расплавов, жидких водных растворов и углеводородов, в гидролизе, окислении и восстановлении, замещении и растворении ранее образовавшихся минеральных веществ, как наиболее близко стоящая к минералогической форме, *реализуется в последней наиболее ярко.*

Однако эта основная форма движения, возникающая из химической формы, как было показано ранее, включает в себя и первично обусловливается также и физической формой движения. Вокруг каждого растущего кристалла, например, возникает электромагнитное поле, имеющее чаще эллипсоидальную форму. Это, по Борну, связывается с явлением поляризации ионов, создающих дипольный момент также и внутри самих кристаллов. Грани кристалла, расположенные перпендикулярно длинной оси эллипсоида, растут быстрее граней, расположенных параллельно ей. Подчиненные электромагнитному полю ионы и их комплексы закономерно притягиваются и размещаются в кристалле, обеспечивая его послойный рост, сохранение постоянства углов между гранями, образование закономерных сростков и др.

Все три указанные основные формы движения активно взаимодействуют как в процессе роста кристаллов, так и позднее, внутри уже образовавшейся *кристаллической системы,* представляющей собой *новое, более сложное и наиболее совершенное состояние неорганического вещества.* В своих проявлениях в природе все эти формы движения, будучи тесно связанными друг с другом, подчиняются качественно различным закономерностям и приводят к разным результатам.

В восходящем ряду основных форм движения материи, представленном на рис. 5, каждая качественно своеобразная более высокая форма обязательно включает в себя предшествовавшие ей формы движения, но отнюдь не может быть сведена к их сумме. Физическая, ионно-электронная (атомарная) форма движения включает в себя внутриядерные, электромагнитные, квантовомеханические и другие формы движения элементарных частиц. В свою очередь на следующем уровне организации материи химическая (молекулярная) форма движения, вызывая соединения атомов с утратой ими индивидуальных свойств, содержит в себе физическую форму, а минералогическая форма, ими обусловленная, включает в себя в подчиненном виде и ту и другую формы движения материи. Таким образом, еще более высокая, биологическая, форма движения должна содержать все три предыдущие формы движения и их материальные носители. Посмотрим, имеет ли это место в действительности.

Во всей специальной и философской литературе постоянно говорится лишь о физических и химических процессах, проявляющихся в организмах, и почти забывается о не менее важных процессах биогенного минералообразования. Однако в биологической форме движения материи минералогическая форма проявляется не менее наглядно, чем все другие, и находится в теснейшем взаимном переплетении с процессами жизнедеятельности.

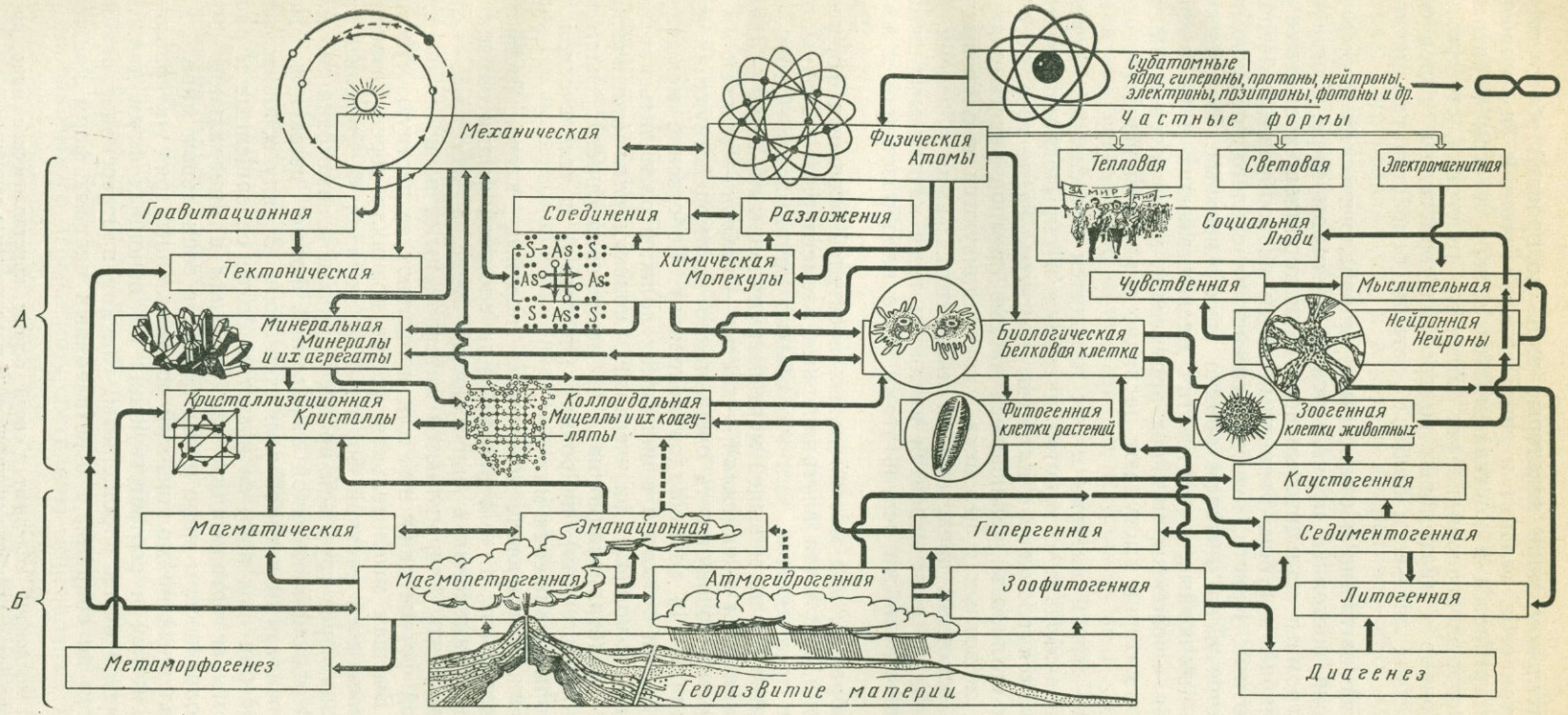



Рис. 5. Схема взаимодействия форм движения материи на Земле (по Н. П. Ермакову)

*А* — основные формы движения материи и элементарные (реперные) результаты их проявлений — материальные носители этих форм; *Б* — общие и частные геоформы движения материи

В растительном мире некоторые виды водорослей образуют, например, внутри себя кальцит и гипс; кристаллический (и аморфный) кремнезем встречается в клетках многих злаков и осок («фитолитарии»), в некоторых разновидностях сахарного тростника, стеблях бамбука и постоянно в диатомовых водорослях; кристаллы гипса образуются в клетках листьев и стеблей растений семейства тамарисковых и т. п.

Еще более наглядно и существенно минералогическая форма движения материи постоянно проявляется в животном мире. Достаточно вспомнить огромные кальцитовые постройки кораллов, кремневые скелеты радиолярий и губок, раковины самых разнообразных беспозвоночных животных. Кристаллическая симметрия скелетов некоторых из них отражается и на внешнем облике этих животных. Что касается позвоночных животных, в частности млекопитающих и их высшего представителя — человека, то в них проявления минералогической формы движения материи выступают наглядно в костном веществе скелетов и в зубах.

Канальцы живой материи в них находятся в теснейшем переплетении главным образом с кристаллическими и скрытокристаллическими *минералами карбонатов и карбонат-апатитов*. Такие твердые образования, как стилолиты, являющиеся частью органов равновесия всех позвоночных животных и человека, кристаллизуются в слуховых пузырьках и в основном представлены кальцитом. Камни в печени, почках и в других органах человека являются тоже наглядными показателями и вещественными результатами минералообразования в живых организмах.

Таким образом, ряд материальных носителей основных форм движения материи, исключая внутриядерные элементарные частицы, должен быть не трехчленным, как это обычно принимается (атом — молекула — клетка), а по меньшей мере восьмичленным — *ядро — атом — молекула — кристалл — мицелла* * *— клетка — нейрон — человек* и его мозг как высшая совокупность очень точно взаимодействующих материальных единиц (14 миллиардов нейронов). Собственно между этими материальными *вехами* и в них самих должны различаться в качестве основных *атомарная* (физическая), *молекулярная* (химическая), *минеральная* (кристаллизационная и аморфизационная), *клеточная* (фитогенная и зоогенная), нейронная (мозговая) и *человеческая* (социальная) формы движения материи.

Все животные, имеющие комплексы нервных клеток (нейроны), способны чувствовать, т. е. в простой или сложной форме ощущать и реагировать на изменения в окружающей среде, а некоторые — даже примитивно мыслить. Они являются материальными носителями основной нейронной формы движения или проявляют ее частную, чувственную форму. Высшая мыслительная форма возникла через развитие в труде этой последней частной формы. Как показал Ф. Энгельс, органическая жизнь через трудовой процесс пришла к самосознанию материи, к самой высокой основной *социальной* форме движения, материальными носителями которой являются *люди*. В ряду основных форм движения материи нам пока не известны более совершенные и рациональные формы ее организации, чем *кристалл* в минеральном мире, *человек* в биологическом мире и *коммунизм* в социальном мире.

Представленный прямолинейный восьмичленный ряд материальных реперных носителей и соответствующих им основных форм движения материи является очень упрощенным, так как прогрессивное развитие осуществляется по спирали, с ответвлениями частных форм движения

---

* Мицеллы коллоидов содержат в своей основе кристаллическое ядро, но они все же, по мнению автора, глубоко специфические материальные единицы.

материи и *главной дихотомией* ее на неорганическую, в том числе минеральную, и органическую природу.

В неорганической природе высшей *наиболее совершенной формой ее организации и движения являются кристаллы минералов,* способные, как было описано, реагировать на изменения в окружающих условиях среды внутренней перегруппировкой ионов в своих кристаллических решетках. Они развиваются в единстве и противоречиях *кристаллизационной и аморфизационной* частных форм движения материи, обеспечивающих дихотомию в живущем по своим специфическим законам минеральном мире.

В исследовании этих законов, ведущемся специалистами, вооруженными знаниями геолого-минералогических наук, существенно важно понимание ими основной минералогической формы движения материи, стоящей в едином ряду развития над физической и химической ее формами движения, но закономерно связанной с ними и в Космосе и на Земле.

Поэтому невозможно объяснить все многообразие в развитии минерального мира нашей планеты только с физико-химических позиций. Его глубокое познание возможно только с учетом специфики главного ряда основных взаимосвязанных форм движения материи — физической — химической — минералогической, в единстве и борьбе их проявлений в природе.

Рассмотрим это в рамках двух наиболее обычных способов образования веществ на Земле: *кристаллизационного соединения ионов в пространственные решетки и химического соединения элементов в молекулы.*

Процессы минералообразования всегда протекают в противоречии между силами, стремящимися удержать элементы в молекулах расплавов или растворов, и силами, стремящимися разрушить эти молекулы, поставить образующие их вещества на более высокий и более устойчивый уровень существования в виде кристаллических решеток, т. е. *перевести химическую форму движения материи в минеральную ее форму.*

Сам процесс образования каждого кристалла также противоречив и протекает в борьбе противоположностей между *силами притяжения и отталкивания катионов и анионов.*

Как известно, кристаллы растут своей поверхностью, непрерывно контактируя с кристаллизующей их химической, минералообразующей средой. После возникновения первичной кристаллической ячейки — зародыша минерала — вокруг него возникает и по мере роста усиливается электромагнитное поле, через которое из молекулярных растворов «вырываются» и укладываются в закономерных пространственных решетках ионы, атомы и радикалы вещества. Это отнюдь не химический, молекулярный синтез, а новое проявление движения материи.

Таким образом, создание нового (кристалл) и разрушение старого (молекула) едины в своих противоположностях. Приращение энергии в старом (нагревание растворов) может вызывать разрушение нового (растворение кристаллов), ранее возникшего в минералообразующей среде. Однако эти отступления (ретроградное движение) бывают временны, преходящи и новое всегда побеждает, вызывая истощение и исчезновение старого, менее совершенного.

В единой системе о б ъ е к т — с р е д а (минерал — раствор или расплав) борьба противоположных тенденций (кристаллизация — растворение), обычно заканчиваясь в пользу первого, обеспечивает в земной коре новую систему очень устойчивых соотношений в виде сочетания одинаковых по агрегатному состоянию минеральных ассоциаций, уже существующих без значительных противоречий в координате геологического времени. При этом, следовательно, наступает длительное

равновесие геологической среды и руды в ее единстве, к чему стремится развитие любого процесса.

Ф. Энгельс писал, что «равновесие неотделимо от движения... На Земле движение дифференцировалось в виде смены движения и равновесия: отдельное движение стремится к равновесию, а совокупное движение снова уничтожает отдельное равновесие» (Маркс К., Энгельс Ф. Соч., изд. 2, т. 20, стр. 561).

Созданные в результате проявления основной минералогической формы движения материи, в основном кристаллические сооружения континентов Земли в целом, оказались очень устойчивыми в течение многих геологических эпох, хотя, конечно, продолжали замедленное или флуктуационное изменение в условиях относительного равновесия, определившего доминанту эволюционного развития в земной коре.

Наиболее широко этот процесс развития, качественного изменения минеральных веществ, проявлялся на глубине земной коры в метаморфогенезе, а на поверхности в коллоидной форме преобразований (аморфизации) первичных пород и руд. Однако в любых случаях эндогенного или экзогенного нарушения равновесия он завершался или будет завершаться высшей ступенью кристаллической организации веществ минерального мира.

Применительно к новым термодинамическим глубинным условиям развития геологической среды происходила и происходит более совершенная для этих условий перекристаллизация ранее устойчиво существовавших веществ с образованием их новых сообществ. Аморфные вещества, как отмечалось ранее, содержащие в себе зародыши нового, более совершенного состояния (ядра мицелл, кристаллоиды), с течением времени даже при малом повышении термодинамических уровней их существования постепенно переходят в своем саморазвитии в полнокристаллические (иногда скрытокристаллические) вещества.

Борьба противоположностей между кристаллическим и аморфным состоянием веществ заканчивается в земной коре прогрессивной, наиболее устойчивой формой их организации.

Так, в постоянно протекающих процессах относительно быстрого или, наоборот, очень замедленного (равновесного) направленного развития в единстве и борьбе разных пар противоположностей, всегда возникающих при раздвоении единого (дихотомии), формировался минеральный мир нашей планеты в течение нескольких миллиардов лет.

## Глава 2

## О МНОГООБРАЗИИ И РАЗНЫХ УРОВНЯХ ПРОЯВЛЕНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ФОРМ ДВИЖЕНИЯ МАТЕРИИ

> В течение всей эволюции Земли идет грандиозный радиальный единый процесс выплавления и дегазации вещества мантии под действием радиоактивного тепла.
>
> Этот процесс ответственен за образование континентов, горных сооружений, опусканий и подъема платформ, за образование геосинклиналей и океана — всех наиболее глубоких геологических превращений.
>
> *А. П. Виноградов* [20]

### *Общее и частное в познании природы Земли*

Выдающуюся роль в понимании глубины научного наследства Ф. Энгельса в области диалектики природы сыграл Б. М. Кедров [49, 50, 51]. Он на основе логического анализа сумел доказать, что необходимо восстановить в правах *геологию* как одну из основных естест-

венных наук, подлежащих классификации, т. е. включению в общий ряд наук [49], а следовательно, признать и наличие геологической формы движения материи. Практически он же подготовил и необходимость выделения основной минералогической формы движения материи. В своей схеме (рис. 6) Б. М. Кедров поместил ее в боковой «ветви», отходящей от основного «ствола» развития природы.

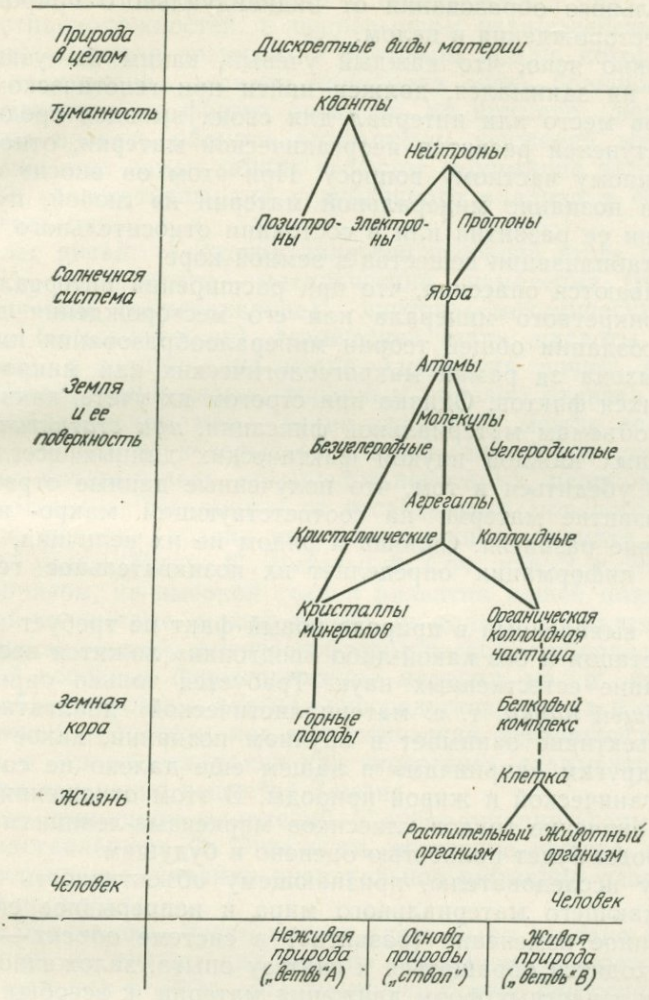



Рис. 6. Ступени развития природы (по Б. М. Кедрову)

Материя во Вселенной находится и находилась всегда на самых различных, практически бесконечно многообразных уровнях развития. Диалектическая наука о природе пытается на первых порах подвергнуть анализу, а затем и синтезу все многообразие материальных процессов и явлений через основные и частные формы движения материи как ступени ее развития, через законы и категории, вытекающие из фактов, полученных в окружающем мире.

Без должного понимания динамического существования материи в окружающей бездне Вселенной, элементов *всеобщего* для космоса, *общего* для Земли и *частного* в происходящих на ней отдельных процессах и явлениях мы никогда не сможем глубоко понять все конкретное, длительно, но все же временно стабилизировавшееся в земной коре в виде различных ее минеральных образований.

Анализ и синтез процессов и явлений и их материальных производных (минералов, руд и пород) не должны рассматриваться как некое философствование о минеральной природе, как некоторое ненужное абстрагирование от конкретных вещей. Сохранение должной научной строгости и глубины этого анализа и синтеза в период все еще доминирующих для минерального мира описательных методов в наших науках дает надежную перспективу понимания генезиса каждого данного минерального образования от индивидуального природного кристалла до месторождения в целом.

Совершенно ясно, что каждый ученый, каким бы узким кругом вопросов он ни занимался, должен найти при генетическом решении этих вопросов место или интервал для своих выводов среди многообразнейших ступеней развития неорганической материи, относящихся к каждому данному частному вопросу. При этом он вносит существенный вклад в познание минеральной материи на любой, пусть самой узкой, ступени ее развития или в состоянии относительного покоя, т. е. временной стабилизации вещества в земной коре.

Высказываются опасения, что при расширении интервала исследований от конкретного минерала или его месторождения до участия в будущем создании общей теории минералообразования имеется возможность выхода за рамки макрогеологических или микроскопически наблюдающихся фактов. Однако при строгом их учете, какими бы они не были по объемам материальной фиксации, *при статистическом учете* накопленных каждой наукой фактических данных всегда имеется возможность убедиться в том, что полученные данные отражают объективное развитие материи на соответствующем макро- или микрообъекту уровне развития. Сплошь и рядом не их величина, а качество объективной информации определяет их познавательное генетическое значение.

Каждый выявленный в природе новый факт не требует искусственной интерпретации и без какой-либо «подгонки» ложится весомым кирпичом в здание естественных наук. Требуется только определить на основе *всеобщей науки,* т. е. материалистической диалектики, какое место он объективно занимает в научном познании, какое отношение он имеет к другим «кирпичам» в нашем еще далеко не совершенном знании неорганической и живой природы. В этом отношении грандиозное научное значение трудов классиков марксизма-ленинизма для «неживой» природы будет полностью оценено в будущем.

Каждому исследователю, признающему объективность существования окружающего материального мира и непрерывное его быстрое или замедленное изменение (развитие) в системе *объект — среда,* неизбежно приходится обращаться к синтезу опыта, заложенного в понятии основных и частных форм движения материи, к всеобщим законам и категориям диалектики всего существующего, развивающегося и отмирающего на нашей и других планетах.

В настоящее время человек только начал выходить за пределы Земли, а это позволит будущим поколениям расшифровать закономерности ее развития в сравнении с закономерностями развития материи других космических тел.

Ф. Энгельс считал, что важнейшие отрасли знания — это звездная астрономия, химия, геология и что через последнюю *историзм* проникает во все естествознание. Более 80 лет назад он еще не мог оценить возможностей развития физики, геофизики, геохимии и считал, что предмет изучения геологии не история земного шара в целом, а лишь определенная *высшая стадия* его развития, проявлявшаяся в то «время, когда планета приобретает твердую кору и скопления воды на своей поверхности... Ее атмосфера становится ареной метеорологических явлений в современном смысле этого слова, а ее поверхность — ареной

геологических изменений...» (Маркс К., Энгельс Ф. Соч., изд. 2, т. 20, стр. 356).

Однако здесь Ф. Энгельс делает очень важный вывод о *геологических стадиях развития общепланетарных процессов,* происходящих при оптимальном расстоянии планеты от звезды.

После эндогенного образования твердой кристаллической земной коры, возникновения первичной атмосферы, формирования первоначальной гидросферы продолжалось и продолжается их развитие в единстве противоположностей, в непрерывном взаимодействии. В круговороте этого развития возникла и биосфера Земли, которая на высшей стадии становления планеты приобрела очень большое значение.

Общие планетарные формы развития, на примере формирования Земли, можно назвать *общими геоформами* движения материи. Однако выделение этих самых общих геоформ, понимание их совокупного значения еще недостаточны для углубленного анализа в современном общем землеведении.

Ф. Энгельс писал: «Геология является историей этого постоянного изменения. На поверхности — механические изменения (размывание, мороз), химические (выветривание), внутри — механические (давление), теплота (вулканическая), химические (вода, кислоты, связывающие вещества), в крупном масштабе — поднятия почвы, землетрясения и т. д. Современный сланец коренным образом отличен от ила, из которого он образовался, мел — от не связанных между собой микроскопических раковин, из которых он состоит; еще более отличается от них известняк, который ведь, по мнению некоторых, целиком органического происхождения; песчаник — от несвязанного морского песка, который, в свою очередь, возник из размельченного гранита и т. д., не говоря уже об угле» (Маркс К., Энгельс Ф. Соч., изд. 2, т. 20, стр. 530).

Таким образом, на высокой стадии развития нашей планеты, в новой целостной ее системе, можно видеть не только проявление и взаимодействие механической, физической, химической, минералогической и биологической основных форм движения материи, но и специфичное *совокупное, объединенное и частное* опосредствование их в содержании таких *эндогенных* процессов, как магматические, тектонические и метаморфические, и *экзогенных,* таких как гипергенез, седиментогенез, диагенез и другие изменения вещества Земли.

На основе принципов выявления и субординации форм движения материи, представленных Ф. Энгельсом, советские ученые, особенно в последнее десятилетие, уделили значительное внимание развитию этой философской проблемы.

Как уже отмечалось, очень многое здесь было сделано Б. М. Кедровым, который не только дал анализ современного состояния этой проблемы и выделил особую *геологическую форму движения материи,* включающую «движения, происходящие в земной коре, все изменения геологического порядка, процессы преобразования и др.» [50, 51], но и предложил новые подходы при анализе соотношения основных форм движения в природе.

Важным философским вопросам современной геологии были посвящены интересные статьи В. М. Букановского [15, 16], В. Е. Хаина [112, 113], Г. Л. Поспелова [85], Е. А. Куражковской [64] и др. Основные и частные формы движения материи рассмотрены в статьях М. Н. Руткевича [93], В. А. Апродова [2], автора [36] и др.

В очень важной и интересной книге С. Г. Мелюхина отмечается, что классификация форм движения, характерных для космических тел типа Земли, Солнца и т. п., «в настоящее время еще не разработана, ибо недостаточно раскрыта их сущность» [70, стр. 29]. Если сущность ряда космических форм движения действительно до сих пор не раскрыта, то формы развития неорганической природы, по крайней мере для

внешних сфер Земли, в середине XX века получили уже удовлетворительное освещение.

Изучение космических форм движения материи, за исключением наиболее простой ее механической формы, еще не привело к возможности их глубокого познания, хотя воспроизведение плазмы в лабораториях существенно приблизило нас к этому. Кроме того, в последние десятилетия с помощью радиотелескопов и других новейших приборов, а также космических кораблей и ракет, были получены очень важные новые данные, уже освещенные в научной литературе.

### *Планетарно-геологическая форма движения и ее дифференциация в развитии Земли*

Космические макро- и мегатела (звезды, планеты и др.) представляют собой продукт последовательного, а затем, на высокой стадии развития, совместного проявления основных форм движения материи в едином комплексе (субатомных, физических, химической, минералогической и биологической). Эти тела являются, каждое в отдельности, *материальным носителем соответствующих космических форм непрерывного движения* материи Вселенной.

Эти мегатела характеризуют свое внутреннее «совокупное движение» и целый ряд звездных, планетарных и других *совокупных, закономерно объединенных в них,* основных форм движения материи.

Здесь мы остановимся только на одной из этих совокупностей, наиболее важной и близкой нам, *планетарно-геологической форме движения материи* и на ее дифференциации в процессе формирования и существования земного шара.

Всякая *основная* и тем более *совокупная* форма движения материи характеризуется специфическим круговоротом внутренней и внешней энергии системы и веществ, формирующихся при противоречивом восходящем развитии по спирали каждой такой системы.

Наиболее познанной для нас (хотя и далеко недостаточно) такой сложной системой является планета Земля. Однако мы должны представлять себе, что на других сходных или одинаковых планетах Вселенной другие мыслящие коллективы представителей самосознающей материи уже могли уйти значительно дальше вперед в познании саморазвития своей и других планет и их спутников.

Образование и существование каждого индивидуального космического тела как целостной системы позволяет рассматривать его в качестве звена общего развития материи *макромира* и материального носителя специфической *формы движения космического ряда.*

Земля, достигшая очень высокого уровня планетарной дифференциации вещества, вплоть до появления биосферы, в масштабе Вселенной, безусловно, имеет своих многочисленных аналогов, прошедших сходный или одинаковый путь саморазвития в качестве космических тел. Такой, вероятно, наиболее совершенный путь развития планет можно обозначить как *георазвитие материи* космоса. Поэтому нам представляется правильным выделение Б. М. Кедровым [49, 51] единой геологической формы движения материи, которую может быть лучше называть *планетарно-геологической* и относить к образованию и раннему развитию земного шара в целом. Эта главная для нас форма движения в звездных системах Метагалактики, вероятно, является одной из всеобщих высших форм развития планет.

К сожалению, нам еще недостаточно хорошо известны первопричины очень высокой концентрации космического вещества в виде земного шара (кроме еще не понятой гравитации), но геология уже предоставила возможности схематически проследить развитие его коры за последние 3 млрд. лет.

Следуя гипотезе Канта и теории О. Ю. Шмидта [123], вероятным является допущение, что наша Протоземля, как и многие другие планеты, образовалась вследствие гравитационной конденсации (аггрегации) вещества газо-пылевого облака, возникшего в окрестностях Солнца при его саморазвитии. Эволюция этого облака происходила по линии кольцевого уплотнения вещества в плоскости эклиптики и собирательного образования первичных сгустков материи на месте планет, постепенно уплотнявшихся и увеличивавших свою массу за счет гравитационного захвата новых газовых, пылевых, метеорных и других частиц.

Образование зонального земного шара в результате получения извне материи и энергии имело большое значение только до момента, когда формирующаяся планета поглотила свое газо-пылевое, метеорное и астероидное кольцо. С этого времени поступление на нее космической материи было резко сокращено и в настоящее время оно по приблизительным оценкам не превышает 10 тыс. *т* в сутки.

Со времени образования такого относительно крупного сгустка материи, как Протоземля, непрерывно развивались внутренние процессы гравитации и в связи с ними начались процессы радиоактивного распада, т. е. планета, приобретя оптимальную массу, приступила к интенсивному саморазвитию. В результате радиогенного разогревания во внутренних частях Земли начались процессы трансформации ее первичной материи, сопровождавшиеся дифференциацией вещества по удельному весу.

Георазвитие материи на самом первом этапе проявилось в начальном формировании ядра и внутренних зон земного шара, плотность псевдотвердого и твердого вещества которых теперь показывает дискретное уменьшение по направлению снизу вверх.

Прогрессировавшее уплотнение вещества Протоземли приводило к неизученным еще реакциям в твердом состоянии, высвобождению энергии, образованию и преобразованию элементов, а в конечном счете к периодическому *магмообразованию,* проявлявшемуся в течение последних 3—4 млрд. лет. Превращение твердого вещества в жидкое состояние расплава происходило в земном шаре на глубинах, характеризующихся давлениями ниже критических ($10^3$—$10^5$ *атм*), т. е. в основном в верхней *зоне мантии Земли,* состав которой, по-видимому, наиболее близко отвечает составу каменных метеоритов и ультраосновных пород.

По мнению А. П. Виноградова [20], основанному на экспериментах, образование земной коры происходило путем *зонного выплавления* из мантии относительно легкоплавкой силикатной фракции вместе с кремнеземом и летучими, радиально перемещавшейся вверх. Компоненты этой фракции образовали сплошной базальтовый слой, имеющий среднюю мощность 15 *км* и возраст до 3 млрд. лет, а также вошли в состав образовавшегося выше прерывистого гранитного слоя разной мощности. Выплавленная двуслойная «шлаковая» земная кора, четко отделенная от подстилающей верхней части мантии поверхностью Мохоровичича (Мохо), в совокупности образовала *протолитосферу* Земли.

Параллельно с формированием первоначальной каменной литосферы происходило образование и протоатмосферы, а затем с охлаждением поверхности Земли и жидкой прерывистой гидросферы в виде первых, еще почти пресноводных, океанов и морей, занявших впадины на поверхности нашей планеты.

А. П. Виноградов доказал также, что и эти наружные оболочки имели вначале чисто эндогенное происхождение, связанное с дегазацией вещества мантии и литосферы, возникшей в процессе зонного переплавления первично рыхлого космического вещества Земли. По его мнению, главная масса $H_2O$, $CO_2$, $N_2$ и других прошла сквозь эк-

ран формирующейся земной коры, а такие легколетучие компоненты, как F, B, S и др., в основном задерживались в ней, приняв участие в процессах эндогенного минералообразования.

В подтверждение правильности концепции А. П. Виноградова отметим, что на земном шаре даже в настоящее время действуют 624 вулкана, выбрасывающих в атмосферу не только огромные количества пепла (при извержении вулкана Катмаи пепел облетел весь земной шар), но и неисчислимые массы газов, таких как азот, кислород, водород и др., т. е. главных компонентов атмосферы. Масса и энергия этих газов иногда настолько велики, что при некоторых вулканических извержениях (вулкан Бандайсан в Японии) на расстояние нескольких километров выбрасывались глыбы вулканических пород весом в тысячи тонн.

Важные факты для обоснования происхождения гидросферы и атмосферы за счет внутренней жизни Земли представляют многочисленные пневматолито-гидротермальные месторождения самых разнообразных полезных ископаемых, которые образовались на разных глубинах в виде жил, заполняющих трещины в земной коре.

Весьма крупные массы этих руд, кристаллизовавшиеся от архея и до настоящего времени, свидетельствуют о той огромной массе генерированных на глубине высокоподвижных геохимических сред в виде водных, водноуглекислых, жидких и газообразных растворов, которые создавали многие месторождения. Эти минералообразующие растворы проникали ранее и проникают сейчас на поверхность Земли в виде горячих источников, гейзеров и фумарол, количество которых в настоящее время особенно велико в Новой Зеландии, на Камчатке и в других местах. Мы не можем не видеть того, что все эти эманации и сейчас, а тем более в прошлые геологические эпохи непосредственно входили в круговорот гидросферы и атмосферы.

Здесь можно было бы добавить, что бесчисленные включения в минералах до сих пор сохраняют консерваты водных растворов и газов, которые проникали сквозь толщу земной коры к ее поверхности, но на путях следования были законсервированы в минералах.

Таким образом, допуская возможность некоторого пополнения гидросферы и атмосферы легколетучими веществами в результате заимствования из космоса, нельзя не рассматривать происхождение этих оболочек нашей планеты в качестве производных ее эндогенного саморазвития, что впервые посредством зонной плавки было доказано А. П. Виноградовым [20].

Следующим чрезвычайно важным шагом в развитии материи Земли было появление жизни, возникшей, по-видимому, на основе синтеза углеводородов (при участии $H_2O$, $CO_2$, $NH_4$) в полинуклеотиды и белковые полипептиды.

Очень существенные изменения в атмосфере Земли начались с появлением на ней растительности, в процессе фотосинтеза поглощавшей углекислоту и вызывавшей постоянное обогащение атмосферы биогенным кислородом, а литосферы углеродом, начавшим накапливаться во все возрастающих количествах в осадочной оболочке литосферы (карбонатные породы и угли).

С появлением внешних сфер Земли четырех состояний (лито-, атмо-, гидро- и биосферы) закончился *первоначальный* планетарно-геологический период развития материи Земли в катархее и протогее (рис. 7).

После вступления этих сфер в теснейшее взаимодействие синтетическое, самое общее, представление о формировании нашей планеты должно уступить место общему анализу, выделению в длительном процессе ее формирования *магмопетрогенной, атмогидрогенной и зоофитогенной* форм георазвития материи на планетах типа Земли.

Первая проявляется в закономерностях превращения ионно-электронных жидкостей — магматических расплавов в твердые минералы, горные породы и руды и в отделении очень подвижных газовых и жидких эманаций, создающих геохимические среды для развития пневматолито-гидротермального минералообразования и обеспечивающих преобразования вмещающих месторождения пород. Они характеризуют в своей совокупности сложное взаимодействие и субпараллельное эндогенное проявление в глубинах земной коры трех *основных форм движения материи*: физической, химической и минералогической.




Рис. 7. Геохронология и стадийность развития Земли

Стадии развития земной коры:

*I* — космическая; *II* — симатическая; *III* — сиалическая; *IV* — геосинклинальная; *V* — платформенная; *VI* — глыбовая; *1* — катархей; *2* — протогей; *3—4* — дейтерогей; *5* — палеогей; *6* — неогей

Последние отчетливо выражены и в экзогенных процессах, связанных главным образом с внешней энергией Солнца и других звезд, и проявляются в многообразных изменениях первичных эндогенных образований на поверхности Земли. Особенно наглядно они представлены в корах выветривания пород и месторождений, в транспортировке и отложении минеральных веществ, формировании осадочной оболочки и экзогенных скоплений полезных ископаемых, а также в кристаллизации ледяного покрова гляциальной зоны земной коры, характеризующейся твердым молекулярным строением вещества. (Мощность ледовой зоны в районе Антарктиды в настоящее время составляет около 2 *км*.)

Основная биологическая форма движения материи объединяет весь очень разнообразный и быстро изменяющийся во времени комплекс явлений заимствования и переработки неорганических веществ в органические и перевод их снова в минеральные и новые органические образования земной коры. Особо должна быть подчеркнута биогеохимическая роль этой формы движения материи в образовании горючих ископаемых, некоторых биогенных пород и руд.

Общие геоформы развития земной коры проявляются в разных сочетаниях и взаимодействии основных форм движения материи и объединяют в себе характерные процессы миграции, новообразования и превращения минеральных и биогенных веществ, раскрывают в своей сфере их развитие в более конкретном виде, чем главная планетарно-геологическая форма движения материи.

Таким образом, при рассмотрении этой формы движения материи представляется необходимым подходить дифференцированно, различая *главную* форму георазвития материи, связанную с формированием земного шара в целом, *общие* геоформы, связанные с взаимодействием разнообразных оболочек планеты, и *частные* формы, связанные со специфическими проявлениями развития отдельных участков земной коры. Такой подход, по-видимому, позволяет наиболее полно понять калейдоскоп земных процессов и явлений от момента, когда образовалась Протоземля, до современного периода ее развития, в котором в качестве активного начала выступает также и коллективная деятельность людей, особенно целеустремленно проявившаяся в преобразовании поверхности планеты на территориях стран социалистического сообщества.

Объективно существующие неразрывные в единстве результатов своих проявлений общие геоформы движения обусловили на протяже-

нии дейтерогея, палеогея и неогея (см. рис. 7) специфическую жизнь земной коры, закономерности образования и распределения в ней эндогенных и экзогенных полезных ископаемых. Однако дальнейшее углубленное рассмотрение развития материи на Земле и увязка основных форм движения материи Вселенной с конкретными их особенностями проявления на земном шаре требует еще более дифференцированного подхода.

Общая *магмопетрогенная* геоформа движения материи по различиям в состояниях минералообразующих физико-химических сред и по разному характеру их деятельности должна быть подразделена на частные эндогенные геоформы: *интрамагматическую и эманационную* (перимагматическую), включающую минералообразующее действие пневматолитовых и гидротермальных растворов. Все эти частные геоформы движения приводили и приводят к проявлению в разных средах основной минералогической формы движения (см. рис. 5).

Главными составляющими общей *атмогидрогенной* геоформы движения материи являются частные ее формы — *гипергенная и седиментогенная*. С появлением жизни на Земле в них все более усиливалось влияние биологических факторов.

В общей *зоофитогенной* геоформе образования и преобразования минеральных веществ на Земле специфичны две ее частные геоформы — *зоолитовая и фитолитовая*, отражающие специфику проявления основной минеральной формы движения в животном и растительном мире.

Под влиянием непрерывно взаимодействовавших друг с другом различных явлений в атмогидросфере осадки, еле успевшие образоваться, претерпевали непрерывные качественные изменения (окисление, гидратация, цементация и др.). Под литостатическим давлением вышележащих слоев, относящимся к проявлению *гравитационной формы движения*, они уплотнялись, и на некоторой глубине превращались уже в осадочные породы, претерпевшие значительное перерождение по сравнению с исходными отложениями. Такого рода последовательные преобразования осадков в породы, происходящие в верхней части стратисферы Земли, характеризуют частную *литогенную геоформу* движения материи, очень глубоко рассмотренную в трудах Н. М. Страхова [104, 105].

В эту же геоформу движения нами включается и *гляциогенная ее разновидность*, так как льды в общем представляют собой мономинеральные породы, входящие в состав литосферы или залегающие на ее поверхности.

Проявление на Земле общих магмопетрогенной и атмогидрогенной геологических форм движения материи, вызывавшее образование кристаллической земной коры и разнообразных продуктов ее разрушения в виде вторичного осадочного чехла, сопровождалось также сложными явлениями непрерывных изменений всех и особенно экзогенных минеральных новообразований. Такие изменения могут быть объединены в *комплексные геоформы движения* материи земной коры — *метаморфогенез, тектогенез, диагенез*, в которых тесно переплетаются совокупности *основных* форм движения в различных их сочетаниях.

Физическое, в первую очередь тепловое действие магмы и химическое воздействие ее дериватов (газовых и жидких растворов) в глубинах земной коры приводили к трудно расчленимым *метаморфическим* процессам частичного плавления и растворения, перекристаллизации и метасоматоза, изменения структур и текстур пород, возникновения относительно равновесных для глубинных условий новых минеральных видов и парагенезисов.

Глубокий магмопетрогенез в процессе зонной плавки и локального анатексиса, по-видимому, вызывал также механические перемещения

минеральных масс в тангенциальном и радиальном направлениях и, таким образом, обусловливал в течение всей истории земной коры проявление гравитационно-механической — *тектонической формы* движения материи. Последняя комплексно отражалась в формировании и постоянном эндогенном изменении рельефа земной поверхности, географическом перераспределении суши и гидрооболочки Земли, в складчатых и разрывных деформациях земной коры, в изменениях текстур и структур ее первичных и вторичных минеральных агрегатов. Однако, если гектонические движения материи (и землетрясения) квалифицировать просто как *механические*, мы не сделаем ошибки, но и не вскроем специфики полного содержания этих явлений в жизни земной коры.

Глубокое понимание тектоногенных явлений, объясняющих разное развитие континентальных и океанических участков земной коры, все еще чрезвычайно затруднено из-за отсутствия фактических данных по значительным глубинам нашей планеты. Здесь геологи с нетерпением ожидают выполнения намеченной программы глубинного бурения, которое снимет серию спорных вопросов.

Очень сложной и генетически еще мало опознанной является комплексная *каустогенная* геоформа движения материи, проявляющаяся в трех агрегатных состояниях углеводородов: газовом, жидком и твердом. Образование горючих газов и жидкостей — это результат основной химической формы движения материи, заключающейся в синтезе (молекулообразовании) тяжелых и легких углеводородов в процессе диагенеза и метаморфизма. Образовавшиеся в разных условиях продукты неорганического синтеза и возгона органики интенсивно мигрируют в осадочной оболочке, смешиваются друг с другом, вероятно, в очень разных пропорциях, и конденсируются в коллекторах пористых пород в благоприятных структурах земной коры. Твердые горючие ископаемые — это очевидный результат комплексных фитогенно-диагенетических образований и преобразований только биогенной материи.

При рассмотрении основных форм движения материи и при выражении их в виде общих, частных и комплексных геологических форм движения, характерных для оболочек Земли, следует подчеркнуть постоянную взаимозависимость и закономерную последовательность в их проявлениях, очень упрощенно представленных на нашей схеме (см. рис. 5).

По Ф. Энгельсу, «*Взаимодействие* — вот первое, что выступает перед нами, когда мы рассматриваем движущуюся материю в целом с точки зрения теперешнего естествознания» (Маркс К., Энгельс Ф. Соч., изд. 2, т. 20, стр. 546). Это взаимодействие основных форм и геологических форм движения материи Земли осуществляется непрерывно и обусловливает сложное развитие недр и поверхности Земли.

Многие геологические формы движения не проявляются на других планетах солнечной системы. Из массивных планет наибольшую полноту их проявлений можно ожидать на Венере, а не на Марсе, где, повидимому, практически отсутствует атмогидрогенное, а следовательно, и зоофитогенное развитие материи. Меркурий и спутник Земли Луна с ее оспенно-кратерным вулканогенным ландшафтом характеризуются только магмопетрогенной формой развития. Легкие планеты имеют, вероятнее всего, свои специфические формы образования и существования, отличные от геоформ движения материи, охарактеризованных выше только в самом кратком и схематическом виде.

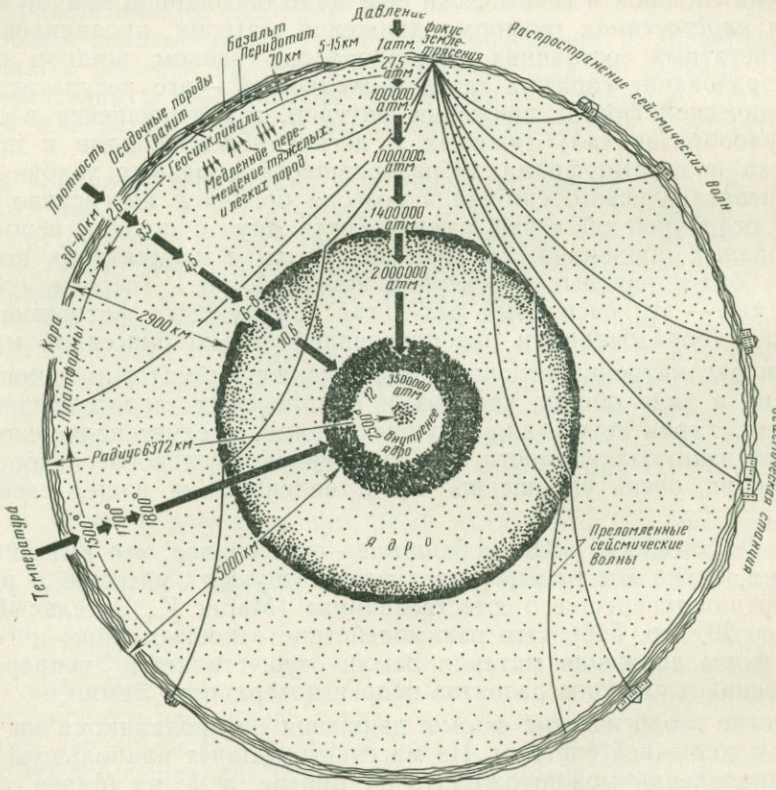
В отношении особенностей проявления основной минеральной формы движения материи на легких планетах можно высказать лишь предположение, что твердое состояние вещества связано на них с пространственной упаковкой в кристаллах не атомов, а молекул $H_2O$, $CH_4$, $CO_2$ и других веществ.

Параллельный анализ взаимосвязанных основных и геологических форм движения материи позволяет раскрывать особенности их преломления в разных отраслях геолого-минералогических знаний и находить место частного в общем, а также делать прогнозы для случаев, пока не доступных для непосредственного изучения.

Таким образом, планетарно-геологическая форма движения материи как совокупность проявления основных форм общих и частных геоформ развития характеризуется специфическим, наиболее сложным внутренним круговоротом вещества и энергии и в то же время тесно связана с космической средой существования нашей планеты.

### *Строение геоида и сфера миграции (мигросфера) элементов земной коры в виде подвижных геохимических сред*

Проявления всей совокупности основных общих и частных форм движения материи, сосредоточенной в сгустке Земли, привели на протяжении до 6 млрд. лет к ее зонарному строению. Однако мы еще




*Строение Земли по современным данным (линии, расходящиеся от очага землятрясения, указывают пути распространения сейсмических волн)*

Рис. 8. Схема строения геоида

крайне мало знаем о внутренних частях нашей планеты, так как даже самые глубокие эрозионные срезы земной коры еле охватывают лишь 0,003 радиуса геоида, составляющего в среднем 6372 *км*. Только разный характер распространения сейсмических волн дает объективные сведения о неодинаковом внутреннем строении Земли (рис. 8).

Поперечные сейсмические волны, быстро затухающие в жидкой среде, практически пронизывают весь земной шар, за исключением его ядра, и утверждают нас во мнении о его твердом внутреннем строении

(состояние ядра будет рассмотрено далее). Однако поведение веществ при ультравысоких давлениях в сотни и первые миллионы атмосфер экспериментально еще не выяснены и их твердое агрегатное состояние внутри Земли может быть принято только как наиболее вероятное. О таком состоянии с уверенностью можно судить лишь до глубины 800 *км*. Это предел возникновения глубокофокусных землетрясений, при которых реализуется огромная энергия упругих напряжений скалывающего типа. Такие очень глубокие тектонические разрывы служат проводниками глубинного вещества Земли, прорывающегося по ним в виде ультраосновной жидкой магмы.

Однако это не должно рассматриваться как свидетельство первично жидкого состояния материи на такой значительной глубине, а лишь как временное ее ожижение вследствие радиогенного разогрева и спада давлений в зонах глубинных разломов. Такие прорывы глубинного вещества иногда образуют гигантские по мощности и протяженности дайки перидотитов (Африка) или же трубообразные тела кимберлитов. По-видимому, перидотитовый субстрат мантии с плотностью от 3,2 вверху до 6,8 внизу, находящийся в сверхнапряженном состоянии, простирается ниже поверхности Мохо до глубины 1200 *км*, а возможно, и до земного ядра (2900 *км*). Скорость продольных волн здесь варьирует от 7,8 до 8,2 *км/сек*, а на границе с ядром резко увеличивается.

В направлении от центра Земли (субядро) геофизические данные позволяют выделить центрисферу, интерсферу и перисферу, имеющие в свою очередь зональное строение.

*Центрисфера* — это, по-видимому, металлизированное ядро с плотностью от 7 до 12, температурой 2000—3000° С и давлениями от 1 400 000 до 3 500 000 *атм*. Оценка этих термодинамических параметров экстраполяцией с поверхности Земли может рассматриваться только как очень приблизительная из-за множества неизвестных в еще непознанном нами состоянии материи при таких параметрах ее существования. Эта «терра инкогнита» для ученых может быть выяснена неизвестно когда и только в самую последнюю очередь. Однако несомненным является огромное влияние центрисферы Земли на физические свойства нашего космического тела (магнетизм, гравитация).

*Интерсфера*, простирающаяся с глубины 1200 до 100—110 *км* и занимающая примерно 40% объема геоида, имеет непосредственное отношение к эндогенным процессам и явлениям механических и химических перемещений вещества. Зона нижней мантии Земли в процессе саморазвития внесла огромный вещественный вклад в формирование верхней мантии, земной коры и наружных жидких и газообразных оболочек планеты, передав им легкие и легколетучие соединения. В этой интерсфере происходили и будут происходить существенные изменения свойств самих атомов вещества вообще, по-видимому, связанные с раздавливанием электронных оболочек при давлениях около 100 000 *атм* и температурах до 2000° С. Короче говоря, интерсфера Земли является ареной проявления основной физической формы движения материи и, по-видимому, сложена изотропной стекловатой массой. Основная химическая форма движения начинает проявляться в угнетенном виде лишь в верхней перидотито-эклогитовой мантии (110—35 *км* глубины), которая обеспечивает переход к земной коре.

Последняя представлена твердой *перисферой*, сложенной в основном (на 97%) кристаллическим веществом силикатов и алюмосиликатов. На ее долю от массы всей планеты приходится около 1% базальтов, а вверху примерно 0,5% гранитов и гнейсов, перекрытых тонкой пленкой осадочно-метаморфических пород, пронизанных до глубины 3—4 *км* вадозными водами и проявлениями бактериальной жизни.

Таким образом, перисфера Земли являлась и является ареной наиболее интенсивного проявления химической и минералогической форм

движения материи, в верхней части и на поверхности сочетающихся с основной биологической формой движения.

В сплошной базальтовой оболочке Земли содержится около 52% кремнезема, а в прерывистой гранитно-метаморфической оболочке он составляет 73%. Материковые глыбы, поднимающиеся над уровнем океана в среднем на 950 *м*, на 95—98% сложены кристаллическим веществом и выше этого уровня занимают объем в 12—13 раз меньший, чем объем гидросферы планеты. Последняя состоит на 85,89% из кислорода и на 10,80% из водорода, образующих химическое соединение — воду. В водных растворах мирового океана, покрывающих на $^2/_3$ поверхность земного шара, содержатся соединения десятков разнообразных элементов, из которых следующие одиннадцать главных ионов составляют основную массу (99,9 вес. %) океанических солей: $Na^{1+}$, $K^{1+}$, $Mg^{2+}$, $Ca^{2+}$, $Sr^{2+}$ и $Cl^{1-}$, $SO_4^{2-}$ $HCO_3^{-1}$, $Br^{1-}$, $F^{1-}$ и $H_3BO_3$ [22].

Эти водные растворы и их вещества образовались первично эндогенным путем и претерпевали длительную эволюцию. Они пронизывали земную кору до выхода на поверхность, принимали участие в минералообразовании и частично сохранялись в минералах и породах в виде замкнутых газово-жидких включений и волосных вод, по В. И. Вернадскому [19], пропитывающих, как губку, горные породы и минералы. Их часть, не герметизированная во включениях минералов, находилась и находится в постоянном медленном передвижении, в основном стимулированном радиогенным тепловым потоком (50 *эрг/см²/сек⁻¹*), направленным снизу вверх. Перепад температур между интерсферой и перисферой, по-видимому, превышает 1000° С.

В последней существует и самостоятельный постоянный источник радиогенного тепла, главным образом в виде рассеянных минералов тория, урана и $K^{40}$. Среднее содержание этих радиоактивных элементов — генераторов тепла в породах земной коры — приблизительно оценивается для $Th^{232}$ в 13 *г/т* и для $U^{235}$, $U^{238}$ в 4 *г/т* до глубины 55 *км*. Таким образом, только 1 *г* минерального вещества пород перисферы в состоянии выделить 3,75 *кал* за 1 млн. лет.

Однако на разных глубинах перисферы источники радиогенного тепла распределяются с большой неравномерностью, обеспечивая локальные очаги магмообразования, особенно под подвижными геосинклинальными зонами земной коры, на глубинах 15—30 *км*. Из этих очагов в стратисферу Земли и даже на ее поверхность до сих пор прорываются расплавы основной и кислой магмы, а вокруг интрузий и вулканических очагов создаются наибольшие перепады температур, резко нарушающие среднеземной температурный градиент (1° С на 33 *м* глубины).

Таким образом, в перисфере и особенно в ее верхней части (стратисфере) нет *равномерного* движения волосных водных растворов и обычных поровых и трещинных подземных вод, обеспечивающих миграцию элементов. Перемещение последних снизу вверх в этих подвижных геохимических средах и глубинная минерализация особенно интенсифицируются в местах внедрения интрузий, резко нарушающих временно установившееся среднеземное термодинамическое равновесие.

Оптимальной глубиной становления интрузий для развития перимагматического рудообразования, по-видимому, является верхний интервал перисферы с 7—8 до 1—2 *км* от поверхности. В этой зоне земной коры примерно на глубине 3—4 *км* встречаются фронт ювенильных геохимических водных сред, продвигающихся снизу вверх под воздействием перепада температур и давлений, с фронтом метеорных водных растворов, опускающихся сверху вниз в результате сил гравитации.

Локальное внедрение магматических интрузий нарушает равномерность теплового потока, обеспечивает аномальный разогрев пород и

объединяет в неразрывное целое ювенильные, фреатические и вадозные водные растворы в общей сфере перимагматического, пневматолито-гидротермального, рудообразования. Их относительный вес в геохимических процессах минерализации зависит частично от глубины становления интрузий и на современном уровне развития наук объективно не может быть расшифрован. Можно только полагать, что вадозные растворы с глубины 2—3 *км* и до поверхности в общем могут доминировать над ювенильно-фреатическими водами, а на бо́льших глубинах удельный вес в минералообразовании изменяется в сторону последних.

В сфере наиболее интенсивной миграции подвижных геохимических сред и транспортируемых ими соединений элементов, которая нами сокращенно названа *мигросферой*, в вертикальном разрезе земной коры могут быть выделены три зоны, разграничительные поверхности между которыми на глубине непостоянны и зависят от геологической обстановки:

1) *верхняя мигросфера* с доминирующим значением экзогенной энергии геохимических процессов и жидких вадозных минералообразующих растворов, опускающихся сверху вниз и действующих на низких термодинамических уровнях от поверхности до глубины 3—4 *км*;

2) *средняя мигросфера* с преобладанием эндогенной энергии и ювенильно-фреатических водных, докритических, газообразных и жидких растворов, действующих на средних уровнях давлений и температур и продвигающихся снизу вверх примерно от 8 до 2 *км* (при отсутствии вулканических аппаратов);

3) *нижняя мигросфера* магматической и метаморфической деятельности расплавов и надкритических растворов, обеспечивающих ограниченные перемещения минеральных веществ на высоких термодинамических уровнях (на глубинах от 8—10 до 20—25 *км*).

Эти три различные мигросферы веществ в земной коре могут определяться не только геологически, но и по особенностям включений растворов в новообразованных минералах и метаморфически преобразованных породах и рудах.

Однако нет никакого сомнения в том, что и на больших глубинах, в пограничной зоне земной коры и верхней мантии, обнимающей 30-километровую область выше и ниже поверхности Мохо, под воздействием радиогенного тепла происходили анатексис и палингенез со всеми вытекающими из этих явлений последствиями. Перемещения веществ под материковыми глыбами здесь, по-видимому, осуществлялись в основном в расплавной форме и охватывали огромные по объему массы. Достаточно напомнить о траппах Сибирской платформы или Индостана, чтобы судить о масштабе этих явлений, происходивших в *глубинной мигросфере* веществ Земли, наименее нам знакомой.

Для образования полезных ископаемых, таких как алмазы, хромиты, платиноиды, медь, никель и кобальт, титан и железо, большое значение имело магмообразование в нижней части этой глубинной мигросферы веществ (25—50 *км*). Расширение, связанное с их ожижением, создавало очень высокие давления (десятки тысяч атмосфер), и при помощи глубинных разломов ультраосновные магмы, не прорвавшиеся на поверхность, создавали трубообразные кимберлитовые тела или интрузивы с магматогенными залежами указанных металлов.

Однако здесь остается неясным значение этих глубинных прорывов ультраосновной магмы для так называемого перимагматического (постмагматического) минералообразования, физико-химические исследования которого на основе микрообъектов включений геохимических сред являются главной темой монографии.

Конечно, водные растворы этих магм обеспечивали автометасоматоз и серпентинизацию перидотитов, дунитов и других сходных по составу пород, сопровождающуюся увеличением их объема (дилатацией),

вызывающим трещинообразование. Локализованные в таких атектонических трещинах водные растворы кристаллизовали хризотил-асбесты, а в зонах эндоконтактов интрузивов при более глубоком гидротермальном метаморфизме серпентинитов обеспечивали образование тальковых залежей.

Однако, по-видимому, в металлогеническом отношении эти обособившиеся из ультраосновной магмы водные растворы не осуществляли более серьезной работы, чем очень ограниченный перенос и выделение металлов в пределах формирующегося или сформированного интрузива.

Таким образом, при рассмотрении миграции элементов в пневматолитовых, гидротермальных и смешанных растворах в пределах наших непосредственных интересов остаются только *средняя и частично нижняя мигросферы земной коры* с дериватами и термодинамическими аномалиями интрузий основных, кислых и щелочных магм, возбуждавшими перимагматическое рудообразование.

За исключением горячих термоминеральных источников, к выходу на поверхность уже резко нарушавших свои параметры и состав, мы не знали растворов, переносивших элементы и их соединения в эндогенных условиях.

Однако теперь мы научились не только видеть их воочию, но и испытывать их герметизированные в минералах физико-химические системы и определять их химический состав для разных геологических обстановок глубинной минерализации. Показ этих возможностей и является главной целью монографии.

## Глава 3

## ПОНЯТИЕ О СРЕДЕ РАЗВИТИЯ РАЗЛИЧНЫХ ПРОЦЕССОВ И САМООРГАНИЗАЦИИ ПРИРОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

> Тела, окружающие систему, — это внешние по отношению к ней тела, или среда... Энергетическое и вещественное взаимодействие между средой и системой характеризуется внешними и внутренними тенденциями в ходе... процесса и содержат в себе не только то или иное воздействие среды на систему, но и присущие самой системе внутренние закономерности развития, так же как и возможности активного воздействия системы на среду.
>
> *В. А. Николаев* [75]

### *Разнообразие сред в спирали восходящего движения неорганической материи*

На путях генетического познания разнообразнейших материальных носителей движения во Вселенной, солнечной системе и на нашей планете оказывается невозможным их рассмотрение без анализа вещественного и энергетического обмена, без учета связей каждого объекта с окружающей природой или *средой*. Целостные индивидуальные представители процесса развития материи, возникшие на том или ином термодинамическом уровне из своего материнского окружения, существуют и развиваются в нем, и эта *среда* и *объект* образуют взаимодействующую самодвижущуюся материальную систему, в дальнейшем изменяющуюся совместно до завершения определенного процесса.

Однако определение понятия о среде, несмотря на очень большую важность его генетического и общего философского значения, отсутствует даже в БСЭ, поэтому сформулируем его здесь хотя бы в первом приближении.

*Средой* в широком смысле этого слова *называется непосредственное материальное и, следовательно, энергетическое окружение любого индивидуализированного природного объекта, находящееся с ним в единстве, обеспечивающее его возникновение* (*зарождение*), *воздействующее на его формирование, обусловливающее условия и возможности его существования как составной части новой материальной системы.*

Таким образом, среда, характеризующаяся очень разными физико-химическими (энергетическими) параметрами, определяет возможности возникновения и развития любого объекта. Резкие изменения этих параметров среды могут привести к существенным преобразованиям индивидуализированного объекта или даже к его уничтожению с образованием новых форм существования слагающих его компонентов. *Среда всегда находится на более низкой ступени структурной организации материи, но обладает более высоким энергетическим потенциалом по сравнению с тем объектом, который ею порождается, существует или изменяется в ее окружении.*

*Внутренние структурные связи* между составляющими каждый предмет компонентами значительно более прочные, чем в среде его существования. Однако все же внешние связи со средой, через энергетическое и вещественное взаимодействие с ней, имеют решающее значение, особенно в процессах минералообразования. Длительное сохранение любого объекта обеспечивается только стабилизацией его соотношений с окружающей средой.

С точки зрения агрегатного состояния сред их разнообразие в природе не очень велико, хотя они и находятся по спирали восходящего развития материи на очень разных термодинамических уровнях своего влияния на возникновение и существование макро- и микрообъектов природы.

Организация материи в космические тела в допланетарном цикле происходит: 1) в *космической среде* метагалактического пространства неорганизованной очень разреженной материи; 2) в темных *диффузных*

Таблица 1

**Разнообразие сред в циклах восходящего движения материи**

| I. Допланетарный цикл (спираль) в развитии материи | II. Цикл восходящего планетарно-геологического развития | III. Цикл высшего развития и взаимодействия материи геосфер |
|---|---|---|
| 1. Метагалактического пространства неорганизованной очень разреженной материи — среды развития галактик | 1. Хондритная холодная пористая, к центру уплотняющаяся среда не соединенных друг с другом частиц | 1. Среда магматических расплавов, состоящая из организованных в молекулы атомов и диссоциированных ионов легколетучих веществ |
| 2. Диффузных туманностей, не прозрачных для световых лучей — среды образования звезд | 2. Среда вещества разогретых протопород | 2. Газовая физико-химическая среда малоорганизованной материи в наружной и подземной атмосферах Земли |
| 3. Плазменная среда развития внутризвездной материи | 3. Геологическая среда пород мантии и первоначальной литосферы (интенсивно изменяется в III цикле под воздействием внешней и внутренней энергии планеты) | 3. Жидкая химическая среда холодноводных наземных и подземных горячих и тепловодных растворов |
| 4. Вокругзвездная остаточная среда газо-пылевого и метеорного роя первоначальной консолидации вещества планет | | 4. Живая среда — совокупность индивидуальных макро- и микробиологических систем |

*туманностях* — среде образования звезд; 3) в *плазменной среде* развития внутризвездной материи; 4) в остаточном вокругзвездном *газо-пылевом*, метеорном и астероидном облаке — среде существования и первичной консолидации вещества планет (табл. 1).

В природе не бывает пустоты и даже безграничное пространство Вселенной между консолидированными сгустками материи относительно равномерно заполнено крайне разреженным диффузным веществом, состоящим в основном из водорода и гелия, составляющим всего несколько атомов на кубический сантиметр и находящимся на крайне низком термодинамическом уровне (с температурой, близкой к минус 273° С). Это арена развития и действия электромагнитных (фотоны), мезонных (мезоны) и гравитационных (гравитоны) полей.

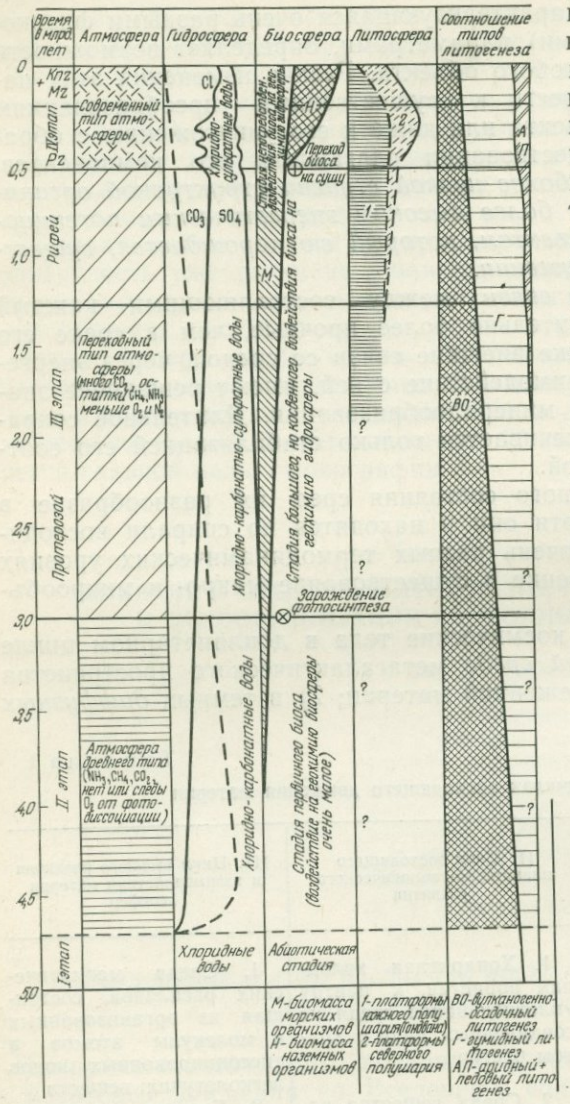



Рис. 9. Изменения внешних сфер Земли во времени (по Н. М. Страхову)

Мировое пространство постоянно пронизывается потоками космических лучей, в основном состоящих из протонов и атомных ядер гелия (α-частицы), а также электронов и позитронов, обладающих сверхвысокой энергией (до $10^{12}$ электронвольт).

В I допланетарном цикле (спирали) развития *космической среды*, неравномерно заполненной сгущениями материи, происходят все космические процессы, в том числе и организация материи галактик, внешне выражающаяся в эволюции их форм от неправильной к спиральной и далее к эллиптической с оформившимся центральным ядром.

Среди сгустков материи Космоса выявляются *диффузные туманности* темного вещества, из которых и в окружении которых благодаря возникновению гравитационных полей образовались еще более плотные узлы материи первичных звезд. «Эта туманность... самая ранняя форма материи, к которой мы имеем возможность восходить в настоящее время. Это отнюдь не исключает, а, напротив, требует предположения, что материя до этой первоначальной туманности прошла через бесконечный ряд других форм» (Маркс К., Энгельс Ф. Соч., изд. 2, т. 20, стр. 57—58).

Можно полагать, что неизвестные нам темные частицы этих ту-

манностей проходили длительный путь от многообразных субатомных до атомных, а может и более высоких основных форм движения материи.

Развитие материи в самих звездах происходит в *плазменной среде* с резко доминирующим участием водорода и гелия, а также углерода. Из нее и в ее окружении в центральных частях звезд на ультравысоком термодинамическом уровне в миллионы градусов и атмосфер происходит образование все более и более сложных комплексов тяжелых элементов.

Все это области мира очень разнообразных и еще плохо познанных *астрофизических* форм движения материи.

Основные химическая и минеральная формы движения материи, конечно, еще не могут проявляться в плазменной среде, характеризующейся столь высокими термодинамическими параметрами.

Организация материи в первичные сгустки планет характеризуется относительно плотной *средой в виде газо-пылевого* и метеорного роя, возникающего в остаточном газо-пылевом облаке в результате кольцевой концентрации материи в зоне равновесия между силами притяжения и отталкивания материнской звезды.

Судя по солнечной системе, включающей 40 планет и их спутников, вблизи звезды образуется семейство массивных тел внутренней группы, в основном состоящих из *атомарно-кристаллических соединений* кремния, кислорода, алюминия и железа, а вдали (начиная с Юпитера) — легких планет, состоящих, по-видимому, из твердых *молекулярных соединений* типа $H_2O$, $CH_4$, $CH_3$ и $CO_2$.

Во II цикле восходящего планетарно-геологического развития Протоземли, вслед за А. П. Виноградовым, можно последовательно различать: 1) *хондритную* холодную пористую среду формирующейся планеты в виде еще не плотно соединенных друг с другом частиц, в том числе хондр, пыли, тяжелых ядер и атомов элементов; 2) *среду* интенсивно разогревающихся под воздействием гравитации и радиоактивного распада, U, Th и $K^{40}$ *вещества протопород*, подвергающихся частичному плавлению и дегазации; 3) *геологическую среду* возникших в процессах зонной выплавки твердых сфер Земли, состоящую из продуктов разогретой преобразованной мантии и первоначальной литосферы, интенсивно изменяющихся в следующем III цикле под воздействием внешней и внутренней энергии планеты.

Мы еще не знаем, какие ультраплотные вещества на протяжении последних 5—6 млрд. лет сформировались из протопланетарной среды в ядре и внутренних зонах Земли и в каком состоянии они находятся теперь при температурах в тысячи градусов и давлениях от 1,5 до 3,5 млн. *атм.*

При формировании нашей планеты с отдачей ею энергии в мировое пространство возникли эндогенным путем вначале атмосфера, а затем гидросфера, а литосфера стала геологической ареной интенсивного развития минеральной материи.

Около 3 млрд. лет назад наступил высший цикл восходящего развития планеты, характеризующийся активнейшим взаимодействием материи трех эндогенных периферических геосфер друг с другом: на глубине с мантией, на поверхности со стратисферой и с возникшей в водной среде бурно развивавшейся биосферой. Качественные и количественные изменения двух последних, так сказать вторичных геосфер Земли, происходили параллельно и зафиксировали резкий скачок в развитии нашей планеты. Глубокий анализ этого относительно позднего ее развития содержится в работах Н. М. Страхова [104, 105], из которых мы заимствуем лишь его схему (рис. 9).

Каждая из эндогенных и экзогенных сфер Земли, проникавших и проникающих друг в друга и активно взаимодействующих путем обме-

на и трансформации вещества, должна рассматриваться в неразрывном единстве. В этом единстве и борьбе противоположных тенденций на фоне наиболее устойчиво консолидированной материи в основном кристаллически-минеральной литосферы планеты выделяются следующие геохимические среды образования полезных ископаемых.

1. *Жидкая ионно-электронная среда магматических расплавов,* в основном силикатных веществ, состоящих из неорганизованных и организованных в молекулы атомов труднолетучих элементов и диссоциированных ионов легколетучих веществ, активно воздействующих друг на друга и обеспечивающих пирогенное минералообразование при снижении уровня термодинамических параметров. Такая подвижная среда возникает в разных по глубине и составу твердых сферах Земли путем их локального расплавления под воздействием радиогенной энергии. В зонах наиболее глубоких разломов, достигающих мантии Земли, происходили ожижение горячего подкорового вещества ультраосновных пород, стимулированное спадом давлений, и интрузивные прорывы магм соответствующего состава. В менее глубоких сферах возникали обширные очаги основных (базальтовых) магм. Под геосинклинальными прогибами, в гранитной оболочке и частично в стратисфере, происходил анатексис пород, богатых кремнием и кислородом, с возникновением очагов и интрузий кислых магм. Щелочные магмы формировались на наименьших глубинах только в стратисфере Земли, в основном, вероятно, путем ассимиляции карбонатных пород.

2. *Газовая физико-химическая среда* малоорганизованной, а поэтому очень активной материи действовала и действует в наружной и подземной атмосфере Земли.

Эти газы и водяные пары — дериваты разных магм — далеко не все прорывались к поверхности Земли, включаясь в состав атмосферы. Многие из этих легколетучих соединений во взаимодействии с минералами литосферы (в том числе и стратисферы Земли) самоконсервировались во вторичных газово-жидких включениях и формировали на путях своего движения собственные кристаллические конструкции минералов, особенно галогены и бориды, т. е. активно участвовали в основной минеральной форме движения материи на Земле, создавшей в литосфере обширную коллекцию минералов, руд и пород.

3. *Жидкая геохимическая среда* (гидротермы и холодные растворы гидросферы) в основном формировалась через конденсацию газовых сред из-за потери ими энергии. Она имеет очень большое значение в образовании эндогенных и экзогенных полезных ископаемых и поэтому ее разнообразному действию в сочетании с геологической средой будет уделено в последующем наибольшее внимание.

4. *Живая биохимическая среда*, представленная совокупностями индивидуальных биологических систем, наиболее активно изменявшимися в истории развития материи Земли, играет большую роль в концентрации неорганических минеральных веществ в процессе жизнедеятельности организмов и после их умирания. Однако эти очень важные биогенные процессы образования полезных ископаемых выходят за пределы тематики нашей монографии.

Земля в отличие от других планет благодаря своей оптимальной массе и исключительно благоприятному положению относительно Солнца как источника внешней энергии, образовала и сохранила вокруг себя слоистую газовую и жидкую атмогидросферу планеты, которая явилась общей средой образования и существования органической материи и минеральных веществ осадочной оболочки.

В качестве одной из главных особенностей нашей планеты, таким образом, следует отметить, что в зоне взаимодействия тропосферы и литосферы и в гидросфере возник относительно быстро развивающийся, но кратковременно существующий (проходящий) комплекс

*микро- и макроорганизмов*, закономерно объединенный в виде *биосферы*. Примерно в течение половины времени существования нашей планеты этот биологический комплекс участвует в интенсивном преобразовании атмосферы и минерального мира литосферы, в том числе и в образовании зоогенных и фитогенных полезных ископаемых.

Однако наиболее разнообразные и крупные экзогенные неорганические скопления полезных минеральных веществ возникали и возникают под воздействием и в окружении газовой (тропосфера) и жидкой (гидросфера) сред, обеспечивающих также существенные преобразования минерального вещества эндогенных месторождений и магматических пород.

Через процессы гипергенеза, протекающие главным образом в *окислительной воздушной среде* (атмосфере), возникают остаточные месторождения металлов и неметаллов типа кор выветривания и шляп окисления, а также обломочных и россыпных скоплений полезных ископаемых.

*В солоноватоводной жидкой среде* морей образовались крупные залежи железа, марганца, алюминия, урана и серы, а в *соленой водной среде* некоторых лагун и озер происходила и происходит массовая кристаллизация таких важных минералов солей, как галит, сильвин, карналлит, мирабилит, гипс, бораты, натрон и др.

Проникновение в литосферу с поверхности на глубину этих газовых и жидких вадозных активных сред и их воздействие на породы и руды обеспечивает формирование разнообразных остаточных и инфильтрационных залежей и инфлюационных жил, а также биметасоматических экзогенных образований (месторождения малахита).

В глубинных условиях земной коры и подстилающей мантии в связи с общей магмопетрогенной формой движения, как уже отмечалось, возникают очень подвижные ювенильные среды, которые олицетворяют собой синтез элементов в молекулы, и подвижные, часто сложные комплексные соединения, обеспечивающие кристаллообразование, протекающее посредством анализа (разложения) этих соединений в процессе роста минералов.

Такие очень активные минералообразующие жидкие и газовые среды, обеспечивающие тот или иной генезис месторождений, представлены большим разнообразием *расплавов, газовых и жидких растворов* — носителей энергии и различных, главным образом магмопетрогенных и латераль-секреционных веществ. Эти среды, их действие во времени и пространстве, методы и техника их познания являются главной темой работы и рассматриваются подробно почти во всех последующих разделах монографии.

### *Взаимодействие и единство минералообразующей и геологической среды*

Главная особенность эндогенного рудообразования заключается в том, что активным его началом, регулирующим процессы и явления образования минеральных веществ в земной коре, было действие подвижных постоянно изменяющихся физико-химических систем жидкостей и газов. Без их решающего участия ни в одном литологически и тектонически самом благоприятном участке земной коры не могли и не могут формироваться эпигенетические рудные тела и постмагматические месторождения.

Поэтому огромное значение в глубинных условиях имеют возникновение, миграция и минералообразующая деятельность подвижных *эндогенных сред в виде магматических расплавов* разного состава, *ювенильных, газовых и жидких горячих водных растворов* электроли-

тов, которые во взаимодействии с геологической средой обеспечивали кристаллизацию очень широкой гаммы минералов, руд и пород.

Эти геохимические среды перемещали в пространстве земной коры простые и комплексные соединения разнообразных веществ и на изменяющихся термодинамических уровнях в благоприятных геологических условиях кристаллизовали их в виде новых минеральных образований среди окружающих пород. При этом основная химическая форма движения материи сменялась более высокой минеральной формой движения.

При генетическом рассмотрении проблемы постмагматического рудообразования, таким образом, оказывается необходимым в каждом конкретном случае различать *среду минералообразующую* (растворы) и *среду геологическую*, воспринимающую оруденение (породы).

Равноценное изучение характеристик той и другой среды в их совокупности, а также минеральных продуктов их взаимодействия определяет возможности суждения о генезисе того или иного «постмагматического» месторождения, всегда являющегося *эпигенетическим* по отношению к породам, вмещающим его руды.

Однако в эндогенных условиях мы часто встречаемся и с почти одновременной *сингенетической* кристаллизацией руд и вмещающих пород из одних и тех же систем жидких магматических расплавов, возникших на глубине и внедрившихся в виде интрузий в верхние части земной коры. Такой случай является показательной иллюстрацией сложного понятия о среде рудообразования.

Силикатные расплавы, в которых многие легколетучие компоненты находятся в диссоциированном состоянии, сразу же после внедрения начинают снижать свой высокий термодинамический уровень вследствие отдачи энергии и минерализаторов в окружающую геологическую среду пород рамы.

Это, с одной стороны, стимулирует возникновение реакций с образованием химических соединений — молекул и радикалов, а с другой, — образование твердых фаз силикатов, начинающееся с периферии интрузии.

В первом случае проявления химической формы движения приводят к возникновению и отделению подвижных, главным образом водных сред, уходящих по разным путям в окружающие породы. В свою очередь, это отделение и изменение термодинамических параметров обусловливает проявление в магматической среде минеральной формы движения — кристаллизации пирогенных минералов, в конце концов формирующих на месте каждой интрузии твердые тела интрузивов (массивов, плутонов, штоков и даек).

Кристаллизация полезных компонентов ранне- и позднемагматических руд, как известно, характерна для расплавов ультраосновного, основного и щелочного состава и при ликвации часто происходит в придонной части интрузии из обособившейся рудной магмы.

Как видно, для многих случаев магматического рудообразования геологическая среда рамы (обстановка) играет относительно пассивную роль. Эта роль сводится лишь к поглощению избыточной энергии, аккумулированной в интрузии, и к восприятию газовых и жидких растворов, возбуждающих и регулирующих эманационное («постмагматическое») рудообразование.

Нередко, в особенности для гипабиссальных интрузий и экструзивных прорывов магмы, происходит интенсивный прогрев водонасыщенных пород и дегидратация их минералов с формированием смешанных ювенильно-вадозных и фреатических (хемогенных, латераль-секреционных) горячих водных сред с высокой минералообразующей и преобразующей активностью, по результатам действия сходных с ювенильными гидротермальными средами.

Однако магмы, особенно кислые и основные их разновидности, все же являются главным источником разнообразных эманаций, обеспечивающих в своей совокупности формирование очень подвижных и активных минералообразующих субстанций, действовавших в геологической среде вокруг интрузий на разных расстояниях от них.

При таком перимагматическом рудообразовании взаимодействие этих сред оказывается значительно более тесным и сложным, чем в рассмотренном случае становления интрузивов (плутонов) на месте интрузий. Это связано с повышенной способностью к химическим реакциям растворов с породами, к взаимообмену между ними не только энергией, но и веществом, с возникновением новых и преобразованием старых минеральных образований.

В особо благоприятных породах развиваются процессы метасоматического рудообразования, в которых ведущее начало все же остается за *минерализующей,* а не за *воспринимающей* минерализацию средой.

Проникновению растворов содействует повышенная пористость пород и особенно тектоническая или атектоническая нарушенность их сплошности. Поэтому изучение литолого-петрографической и структурной обстановки рудообразования приобретает очень большое значение.

При этом всегда необходимо учитывать разнообразный генезис самих макро- и микроразрывных, а также связных структур. Имеет существенное значение также первичная неоднородность сложения пород, в которые поступают активные растворы. Непроницаемые или слабо проницаемые для последних породы, особенно при пологом их залегании, как известно, могут играть роль экранов, под которыми аккумулируется оруденение.

Очень важен при анализе взаимосвязи между геологической и геохимической средами учет изменений в геологической обстановке времени рудообразования. Например, раскрытие новых трещин — проводников растворов — или внутриминерализационное приоткрывание уже существовавших разрывных швов существенно нарушают соотношения в основных физико-химических параметрах рудообразующих сред и приводят иногда к временной трансформации их агрегатного состояния.

При резких спадах давлений в системе в процессе гидротермальной минерализации могут возникать даже эпизоды пневматолиза, вызывающие бурное выделение рудных веществ вследствие резкого изменения плотности несущих их растворов.

Фиксация такого рода событий в ходе рудообразования оказывается наиболее полной и доказательной, если геолого-минералогическое изучение месторождений неразрывно сочетается с исследованиями включений образцов растворов, законсервированных в разные моменты их действия.

Таким образом, под *средой рудообразования* в широком смысле этого слова мы понимаем *неразрывное единство двух ее составляющих — минералообразующей и геологической сред,* которые при генетических исследованиях месторождений должны изучаться на равных началах, но с разных сторон и разными методами. Продукты взаимодействия этих сред — минералы и минеральные парагенезисы руд — изучаются широко известными методами статической минералогии и минераграфии.

Таким образом, наука о рудообразовании в качестве главных объектов изучения имеет следующую триаду: *геологическая среда —геохимическая* (*рудообразующая*) *среда — минеральные парагенезисы руд.*

Теория эндогенного рудообразования разрабатывалась до недавнего времени только на основе данных изучения крайних членов этой триады, а также с помощью экспериментов не с природными, а с искусственными системами расплавов и растворов.

Использование в науке «живых» образцов *природных* рудообразующих сред, надежно законсервированных в виде включений в минералах, дает в руки исследователей очень острое оружие познания с мерой и числом сложной динамики развития процессов и явлений эндогенного минералообразования.

### *Процессы и явления образования минеральных веществ*

Во всех случаях, когда в науке и в обыденной жизни следует обозначить наиболее ощутимые изменения неорганических и органических веществ, применяется термин «процесс». Это в переводе с латинского означает «продвижение».

Под процессом вообще понимается последовательное развитие предмета или явления во времени и пространстве. В каждом процессе выражаются определенные объективные закономерности хода изменений, проявляющиеся в смене состояний, в стадийности количественных и качественных преобразований, в исчезновении старого, зарождении и развитии нового.

Если до 18 века естествознание было наукой о вещах, то позднее оно становится все более и более наукой о процессах, о происхождении и развитии разнообразнейших частей природы Земли.

Для естествоиспытателей процесс развития материи означает переходы с одного ее уровня на другой, более высокий уровень организации систем и это мы прослеживаем через основные формы восходящего движения в материальных средах, изменяющих физико-химические параметры существования и тем самым регулирующих течение процессов.

Энергия процессов также передается через материнские среды разного агрегатного состояния и аккумулируется в тех или иных продуктах этих процессов. Каждый процесс протекает в том или ином отрезке времени, эволюционно или дискретно, с перерывами постепенности, что зависит от изменений в балансе аккумулированной в среде энергии.

От момента зарождения любого материального объекта соответствующий процесс его образования происходит в условиях постепенного исчерпания возможностей среды, например все более полного использования минералообразующих компонентов растворов и спада величин ее термодинамических параметров до низких значений.

Однако тот же процесс после затухания может приобрести восходящее развитие в следующей стадии, на более высоком энергетическом уровне. Такая активизация применительно к «постмагматическому» рудообразованию всегда бывает связана с повторным притоком минералообразующих сред, осуществляющимся обычно в результате изменений в геологической обстановке.

При неоднократном повторении этого можно говорить о пульсационном ходе процесса рудообразования. Масштабы таких пульсаций очень различны и их проявления наименьшей амплитуды фиксируются, например, в зональном строении минеральных индивидов.

В развитии минерального мира, начиная от роста каждого кристалла, можно прослеживать процессы самых различных масштабов и в конце концов начать выявление всеобщих закономерностей процесса минералообразования.

Его особенности в этом самом общем синтезе понятия уже совпадают с рассмотрением основной минеральной и геологических форм движения материи. Процесс экзогенного минералообразования охватывает уже конкретное проявление этих форм движения на поверхности Земли. Он выражается в образовании и преобразовании минеральных веществ под воздействием и в окружении атмосферы и гидросферы,

энергетически связанных в основном с излучениями Солнца. Таким образом, в геологическом аспекте этот процесс охватывается общей атмогидрогенной формой развития материи.

Частные процессы здесь будут выражаться в комплексе явлений гипергенеза, седиментогенеза и диагенеза, в которых, как уже отмечалось ранее, с появлением биосферы на Земле все более усиливалось влияние органической жизни материи.

Процесс эндогенного минералообразования в целом охватывает многообразные частные процессы и явления на Земле, объединяющиеся в общей магмопетрогенной геоформе развития литосферы.

В зависимости от действующих в твердом окружении разнообразных активных сред здесь выделяются группы интрамагматических и перимагматических (эманационных) процессов. Среди последних по различиям в агрегатном состоянии рудообразующей среды обособляются пневматолитовый процесс действия газообразных растворов и гидротермальный процесс действия водных жидких растворов, в общем снижающих термодинамический уровень своего действия от начала к концу минералообразования.

При изучении этих процессов правильный ход познания заключается в последовательном выяснении их проявлений от частного к общему, на фоне учета основных форм движения материи, законов и категорий природы с последующим возвратом к выяснению частного на новом более высоком уровне.

Одной из особенностей процессов глубинного минералообразования является не всегда прогрессивный, а иногда и регрессивный ход развития, проявляющийся, например, в явлении диафтореза. Иногда происходит изменение и самой минералообразующей среды, приводящее к ее менее совершенному состоянию. Например, можно снова отметить эпизоды пневматолиза, проявляющиеся в процессе гидротермальной деятельности.

Таким образом, все процессы, обусловливающие возникновение минерализации на Земле, органически связаны с действием и взаимодействием минералообразующих сред разного агрегатного состояния с геологической средой литосферы.

Основные геологические процессы эндогенного рудогенеза — магматический, пневматолитовый и гидротермальный — находят конкретное выражение в различных *явлениях*, в конкретных *способах образования* минеральных веществ в глубинных условиях и на поверхности Земли.

Магматический процесс породо- и рудообразования в интрузиях выражается в явлениях кристаллизационной дифференциации или ликвации, экстрагировании рудных компонентов и ассимиляции пород, а на поверхности — в излиянии и застывании лав, в вулканических выбросах и накоплении пирокластических минеральных веществ.

Пневматолитовый процесс на глубине выражается в первую очередь в явлениях метасоматоза — грейзенизации и скарнировании, а на поверхности — в явлениях возгона и образовании минералов сублиматов.

Гидротермальный процесс на глубине в основном проявляется в секреционной кристаллизации минералов заполнением полостей или в явлении замещения благоприятных пород, а на поверхности и в субмаринных условиях — в явлении коагуляции и коллоидного выделения (осаждения) минеральных веществ.

Благодаря этим процессам и различиям в их проявлениях в земной коре и на ее поверхности возникли характерные, специфические классы и генетические типы месторождений металлов и неметаллических ископаемых.

Таким образом, общие *процессы генезиса* эндогенных месторождений мы объективно познаем *через различия в самих минералообразующих средах*, а частные — *через явления*, раскрывающие сущность процессов для разных условий места и способа действия этих сред в той или иной геологической обстановке.

Часть I монографии в большой мере посвящена общим методологическим вопросам, среди которых наибольшее значение имеют формы движения неорганической материи на Земле и ее самоорганизация в средах разного состояния. На фоне общего в ней раскрываются более частные вопросы познания генезиса эндогенного мира, приведены доказательства самостоятельности существования основной минеральной формы движения, ее возникновение и развитие через основную химическую форму движения, носителем которой являются жидкие, реже газообразные, подвижные ионномолекулярные среды разного состава. Именно консерваты этих сред в виде включений являются очень важным источником научной информации о постоянно изменяющихся условиях развития и преобразования минерального мира в земной коре. Более того, эти включения в прозрачных минералах позволяют посредством изменения параметров их существования видеть взаимодействие основных химической и минералогической форм движения материи, например, как из жидкой капли природного раствора при ее охлаждении вырастают различные минералы-узники и как при нагревании они снова растворяются, переходя в породившую их геохимическую среду включения.

Часть II

# МИНЕРАЛООБРАЗУЮЩАЯ СРЕДА И ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА ФОРМИРОВАНИЯ ГЛУБИННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

## Глава 4

## СИСТЕМЫ И ПРОЦЕССЫ В СРЕДАХ ГЛУБИННОГО РУДООБРАЗОВАНИЯ

> Термодинамическое равновесие обозначает только существование взаимосвязи между термодинамическими параметрами системы... При изучении природных систем очень важно установить, какие из параметров определялись внешними условиями и начальным состоянием системы, т. е. должны рассматриваться как независимые, а какие были зависимы от первых.
>
> *Д. С. Коржинский* [55]

### *Краткое определение некоторых термодинамических понятий*

При рассмотрении систем газово-жидких включений в минералах и при учете свойств и характера действия минералообразующих сред существенную пользу приносят представления и понятия, полученные на искусственных системах в результате опыта целой плеяды ученых.

Физики и химики, как бы ни были велики их достижения в исследованиях искусственно созданных физико-химических систем, всегда очень осторожно относились к «внедрению» полученных результатов в истолкование закономерностей несравнимо более сложного комплекса процессов и явлений глубинного рудообразования в земной коре.

Эксперименты с искусственно созданными системами, проводящиеся при высоких термодинамических уровнях, благодаря замкнутости этих систем отвечают почти монотемпературным и изобарическим условиям кристаллизации в автоклавах и поэтому мало соответствуют природным условиям. Вместе с тем такие исследования дали очень многое для понимания термодинамики и химизма глубинных процессов. Первым самым важным их результатом является то, что было изучено поведение главных природных растворителей — воды и углекислоты и растворимость в них других летучих и нелетучих компонентов и соединений в широком интервале температур и давлений.

Эти же исследования, конечно, очень существенно содействовали развитию термодинамики и физико-химии вообще, основные положения и понятия которых необходимы и для истолкования многих эндогенных процессов и явлений, так как в общем одни и те же законы развития неорганической материи действуют и в природе и в лаборатории.

Для рассмотрения свойств и характера действия природных глубинных минералообразующих сред, представляющих собой подвижные физико-химические системы, необходимо напомнить терминологию и некоторые определения главнейших понятий, а также содержание основных принципов, законов и положений термодинамики хотя бы в самой простой их форме.

Первый закон термодинамики дает представление *о сохранении энергии*, о невозможности ее получения из ничего.

Второй закон термодинамики — закон энтропии — определяет *направленность в передаче энергии* (например, тепло переходит только от более нагретого тела к более холодному).

*Система* — часть пространства, содержащая некоторое тело или совокупность тел. *Фаза* — часть системы, обладающая одинаковым химическим составом и термодинамическими свойствами. Можно различать газообразную, жидкую и твердую фазы системы. Фаза — тело однородное или почти совсем однородное во всем своем объеме. Незначительные отклонения от однородности в жидкостях могут быть связаны с конвекционными и другими токами, а в реальных кристаллах — с дефектами упаковки атомов, газово-жидкими включениями или чужеродными примесями, неравномерно распределенными в кристаллической решетке. При рассмотрении эндогенных процессов реальные соотношения фаз разного агрегатного состояния могут учитываться только при изучении включений геохимической среды в минералах.

*Гомогенная система* — система, представленная сама по себе одной фазой, но всегда находящаяся в контакте с одной или несколькими другими фазами. При изменении физико-химических параметров она может взаимодействовать со своим окружением, т. е. при этом возникают взаимоотношения, характерные для гетерогенной системы.

*Гетерогенная система* при неизменных параметрах — это относительно стабильно существующая совокупность фаз, находящихся в равновесии друг с другом. Изменение хотя бы одного из параметров немедленно вызывает сдвиги в подвижном равновесии и взаимодействии фаз друг с другом и с окружающей средой, заключающемся в обмене составными частями — компонентами фаз и среды (атомы, группы атомов, молекулы).

*Фазовая реакция* означает развитие физико-химических процессов, т. е. нарушение состояния относительного равновесия гетерогенной системы, связанное с происшедшим изменением ее основных интенсивных параметров. Такая реакция проявляется в возникновении новых фаз, исчезновении ранее существовавших, изменении состава фаз и их количественных соотношений, и для природных процессов и явлений может быть непосредственно наблюдаема только при экспериментах с системами включений. Правило фаз Гиббса применимо к идеальным, но не реальным природным системам.

*Состояние термодинамического равновесия* — одно из важнейших понятий физической химии — геологами может быть принято только как очень условное. Это понятие требует *мысленной изоляции* любой природной, обычно очень сложной системы от вещественного и даже энергетического влияния окружающей среды, что означает «мертвое» состояние материи, *прекращение любых процессов*, а это не свойственно никаким объектам минерального мира.

Относительно наиболее устойчивое, но тоже временное равновесие наблюдается в кристаллических решетках минералов и в системах ими герметизированных включений, наиболее стабильно существующих в длительной координате геологического времени.

*Термодинамические* (*основные*) *параметры* состояния фаз — это взаимосвязанные величины $T$ (температура), $P$ (давление), $X$ (концентрация), одинаковые для каждой системы в целом в любом состоянии ее временного равновесия, обладающие интенсивными свойствами, которые в отличие от экстенсивных не зависят от *массы вещества* в фазах.

*Термодинамические функции* (*потенциалы*) — это функции от переменных, определяющих состояние каждой системы: внутренняя энергия ($E$), энтропия ($S$), энтальпия ($H$) и др. Они прямо зависят от массы вещества, представляя собой раздельно и в сумме экстенсивные свойства каждой фазы в любой системе. Увеличение массы фаз, например вдвое, соответственно увеличивает в 2 раза абсолютное значение этих функций. *Внутренняя энергия* ($E$) определяется степенью интенсивности движения микрочастиц вещества (атомов, молекул) любой фазы (системы) и силами притяжения — отталкивания между ними. *Энтро-*

*пия* ($S$) — степень беспорядка вещества — функция, зависящая от параметров состояния системы и характеризующая это состояние с учетом массы заключенного в ней вещества (энтропия газа>жидкости>кристалла). *Энтальпия* ($H$) — полная энергия системы, функция состояния, представленная суммой внутренней энергии ($E$) и произведением давления ($P$) на объем ($V$) ($H=E+PV$).

*Открытые системы* обычны в земной коре и характеризуются постоянными потерями или поступлениями новых веществ и энергии, в нашем случае из окружающей геологической среды или из магматического источника. По существу все *природные макросистемы* являются в той или иной мере открытыми для массо- и теплообмена.

*Относительно закрытые системы* лишь энергетически взаимодействуют с окружающей их средой (теплообмен), а вещественный обмен (массообмен) между ними отсутствует или сводится к минимуму и возникает лишь при изменениях внешних термодинамических параметров в существовании этих систем. В природных условиях такими системами, наиболее важными для познания агрегатных состояний, фазовых реакций и физико-химических параметров, являются *микросистемы* геохимических сред, герметизированные во включениях кристаллических минералов (природные микроавтоклавы).

Кроме всеобщих основных законов термодинамики, фазовых состояний и реакций, физико-химических параметров состояния минералообразующих сред, очень важными являются константы, некоторые свойства и точки превращений, установленные для газообразного, жидкого и твердого состояния материи. Через эти так называемые «точки» познаются резкие перерывы (скачки) в развитии материи, зависящие в первую очередь от абсолютного уровня термодинамических параметров ($T$—$P$) и ряда других констант.

*Критическая точка* определяется такой критической температурой, давлением и молярным объемом, выше значений которых вещества уже не могут существовать в жидком виде и переходят в газообразное состояние.

*Точка кипения* (испарения) любого вещества связана с его превращением в пар (газ). Уменьшение давления снижает температуру кипения, а увеличение — повышает ее до существенно более высоких значений. Таким же образом для растворов действует понижение и повышение содержания растворенных веществ (концентрация).

*Точка плавления* фиксируется определенным сочетанием основных параметров $T$ и $P$, при которых происходит переход из твердого состояния в жидкое, т. е. разрушение совершенной кристаллической организации того или иного вещества. В аморфных телах, плохо организованных, эта точка не проявляется.

*Точка возгона* (сублимация) аналогична точке плавления, но характеризуется превращением некоторых твердых веществ сразу в газообразное состояние. Это характерно для молекулярных кристаллов и главное для сочетания высоких температур и низких давлений. Резкое снижение температуры вызывает обратный процесс превращения газообразного вещества сразу в твердое состояние, что наглядно проявляется в действии вулканических эманаций и образовании снега и града.

*Точка ликвации* — расщепление жидкой фазы на две несмешивающиеся и находящиеся в равновесии друг с другом жидкости разного состава. Для расплавов характеризуется высокими уровнями температуры (2200° С и ниже), а, например, для водно-силикатных и водно-углекислых растворов низкими их значениями (300—400° С и соответственно ниже 31° С).

*Точка эвтектики* фиксирует такое определенное сочетание состава жидкой фазы с основными параметрами, при котором начинается и

происходит одновременная кристаллизация двух твердых фаз, например кварца и полевого шпата графической зоны пегматитов гранитной магмы или солевых растворов.

*Точка инверсии* (полиморфизма) означает такой уровень значений в сочетании термодинамических параметров, при переходе через который происходят превращения модификаций твердого вещества, например α-β-трансформация кварца, означающая перестройку его кристаллической решетки в интервале значений $T$ 573° С при $P$ 1 *атм* и $T$ 653° С при $P$ 3000 *атм*. Так называемая температура инверсии кварца — функция давления и состава примесей.

Нужно особо подчеркнуть, что все эти точки подвижны и при строгом подходе обнаруживается их зависимость в основном от сочетания параметров $T—P—X$.

Одними из важнейших параметров и свойств жидкостей и газов, определяющих их разную способность перемещаться среди горных пород, являются *концентрация, вязкость* и обратная ей величина — *текучесть* $\varphi = \frac{1}{\eta}$.

Концентрация $X$ — это количество вещества в единице объема. Концентрацией раствора называется количество растворенного вещества (или веществ), содержащееся в определенном весовом количестве или определенном объеме раствора. Она выражается обычно в единицах массы или мольных долях данной фазы (или смеси фаз) раствора (газообразного, жидкого или твердого), отнесенных ко всему количеству раствора. Концентрация находится в прямой зависимости от основных параметров состояния каждой системы ($T—P$) и вместе с ними в фазах переменного состава обладает важнейшими интенсивными свойствами. Увеличение концентрации повышает вязкость растворов. Динамическая вязкость измеряется в сантипуазах. Для газов ее величина в сотни раз меньше, чем для жидкой воды. Вязкость жидкостей уменьшается с повышением температуры и увеличивается с повышением давления. Вязкость газов, наоборот, возрастает при нагревании и не зависит от их плотности.

### *Различия и переходы в агрегатных состояниях природных веществ*

Перед рассмотрением геологических аспектов использования физико-химических представлений необходимо остановиться на определениях разных *агрегатных состояний материи* и их свойствах, проявляющихся в среде рудообразования.

Естественно, что эти определения становятся более ясными только в *контрасте твердого, жидкого и газового состояний* организации *материи в ее нисходящем ряду* степени упорядоченности вещества.

*Твердое состояние* — самое совершенное, наиболее упорядоченное из известных нам состояний неорганической материи. Оно характеризуется наиболее плотной упаковкой структурных единиц — ионов, атомов, радикалов и очень редко молекул — в закономерные, свойственные каждому веществу повторяемые трехмерные кристаллические решетки *. Частицы в твердых телах находятся на расстояниях, соизмеримых с размерами самих частиц, а силы взаимодействия последних настолько велики, что твердые тела сохраняют до температурной точки плавления свою внешнюю форму.

Различия между жидким и газообразным, диффузным состоянием материи наиболее ясно проанализировал и представил известный исследователь газово-жидких включений канадский геолог Г. Смит [96,

* Автор здесь пока не учитывает неупорядоченное аморфное состояние плотных тел, которому несвойственно кристаллическое строение (стекла, гели и др.). *(Прим. ред.)*.

98], данными и наглядными графиками которого мы воспользуемся ниже.

*Газовое состояние* — наиболее неупорядоченное состояние материи представляет собой совокупность атомов и ионов газа или молекул пара, длина свободного пробега которых значительно превышает их собственные размеры, а время пребывания в поле сил соседней частицы ограничено временем взаимного столкновения. Газы обладают способностью к безграничному расширению, достигая минимума плотности в космической среде межзвездного пространства.

*Идеальные газы* характеризуются ничтожно малым взаимодействием между компонентами из-за их значительной удаленности друг от друга. Они могут смешиваться во всех соотношениях, характеризуются большой энтропией (полной неупорядоченностью частиц), не обладают растворяющей способностью и подчиняются простым закономерностям, выраженным в уравнении Клапейрона — Менделеева.

*Сжатые* (*реальные*) *газы* характеризуются в земной коре временно образованными ассоциациями связанных вместе частиц (пары, триплеты и т. п.), которые находятся в динамическом взаимодействии и равновесии со свободными не объединившимися еще друг с другом частицами. Уменьшение относительного количества последних может настолько увеличить плотность газов при высоких давлениях, что они приближаются уже к текучему (флюидному) состоянию.

*Флюид* в принимающемся нами значении этого термина характеризуется переходной между газом и жидкостью диффракцией рентгеновских лучей (под малыми углами) и надкритическим уровнем термодинамических параметров. В газово-жидких включениях при их нагревании флюид обнаруживает ряд выявленных нами особенностей (критические точки, инверсия и др.), которые будут описаны позднее при освещении методов определения агрегатных состояний минералообразующих растворов. В зарубежной литературе термин «флюид» чаще всего используется как объединяющий и жидкость, и газ, и пар, что для рассмотрения систем включений неприемлемо.

*Докритические газовые растворы* являются теми *реальными* широко распространенными природными газами и парами, которые, находясь под давлением выше атмосферного, обнаруживают специфические свойства растворителей, возрастающие с увеличением давления (плотности) и температуры газа.

Как можно воочию видеть в природных герметизированных системах газовых включений и при искусственном воспроизведении минералообразующих газовых сред (Н. И. Хитаров, Л. Н. Овчинников, Н. Шефталь, Г. Кеннеди, Г. Мори и др.), уплотненные пары и газы, особенно близкритические флюиды, приобретают значительное качественное сходство с соответствующими им жидкостями (высокие растворяющие свойства) и весьма активно участвуют в минералообразовании и пневматолитовом метаморфизме пород.

В замкнутых системах газовых и флюидных включений геохимической среды можно сколько угодно раз и даже на одном и том же включении демонстрировать довольно высокую растворимость неорганических веществ и кристаллизующую способность газовых и газообразных (флюидных) минералообразующих растворов.

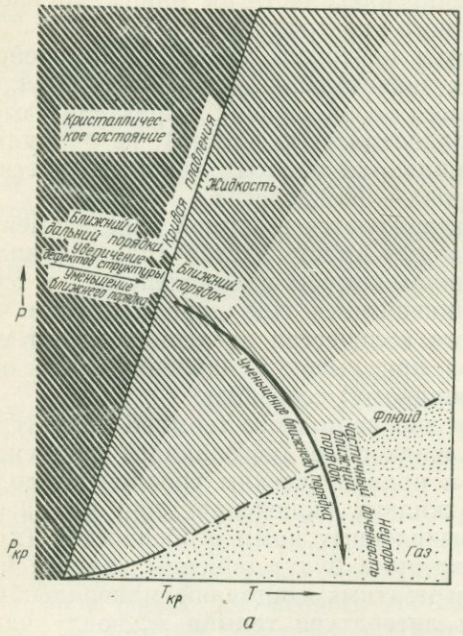
В этих реальных газах включений мы позднее будем различать *сухие газы* *, *водные надкритические газы* существенной плотности,

---

* Автор часто использует термин «сухие газы». «Сухими газами» он назвал еще в 1950 г. включения, встречающиеся наиболее часто в сотовых кварцах пегматитов и содержащие при комнатной температуре менее 10% жидкой фазы. Необходимо помнить, что этот термин не отражает истинного положения вещей, так как «сухие газы» могут на 100% состоять из паров воды, но из-за их малой плотности при охлаждении жидкая фаза конденсируется в незначительных количествах. (*Прим. ред.*).

*околокритические и докритические флюиды* значительной плотности и в основном молекулярные *пары* воды, действующие в докритической области относительно низких температур в совокупности с другими комплексированными с ней компонентами, и даже *аэрозоли* разных труднорастворимых веществ.

Выявленные объективные возможности различения этих градаций в минералообразующих газовых средах включений не только позволят сократить бесплодные споры о наличии или отсутствии глубинного пневматолиза, но и в конкретном виде расчленять этот важный процесс на стадии и ступени его развития при формировании глубинных месторождений.



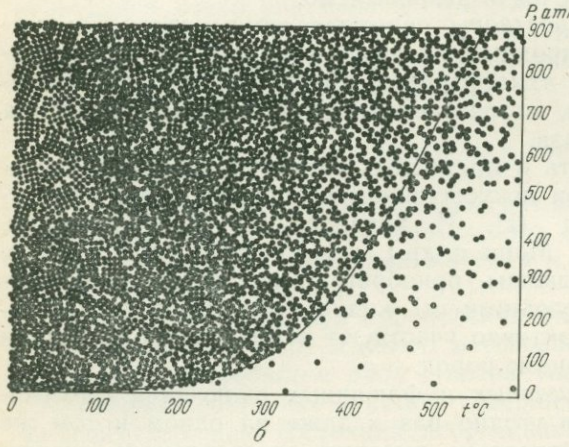




Рис. 10. Схематические фазовые диаграммы
*а* — однокомпонентной системы; *б* — структур флюидного состояния материи (воды) в области критической точки (по Ф. Г. Смиту)

*Жидкое состояние вещества.* Современная кинетическая теория жидкостей обнаруживает некоторое их сближение с твердым, т. е. кристаллическим состоянием вещества через некоторые элементы твердости и порядка в жидких телах и проявления элементов беспорядка в твердых телах. Различия между жидким и твердым веществами заключаются лишь в степени порядка расположения структурных единиц и их связях друг с другом, но не в качестве этих тел.

Во всяком случае рентгеноструктурный анализ показывает некоторое правильное расположение частиц жидкого расплава при температурах, близких к началу его кристаллизации. Процесс плавления кристаллов также заключает в себе временные элементы равновесия в паре жидкость — твердое вещество. Их сходство подчеркивается непрерывным контактом и взаимодействием частиц, а различия подчеркиваются тем, что эти частицы в жидкостях не занимают друг по отношению к другу постоянно фиксированного положения, что обусловливает характерное свойство *текучести* жидкостей.

Различия между жидким и газообразным состоянием, как уже отмечалось, заключаются в разной их плотности, степени ассоциации частиц и в зависимости от термодинамических параметров между этими

состояниями может существовать промежуточное — *флюидальное* состояние материи. Из-за способности последнего к безграничному расширению при снижении давления флюиды, по нашему мнению, все же следует относить к газообразному состоянию вещества, а их деятельность — к пневматолизу.

*Жидкость* следует определять как не полно организованную фазу, не имеющую тенденции неограниченно расширяться, а по силе сцепления частиц друг с другом и вязкости занимающую промежуточное положение между газообразной и твердой материей *.

Удельный объем жидкостей, значение которого недооценивалось в представлениях об агрегатных состояниях, также занимает промежуточное положение между удельными объемами газов и твердых тел.

Взаимоотношения между рассмотренными главными агрегатными состояниями веществ представлены на диаграмме Г. Смита (рис. 10, *а*), а переходное от газа к жидкости флюидное состояние, относящееся к воде, на двухмерной схеме (рис. 10, *б*).

В природных условиях водные жидкости являются наиболее важными растворителями, транспортерами и кристаллизующими средами для подавляющего большинства минералов, пород и руд магматического и гидротермального происхождения, поскольку растворяющая способность и плотность жидкостей ($\alpha$) существенно выше, чем у газов.

*Истинные ионно-молекулярные растворы* (и расплавы) ** в общем понимании представляют собой однородную смесь растворяющего и растворенного вещества, которые не могут быть разделены механическим путем на составные части. Обычное наличие в таких растворах солевых компонентов обеспечило через основную химическую форму движения материи транспортировку молекулярных и комплексных соединений и кристаллизацию минеральных веществ, а также гидротермальные изменения пород и другие процессы и явления. Истинные жидкие растворы характеризуются разными типами химической связи образующих их частиц (ковалентная, ионная, водородная и др.), которые подробно рассмотрены Г. Смитом [98].

*Коллоидные псевдорастворы* (обычно гидрозоли) состоят из «растворяющей» среды и мелких заряженных частиц (мицелл) дисперсной фазы, которые могут быть отделены от растворителя, так как не проходят через животную перепонку и некоторые другие ультрафильтры. В гидрозолях наблюдается эффект Тиндаля — рассеивания света мицеллами. Последние мало подвержены действию силы тяжести, но находятся даже при обычной температуре в непрерывном броуновском движении. Слипание частиц друг с другом (коагуляция) вызывает их *выпадение* (осаждение) из коллоидных растворов с образованием гелей, исходных неорганизованных веществ, обеспечивающих возникновение коллоидных и затем метаколлоидных минералов.

Такие эндогенные коллоидные растворы возникают главным образом в приповерхностных вулканических условиях развития земной коры при быстрых спадах температур и давлений и обеспечивают образование некоторых практически важных так называемых субвулканических и субмаринных месторождений.

---

* Твердое и жидкое состояния находятся ближе друг к другу, чем жидкое и газообразное. В силу этого переход от твердого состояния к жидкому требует меньшей затраты энергии, чем переход от жидкого состояния к газообразному. (*Прим. ред.*).

** Геологи при генетических исследованиях вынуждены различать твердые растворы веществ, магматические расплавы, как и растворы, подчиняющиеся правилу фаз, газовые и паровые пневматолитовые растворы, жидкие, главным образом водные (гидротермальные и холодноводные) растворы и переходные между расплавами и растворами состояния, однако это может стать доступным только после начала систематических исследований консерватов минералообразующих сред.

Специальное внимание воде во вводной части монографии мы уделяем потому, что объектом наших исследований являются главным образом герметизированные в кристаллах системы водных минералообразующих растворов разнообразного состава, фазового состояния и концентраций. Эти природные системы не только изучаются под микроскопом в статическом виде, но с ними проводятся физические эксперименты в широком диапазоне температур (от —150 до +800° С) и химические, в том числе и ультрамикрохимические анализы. Именно это заставляет нас привести основные сведения об известных свойствах легкой воды и ее растворах и подчеркнуть их особенности, наглядно проявляющиеся в указанных экспериментах.

Результаты последних не могут быть правильно интерпретированы, с одной стороны, без учета приведенных представлений о системах, параметрах и константах термодинамики, а с другой — без учета свойств самой воды и водных растворов, напоминание о которых приводится ниже.

Для развития процессов минералообразования наиболее важным химическим соединением является легкая вода ($H_2^1O^{16}$ 99,4% от всей воды) — самый могучий растворитель в природе и носитель жизни на Земле. Ее количество только на поверхности нашей планеты равно примерно 15 триллионам тонн, из которых только 3% составляют пресные воды континентов. Растворяя очень многие вещества, вода сама при этом остается инертной, но параметры водных растворов по сравнению с чистой водой становятся существенно иными. Это казалось бы очень простое молекулярное соединение двух атомов водорода и одного атома кислорода (окись водорода) на самом деле представляет собой значительное разнообразие. Последнее обусловлено наличием трех изотопов у водорода и шести изотопов у кислорода. Поэтому в обычной воде содержится вода полутяжелая, тяжелая, сверхтяжелая и сверханомальная.

В образовании молекул аномальной воды участвуют протий ($H^1$), дейтерий ($H^2$), тритий ($H^3$), кислород $O^{14}$, $O^{15}$, $O^{16}$, $O^{17}$, $O^{18}$, $O^{19}$, дающие друг с другом разные сочетания, такие как $H_2^2O^{16}$, $H_2^1O^{18}$, $H_2^1O^{17}$, $H_1^2$ —$H_1^1O^{16}$ (или $O^{17}$, $O^{18}$), $H_2^2O^{17}$ (или $O^{18}$) и др.

В воде океана на 5—6 тысяч атомов обычного легкого водорода приходится 1 атом дейтерия (D). Последний был установлен и в ювенильной воде газово-жидких включений, дальнейшее исследование которых может представить нам ряд сюрпризов. В частности, в некоторых включениях одна из несмешивающихся даже при высоких температурах жидкостей [34] является, безусловно, водным раствором, а вторая может оказаться сверханомальной водой, более плотной и значительно более вязкой, чем обычная вода (в 10—15 раз).

При одинаковом химическом их составе нормальная и сверханомальная воды совсем не смешиваются друг с другом. При глубоком охлаждении сверханомальная вода не замерзает, а просто загустевает как стекло. В. Б. Дерягин предполагает, что эта вода представлена иным «сортом» молекул окиси водорода, отличающихся характером колебательного движения от обычной и других разновидностей воды.

Вообще химически чистая вода, по В. И. Вернадскому [19], состоит из молекул разного рода, от $(H_2O)^1$ до $(H_2O)^6$. В обычной легкой воде преобладают молекулы $(H_2O)^2$, а кристаллическая сетка льда состоит из молекул $(H_2O)^4$. Для исследований газово-жидких включений необходимо учитывать следующие свойства обычной воды.

Обычная жидкая дистиллированная легкая вода на 11,19% состоит

из водорода с атомным весом 1,008 и на 88,81% из кислорода ($O^{16}$ — 99,76%, $O^{17}$ — 0,04% и $O^{18}$ — 0,2%) с атомным весом 16,000. Ее молекула имеет четыре полюса электрических зарядов (+2 и —2), располагающихся по тетраэдру. Под действием сил притяжения между электрическими диполями и водородными связями в жидкой воде возникают группировки из 12 молекул. При превращении чистой воды в минерал гексагональной системы (лед) при 0° С возникает рыхлая молекулярная тетраэдрическая структура с водородными связями. Лед имеет семь полиморфных модификаций (рис. 11). При замерзании воды происходит увеличение ее объема на 9%.

Жидкая легкая вода имеет максимум плотности, близкий к единице при +4° С, а тяжелая вода при +11,6° С (1,105). При 0° С плотность обычной жидкой воды равна 0,9999, а ее льда 0,9168. При повышении концентраций солей плотность воды увеличивается (морская вода до 1,028), а температура замерзания, согласно закону Рауля, понижается (при $X=4$ вес.% — 2,2° С). По температурам замерзания минералообразующих растворов в газово-жидких включениях получают суждение о концентрациях в них растворенных веществ.

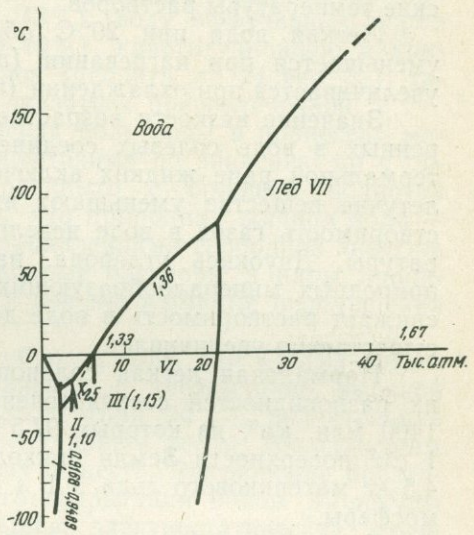



Рис. 11. Фазовое строение воды в координатах $T—P$ (по Л. Н. Аксюку)

Скрытая теплота плавления льда по сравнению с другими веществами очень высокая и ожижение сопровождается большим увеличением удельной теплоемкости с 0,49 до 1,009 *кал/г·град* при 0° С.

Тройная точка жидкой легкой воды, находящейся в равновесии со льдом и водяным паром, находится при +0,0073° С и 4,6 *мм рт. ст.* Скрытая теплота парообразования очень высока и при 100° С равна 538,9 *кал/г*, а давление паров при температуре кипения составляет 760 *мм рт. ст.* (1,0132 *Мбар*). Уменьшение давления снижает эту температуру, а увеличение повышает ее до существенно более высоких значений. Для растворов таким же образом действует снижение или повышение концентрации растворенных веществ.

Для чистой легкой воды критическая точка определяется температурой ($T_{кр}$) 374,11° С и давлением ($P_{кр}$) 218,3 *атм.* Критический объем ($V_{кр}$) для нее составляет 3,1975 *см³/г* и соответственно критическая плотность ($\alpha_{кр}$) 0,313 *г/см³*.

Поскольку вода находится в литосфере только в виде растворов разных, в том числе очень высоких концентраций («гидротермальная рапа» [34], температурная критическая точка этих растворов может подниматься на 150—200° С. Увеличение давлений повышает растворимость легкорастворимых солей, так как при этом нарушается каркасная структура легкой воды. По Г. Смиту [98], максимальная концентрация их в искусственных системах отвечает насыщению воды при температуре 425° С 50% NaCl по весу или 65% вес. KCl. Поэтому гидротермальный процесс, как показывает гомогенизация жидких включений, обычно протекает в интервале от 550—500 до 100—50° С, так как, например, критическая температура 30%-ного раствора NaCl составляет примерно 550° С.

Учет удельных и критических объемов (или плотности) минералообразующих растворов для интерпретации явлений, наблюдающихся в газово-жидких включениях в минералах при их нагревании до исходного состояния, имеет очень большое значение. В частности, если удельный объем включений меньше критического (для имеющейся концентрации раствора), в результате нагревания произойдет гомогенизация по I типу, т. е. в жидкую фазу. В противном случае гомогенизация включения осуществится в газовой фазе (по II типу [34]). Растворенные в воде газы и в первую очередь $CO_2$ понижают критические температуры растворов.

Легкая вода при 20° С обладает вязкостью 1,005 *спз*, которая уменьшается при нагревании (при 50° С = 0,550, при 100° С = 0,282) и увеличивается при охлаждении (при 0° С = 1,789 *спз*).

Значение вязкости возрастает с повышением концентрации растворенных в воде солевых соединений и достигает максимума в гидротермальной рапе жидких включений [34]. Растворенные в ней легколетучие вещества уменьшают вязкость водного раствора, однако растворимость газов в воде невелика и снижается с повышением температуры. Двуокись углерода, находящаяся по распространенности в природных минералообразующих средах после воды на втором месте, снижает растворимость в воде до 150—200° С, а выше этих температур существенно увеличивает.

Нормальная легкая солоноватая вода с малыми примесями своих разновидностей сосредоточена в Мировом океане в количестве 1400 млн. *км*$^3$, из которых 97,5% приходится на океан. В расчете на 1 *см*$^2$ поверхности Земли приходится примерно 268,5 *л* морской воды, 4,5 *кг* материкового льда, 0,1 *л* пресной воды и 3 *г* водяных паров атмосферы.

Это огромное количество первично эндогенной воды, по А. П. Виноградову [20], пробившейся на поверхность в процессе зонной выплавки мантии, при формировании твердых наружных оболочек литосферы и проявлениях вулканизма, участвовало в глубинной миграции разнообразных элементов и выносе солевых соединений металлов. Солей тоже первично эндогенного происхождения, находящихся в современной океанической воде (в среднем 3,52 вес. %), хватило бы на то, чтобы покрыть земной шар сплошным слоем мощностью 45 *м* ($5 \times 10^{22}$ *г* солей). В ее элементном составе содержатся: O — 85,89 вес. %; H — 10,80; Cl — 1,93; Na — 1,07; Mg — 0,13; S — 0,088; Ca — 0,042; K — 0,037; Br — 0,0066; C — 0,002; Sr — 0,001; B — 0,0004; Si и F по 0,0001 и в ничтожных концентрациях, по-видимому, почти все другие элементы.

Анионная часть солей океана возникла, по обоснованному мнению А. П. Виноградова [22], из продуктов дегазации вулканов, а катионная — за счет разрушения горных пород твердой земной коры.

Древние лагуны морей, начиная с кембрийского времени (около полумиллиарда лет назад), захоронили в стратисфере планеты грандиозные количества легкорастворимых соединений, образующих многочисленные месторождения ископаемых солей. Вместе с ними, так же как на современном Карабогазе, были захоронены и водные рассолы.

Подземная гидросфера, однако, формировалась в стратисфере Земли за счет постоянного притока ювенильных вод из глубин и вадозных вод с поверхности. Они обеспечивали образование огромных бассейнов подземных термоминеральных вод, занимающих в нашей стране многие десятки тысяч квадратных километров. В предгорных прогибах Северного Кавказа и Закавказья ювенильные воды, смешиваясь с вадозными, имеют температуры от 100 до 150° С и даже 200—270° С.

Предварительные подсчеты показали, что для теплофикации и

энергетики, а также для извлечения ряда элементов и с бальнеологическими целями у нас в стране имеется возможность ежесуточно получать около 20 млн. $м^3$ термоминеральных подземных вод, во многих местах напорных и самоизливающихся.

Количество пресных и соленых вод под поверхностью земли грандиозно и, по-видимому, соизмеримо с водой океана. Если при этом учесть волосные воды горных пород и микроконсерваты минералообразующих водно-солевых растворов в газово-жидких включениях гидротермальных минералов и пропаренных пород, воду гидратированных интрузивных пород (серпентиниты до 13%), воду эффузивных пород (в перлитах до 3%, в пехштейнах до 10%), конституционную и кристаллизационную воду многих минералов (цеолиты до 24 вес. %), такая количественная оценка может не оказаться преувеличенной.

Разнообразнейшая гидрогеохимическая роль воды в процессах минералообразования земной коры не сопоставима по значению ни с одним другим веществом. Это было раскрыто с большой полнотой В. И. Вернадским [19], который писал, что природная жидкая вода — это сфера активная. Она переполнена проявлениями свободной энергии. Он справедливо считал, что жидкие водные растворы и пары пропитывают всю стратисферу, обеспечивая в ней непрерывные перемещения минеральных веществ.

Интенсивность растворяющей способности воды для многих соединений легко в ней диссоциирующих связана с чрезвычайно высокой диэлектрической постоянной, равной 80,36 (при 20° С), значительной полярностью ее молекул и малым молекулярным весом, допускающим высокие содержания в ней растворенных веществ. Растворение последних в водной среде — это прежде всего гидратация ионов. Молекулы воды окружают их оболочкой, уменьшая электростатические связи между гидратированными ионами. Отрицательные ионы при этом окружаются положительными, и наоборот.

В молекулярной среде воды присутствуют водородные и гидроксильные ионы ($H^+$ и $OH^-$), произведение концентрации которых зависит от температуры. От их соотношения зависит химическая реакция растворов, в свою очередь влияющая на растворимость в них тех или иных веществ. Когда концентрация тех и других ионов равна $[H^+]=10^{-7}$ и $[OH]=10^{-7}$, реакция водных растворов нейтральная. Обычно химическая реакция растворов выражается через отрицательный логарифм концентрации водородных ионов, обозначаемый pH и называющийся водородным потенциалом. У нейтральных растворов pH=7. Если водородный потенциал больше 7, то реакция раствора щелочная, а если меньше, то кислая. Концентрация ионов $[H^+]$ зависит не столько от диссоциации воды, сколько от соотношения обычно находящейся в растворах углекислоты, которая диссоциирует на ионы ($H_2CO_3 \rightleftarrows HCO_3^- + H^+$). При выделении $CO_2$ водный раствор становится более щелочным и, например, приобретает большую активность к растворению кремнезема.

Кроме водородного потенциала в практике изучения водных растворов важно учитывать окислительно-восстановительный потенциал (Eh), по-видимому, влияющий не столько на растворимость веществ, сколько на характер соединений элементов растворов в кристаллические решетки тех или иных минералов. Окисление отвечает отнятию электронов, а восстановление их присоединению.

Как явствует из теории растворов, огромную роль при растворении в воде тех или иных веществ (так же как и для их гидротермальной кристаллизации) играет уровень взаимосвязанных интенсивных термодинамических параметров ($T$—$P$—$X$) и агрегатное состояние, на котором действует водная среда. Однако к этому вопросу мы будем неоднократно обращаться позднее.

Для сопоставления водных консерватов газово-жидких включений в минералах с водами верхней мигросферы и поверхности необходимо остановиться на вопросах классификации природных вод. Они, как правило, находятся в подвижном равновесии с газами и с твердыми фазами земной коры. Именно поэтому природные воды разного агрегатного состояния всегда представляют собой растворы очень разнообразных концентраций и химических характеристик.

Основатель гидрогеохимии В. И. Вернадский [19] на основании этих признаков и их физико-географического положения выделил и описал 485 видов водных растворов. Разнообразие их еще более велико, если учесть, что воды включений тогда еще почти не были изучены. Эти воды были освещены ученым только в семействах 104 (виды 406—410) и 129 (вид 485). В минералах разных генетических типов эндогенных месторождений, в ювенильных рудных рассолах выявлены сочетания десятков элементов, образовавшихся при охлаждении в вакуолях включений, и десятки микроминералов-узников иногда с неизвестными в условиях поверхности Земли концентрациями веществ и сочетаниями атомов (например, хлорид алюминия и цинка).

В эндогенных водных истинных растворах газово-жидких включений обнаруживаются самые разнообразные кислоты, основания и соли в форме молекулярных соединений и ионов.

Наиболее обычными среди последних в порядке распространенности являются $Na^{1+} > K^{1+}$, $Ca^{2+} > Mg^{2+}$, $B^{1+} > Li^{1+}$, $Cl^{1-}$, $HCO_3^{1-}$, $SO_4^{2-}$, $F^{1-}$, $CO_3^{1-}$, и, возможно, $HS^{1-}$ и $S^{2-}$.

В минералообразующих растворах включений устанавливаются характерные химические типы водных растворов-рассолов, а именно хлоридный, карбонатный и сульфатный и часто содержатся соответствующие подвижные солевые соединения с тяжелыми металлами, которые ими транспортируются.

По степени минерализации водных растворов и рассолов в дальнейшем мы будем различать следующие их градации (по М. Г. Валяшко, Е. В. Пиннекеру и автору):

1) пресные воды — до 1 *г/кг* (до 0,1 вес.%);
2) солоноватые воды — до 35 *г/кг* (до 3,5 вес.%);
3) соленые воды — до 50 *г/кг* (до 5 вес.%);
4) слабые рассолы — до 150 *г/кг* (при 15 вес.%, плотность 1,04—1,11 *г/см*$^3$);
5) крепкие рассолы — до 320 *г/кг* (при 32 вес.%, плотность 1,11—1,21 *г/см*$^3$);
6) очень крепкие гидротермальные рапы — до 500 *г/кг* (плотность 1,21—1,35 *г/см*$^3$);
7) предельно насыщенные рапы и расплавы-рассолы — до 680 *г/кг*, в которых солей содержится уже больше, чем водного растворителя.

В таких предельных рассолах и остаточных рассолах-расплавах, по-видимому, преобладают гидратные комплексы, а в системах включений, при обычной температуре, — многочисленные минералы-узники хлоридов, фторидов, карбонатов, сульфатов и др.

Первые три градации характерны для поверхностных вод гидросферы, следующие две — для солевых лагун и озер и для обычных гидротермальных месторождений низких и средних температур, а последние две для пегматитовых, скарновых и других высокотемпературных месторождений.

Ювенильные водные среды при высоких температурах сами по себе являются сильными кислотами и обычно содержат другие кислоты (HCl, HF, $H_2S$). При их соприкосновении с уже застывшей частью интрузива и с окружающими породами быстро возникают солевые растворы самых разнообразных веществ, приобретающих высокую степень подвижности.

Растворение минеральных веществ и гидролиз сопрягаются в единстве противоположных тенденций, так же как на высоких термодинамических уровнях магмы происходят синтез и диссоциация молекул воды и других минерализаторов, непрерывное взаимодействие их друг с другом. В перимагматических условиях многокомпонентные геохимические водные среды разных агрегатных состояний в процессе растворения, непрерывно изменяясь, преобразуют и геологическую среду пород. При этом происходят взаимообмен веществами, постоянное удаление одних элементов из растворов и поступление других в растворы. В этой работе реализуется тепловая и химическая энергия минералообразующих сред, главным источником которых являются магматические интрузии, возбуждающие их миграцию.

Как было экспериментально и путем термодинамических расчетов доказано А. А. Кадиком [46], вода кислых магм при температурах выше 1200° С находится полностью в диссоциированном состоянии, выше 800—900° С такая вода количественно еще преобладает, но уже в остаточных пегматитообразующих расплавах при температурах 650—700° С преобладает молекулярная вода (75%), точнее ее растворы.

Такая вода находится в виде «пакетов» или скорее гидратирует катионы солей, насыщающих остаточные расплавы-рассолы. При охлаждении систем кристалло-флюидных включений таких расплавов крепкие и очень крепкие водные рассолы обособляются в интерстициях между минералами-узниками, находятся в подвижном равновесии с ними и с обособлениями газовых пузырьков в герметизирующих вакуолях.

Термодинамические исследования таких сложных природных систем микроавтоклавов нагреванием до получения капель исходного остаточного расплава в сочетании с их индивидуальным ультрамикрохимическим анализом уже сейчас выглядят очень перспективными для физической химии расплавов и выявления в них природы водного компонента.

## Глава 5

## МИНЕРАЛООБРАЗУЮЩИЕ СРЕДЫ В ЗЕМНОЙ КОРЕ

> Природа той подвижной среды, которая выносит рудное вещество из магмы и отлагает его в рудных месторождениях..., пожалуй самое важное в теориях генезиса рудных месторождений, но вместе с тем мы здесь встречаемся с одной из самых трудных проблем металлогении.
>
> *А. Н. Заварицкий* [30]

### *Генетические сведения о магме и ее производных*

Первопричиной эндогенного рудообразования в земной коре на высшем этапе развития планеты, уже дифференцированной на оболочки, являются периодическое возникновение на разных глубинах земной коры жидких магматических масс, продвижение этих масс и их газообразных и жидких дериватов по направлению кверху.

При анализе действия таких подвижных минералообразующих сред требуются четкая терминология и однозначное определение многих понятий, иногда отсутствующих в геолого-минералогической литературе. Например, даже в учебных руководствах практически нет четкого определения понятия, что такое «магма». Такие термины, как «интрузив» и «интрузия» используются в значительной степени произвольно и даже как синонимы. Поэтому нам приходится дать некоторые опре-

деления ряда понятий, обеспечивающих взаимопонимание при дальнейшем изложении представлений автора.

*Магма* представляет собой жидкий, *электронно-ионномолекулярный,* существенно силикатный расплав, подчиняющийся правилу фаз, с высоким, до очень высокого, энергетическим потенциалом и значительным содержанием легколетучих веществ. С потерей тепла и удалением части минерализаторов наступает массовый процесс организации магматических веществ в кристаллические решетки пирогенных минералов, образующих в своей совокупности закономерные агрегаты магматических горных пород (интрузивов) и руд месторождений.

*Интрузия* представляет собой динамическое внедрение (или проплавление) и временное существование жидкой магматической массы, образующей активные очаги различного объема и формы, возникающие на разных уровнях земной коры, в которых происходит магматическое рудообразование, отщепление и удаление магматических эманаций, часто имеющих выход к поверхности.

*Интрузив* (плутон, массив, шток, дайка) образуется на месте интрузии в виде глубинного твердого относительно инертного тела массивных магматических пород, часто вмещающих залежи рудных минералов.

Все так называемое «постмагматическое» пневматолито-гидротермальное рудообразование осуществляется в общем лишь до тех пор, пока существует интрузия. После превращения интрузии в интрузив оно затухает и новая минерализация может проявляться лишь в метасоматирующей деятельности остаточных межзерновых растворов, вначале активизированных высокотемпературным уровнем существования охлаждающегося интрузивного тела *.

При становлении интрузива на месте интрузии развивается эндогенное *синмагматическое* рудообразование: *пирогенное* из «кислого» расплава и *эманационное* из дериватов последнего.

*Генезис минералов и руд* — это синтетическое представление о разнообразных процессах и явлениях, приведших к возникновению минерализации и определяющихся в глубинах земной коры геологической обстановкой, агрегатными состояниями, физико-химическими параметрами и константами среды рудообразования.

Нельзя получить полноценного представления о генезисе эманационного месторождения, руды или отдельного минерала только по их внутренней морфологии и составу, по парагенетическим сочетаниям минералов в рудах, по выявлению геологической обстановки их нахождения или только по результатам изучения газово-жидких включений и искусственному воспроизведению минералов.

Для действительного выяснения генезиса обязательно требуется *комплексный подход* по трем каналам информации с учетом данных по отдельным звеньям геолого-минералогических исследований конкретного объекта земной коры (месторождение, рудное тело или гнездо, парагенезис минералов и отдельный минерал).

*Жидкие ионно-молекулярные растворы* в природе представлены в двух главных разновидностях: существенно *силикатными расплавами* магм разного состава, водными и *водно-углекислыми* термальными растворами простых и сложных солей различных металлов и неметаллов, содержащих также растворенные газы типа сероводорода, угле-

---

* Под термином «интрузия» в последнее время часто также понимают магматическое тело, образовавшееся при застывании магмы на глубине в земной коре, т. е. аналогично понятиям «интрузив», «массив», «плутон», «дайка». Хотя такое понятие этого термина стало уже даже более распространенным, чем первое (существовавшее ранее второго и приводимое здесь автором), нам представляется целесообразным стремление автора вернуть этому термину первоначальный смысл (кстати более правильно отражающий значение английского слова intrusion) и тем самым расчленить понятия «интрузия» и «интрузив». *(Прим. ред.).*

кислоты и др. Жидкие углеводороды не имеют большого значения в минералообразовании, так как являются растворителями только для двуокиси углерода и серы.

Физико-химики при термодинамическом исследовании жидкостей могут не выявлять различий между магмами и гидротермальными растворами, однако геологам это приходится обязательно делать. Для разграничения этих геохимических сред в самом простом виде можно использовать температурный критерий ($\sim$600° С). Однако главное заключается в том, что в магматических растворах (расплавах) *доминируют нелетучие или труднолетучие вещества, а в гидротермальных растворах количественно преобладают вода и другие соединения легколетучих веществ.*

Как можно установить по включениям консерватов этих минералообразующих сред в минералах гранитов и пегматитов, эволюция магматогенных жидкостей по мере снижения термодинамического уровня их существования происходит в направлении увеличения летучих в следующем ряду: *магматический расплав → остаточный расплав — рассол → гидротермальная водная рапа → обычный водный солевой раствор* (от очень горячего до теплого и холодного, от солоноватого до крепкого).

В последнем и предпоследнем звеньях переходов, осуществляющихся в реальных условиях земной коры, обнаруживаются важные перерывы постепенности. В первую очередь они связаны с давлением, которое испытывает резкие спады сразу же после внедрения интрузий или в процессе внемагматического (постмагматического) рудообразования, обычно сопровождающегося тектоническими приоткрываниями новых путей движения растворов. В этих случаях происходят быстрые превращения жидких растворов в газообразные с последующей их конденсацией снова в жидкие гидротермы. Таким образом, например, в самом первом приближении устанавливаются следующие реальные ряды активных минералообразующих сред:

1) расплав — рассол и плохо опознанная еще водно-силикатная жидкость → газовый раствор → флюид → жидкий раствор;

2) гидротермальная рапа → флюид → газовый раствор → гидротермальный конденсат.

Многообразие этих (по-видимому, наиболее типичных в природе) и других случаев изменений в составе и состоянии минералообразующих сред, как будет показано ниже, начинает расшифровываться для конкретных условий рудообразования по их консерватам (включениям) в минеральных образованиях разного возраста, однако для установления общепринятых строгих границ, даже в паре гидротермальный раствор — магматический расплав, требуется дальнейшее развитие термодинамической геохимии (термобарогеохимии).

Пока наиболее полное теоретическое объяснение многообразия в возникновении и взаимодействия минералообразующих сред разного состава и состояния было впервые представлено В. А. Николаевым [74], к замечательному графику которого с пояснительным текстом мы считаем необходимым еще раз привлечь внимание исследователей (рис. 12). Ниже следует без каких-либо изменений пояснительный текст к нему, приводимый В. А. Николаевым.

Таблица схематически изображает этапы кристаллизации магматических расплавов ($L$) и отделения из них газовой фазы ($G$), т. е. этап магматической дистилляции $L+G$, затем собственно пневматолитовый этап $G$, наступающий в магматических системах *III* типа вслед за полной раскристаллизацией расплава в предыдущем этапе, и, наконец, переход к этапу $L'$, т. е. к этапу образования в магматической камере гидротермального раствора.

Необходимо напомнить, что представляют собой три типа магматических систем. Первые два типа, выделенные еще П. Ниггли, характеризуются неограниченной взаимной растворимостью компонентов, причем системы I типа не имеют критических точек на кривой трехфазового равновесия: твердое тело — жидкость — газ, а системы II типа имеют на этой кривой две критические точки. Выделенные В. А. Николаевым системы III типа обладают резко выраженной ограниченной взаимной

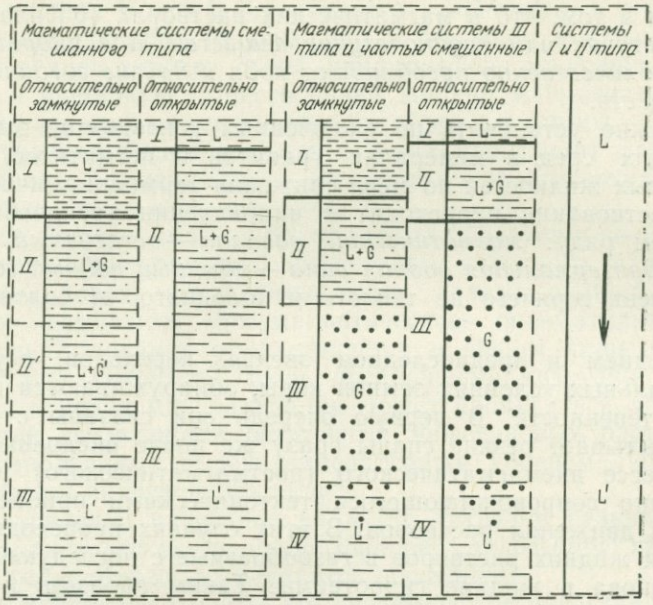



Рис. 12. Схематическое изображение этапов кристаллизации магматических тел в земной коре и различий в условиях образования газообразных (пневматолитовых) и жидких (гидротермальных) растворов (по В. А. Николаеву)

растворимостью компонентов (например, система вода — породообразующий силикат) и имеют одну критическую точку на трехфазовой кривой. В. А. Николаевым введен в употребление компонент «*C*» — легкорастворимые в воде соли (хлориды, фториды, сульфаты, карбонаты и т. п.). Им же введено понятие о смешанных системах (система I типа + система III типа), в которых из трех присутствующих в них компонентов один (вода) обладает неограниченной взаимной растворимостью с другим (компонент «*C*») и резко ограниченной взаимной растворимостью с третьим (породообразующий силикат).

В относительно открытых системах этап магматической деятельности $L+G$ начинается раньше, т. е. при более высоких температурах, чем в системах относительно замкнутых, и раньше заканчивается (см. положение границ между $L$ и $L+G$ в четырех столбцах слева). Системы III типа, не содержащие веществ типа особого компонента $C$ (т. е. различных растворимых в воде солей) или бедные такими веществами, показаны в третьем и четвертом столбцах. В этих системах пневматолитовый этап ($G$) наступает при полной раскристаллизации расплава. При дальнейшем охлаждении газовая фаза $G$ (надкритический раствор) постепенно и непрерывно переходит в состояние сжатого гидротермального раствора $L'$. В системах смешанного типа (т. е. в магматических расплавах, содержащих заметное количество вещества типа компонента $C$) характерно следующее: если такие системы являются относительно замкнутыми, то за этапом магматической дистилляции $L+G$ следует этап конденсации газовой фазы $L+G$, что при дальнейшем охлаждении и кристаллизации силикатных компонентов из жидкой фазы приводит к образованию сжатого жидкого (гидротермального) раствора $L'$. Это изображено в первом столбце рис. 12. Во втором столбце (в ходе кристаллизации систем смешанного типа, но относительно открытых для газовой фазы) показано, что этап

конденсации $L+G'$ отсутствует полностью или почти полностью (газовая фаза $G$ еще в этапе магматической дистилляции теряется магматическим расплавом). В ходе кристаллизации систем смешанного типа этап магматической дистилляции не сопровождается полным исчезновением к концу его жидкой фазы (расплава) $L$. Жидкая фаза существует в этих системах от начала до конца кристаллизации, непрерывно беднея силикатными компонентами и обогащаясь летучими.

В последнем (пятом) столбце показан постепенный и непрерывный переход от расплава $L$ в ходе его кристаллизации в гидротермальный раствор $L'$ в согласии с прежними выводами из теоретического и экспериментального изучения систем I и II типов, в условиях достаточно высоких внешних давлений на магматический расплав. Такое понимание магматического процесса находится в противоречии с новыми экспериментальными данными по изучению систем типа породообразующий силикат — вода и признается нами ошибочным.

Приведенная схема (см. рис. 12) подчеркивает в генезисе гидротермальных, в том числе и рудоносных, растворов три способа их образования.

1. Гидротермальные растворы образуются в результате миграции газовой фазы $G$ в породы, вмещающие интрузии, при сравнительно высоких температурах этапа магматической дистилляции $L+G$ Газовая фаза (надкритический раствор), испытывая те или иные, нередко весьма существенные изменения химизма при взаимодействии с вмещающими породами и охлаждаясь, будет переходить постепенно и непрерывно в состояние сжатого гидротермального раствора, а если внешнее давление упадет, будет конденсироваться с образованием жидкой фазы $L'$ меняющегося состава, в равновесии с трудно конденсирующимися составными частями газовой фазы, например, $CO_2$, $H_2$, $O_2$ и др.

2. Гидротермальные растворы образуются также в результате охлаждения газовой фазы $G$, остающейся после кристаллизации расплава $L$ в системах III типа. Такого происхождения растворы $L'$ (см. столбцы третий и четвертый рис. 12) могут остаться в пределах интрузивной массы, в порах, пустотах и трещинах образовавшейся магматической породы, но могут, конечно, и мигрировать во вмещающие породы.

3. Гидротермальные растворы $L'$ в системах смешанного типа образуются и как жидкий существенно водный *остаточный* раствор из кристаллизующегося расплава, на этапах более поздних, чем магматическая дистилляция (см. столбцы 1-й и 2 рис. 12).

Как можно видеть, предложенная В. А. Николаевым схема весьма наглядно освещает вопрос о возможных способах генезиса пневматолитовых и гидротермальных растворов.

С точки зрения объективных суждений нам пока очень мало доступны нижние подкоровые сферы миграции элементов Земли. Скорее всего условия очень высоких давлений и температур загасили в них проявления химического и кристаллообразующего движения материи. Однако уже выше поверхности Мохо перемещение подвижных субстанций в направлении пониженных давлений приобретает большую и все возрастающую интенсивность. Продвижение фронта сквозькоровых растворов вверх нарушается неравномерностями, возникающими вследствие внедрений магматических масс из глубины и очагов расплавления в земной коре.

Каждый из этих магматических очагов, дополнительно ассимилируя из пород легкоподвижные (летучие) вещества, сам становится их вторичным источником. Параллельно с локальным нарушением термодинамической обстановки вокруг себя такой очаг интрузии в ореоле своего физического, в основном теплового воздействия возбуждает энергичное движение поровых и волосных водных растворов через прогрев возрождающихся к новому движению растворов, которые проявляют минералообразующую и преобразующую деятельность. Такие интрузии являются мощным источником и своих ювенильных эманаций. Конечно, последние после отделения не могут не смешиваться с поровыми и волосными водами, уже находившимися в породах «рамы» интрузий и имеющими разное происхождение, вплоть до вадозного.

Так или иначе в обстановке резкого локального нарушения термодинамических параметров земной коры в районе внедрения магматических масс из глубины происходит смешение в элементном составе магматических, в основном водных, газовых и жидких растворов с растворами пород, для времени действия интрузии не являвшихся ювенильными. Последние растворы, еще до разогревания находившиеся в наиболее тесном общении с минеральным окружением пород, полу-

чили при разогреве повышенные возможности перемещения и заимствования из них разнообразных, в том числе и рудообразующих веществ посредством латеральной секреции. Однако все же магматические массы интрузий, возникшие в результате переплавления участков земной коры, были главными поставщиками рудообразующих веществ, осуществлявших миграцию в подвижных геохимических средах, минералообразование и преобразования пород на путях локализованного движения по разным тектоническим нарушениям и другим флюидопроводникам.

Таким образом, подвижные ювенильные, фригидные и вадозные водные среды разных агрегатных состояний действовали сообща и мобилизовали для транспортировки металлы главным образом из магматических интрузий и из прогретых в их ореоле ранее существовавших горных пород.

Резкие перепады температур и давлений вокруг магматических масс интрузий нивелировались в удалении от них, но волна неравновесия распространялась неизбежно вверх, в сторону пониженных интенсивных термодинамических параметров земной коры и ее поверхности. Именно в этом направлении продвигались массы легколетучих веществ геохимических сред, обеспечивавшие миграцию элементов и организацию их в кристаллических решетках минералов при снижении температур и давлений в благоприятных геологических структурах локализации.

Сложности взаимодействия по теплообмену и массообмену между фронтом продвигавшейся вверх от интрузии активной геохимической среды и проницаемой для нее геологической средой уже твердых пород пока не поддаются точному учету, и анализ их взаимодействия может удовлетворительно оцениваться только по консервантам растворов во включениях и видимым изменениям околорудных пород. Химический состав включений, относящихся к минералам той или иной стадии рудообразования, и баланс привноса — выноса веществ из вмещающих пород дают упрощенные, но все же относительно точные факты для научного рассмотрения вопроса.

### *О формах переноса веществ и составе минералообразующих сред*

В деятельности минералообразующих сред в земной коре магматические жидкости, как первые продукты радиогенного и гравитационного расплавления участков твердых оболочек Земли, занимают очень важное место в процессах рудообразования. В связи с их возникновением и временным существованием должны рассматриваться (в неразрывном единстве) также и подвижные геохимические среды другого состояния и состава, являющиеся дериватами магмы.

Первое, что обращает на себя внимание, это различие в составе самих магматических расплавов и их разная роль в процессах образования глубинных месторождений и в метаморфизующем действии на породы, вместившие интрузии.

*Разный состав магм* вполне достоверно устанавливается в их вулканических прорывах при современном истекании лав на поверхность Земли, а также проявляется в разнообразии глубинных пород магматической кристаллизации.

При учете разнообразия магматических расплавов в зависимости от содержания кремнезема принято различать *ультраосновные, основные, средние и кислые* магмы. Причина такого различия в составе, по-видимому, связана с разной глубиной возникновения бассейнов этих расплавов.

В верхней мантии образуются очаги гипербазитовой магмы, кристаллизующей при внедрениях в земную кору перидотиты, кимберлиты,

дуниты и пироксениты, а при излияниях на поверхность твердой коры образующих океаниты и их разновидности.

В нижней части перисферы при расплавлении ее пород возникают магмы основного и среднего состава, кристаллизующие на глубине габбро, нориты и анортозиты, а на поверхности дающие базальты, андезиты и порфириты.

Очаги расплавления первичных пород над базальтовой оболочкой земной коры дают кислые магмы. В качестве остаточных продуктов их раскристаллизации после внедрения образовались интрузивы гранитов и гранодиоритов, а на поверхности в результате переохлаждения возникали липариты, кварцевые порфиры и дациты.

Интенсивная ассимиляция разными магмами карбонатных пород осадочной оболочки Земли приводила к возникновению гибридных *щелочных магм,* которые при раскристаллизации на глубине образовали нефелиновые и другие сиениты, а также первичные карбонатиты, а при излияниях таких магм — трахиты, фонолиты и другие щелочные эффузивные породы.

Три первых самостоятельных типа магм отражают различия в химическом составе глубинных оболочек через характерные парагенетические ассоциации элементов руд и пород.

Ультраосновные магмы, обедненные минерализаторами при кристаллизации, задерживают в себе главные рудные элементы (Fe, Cr, Mg, Cu, Pt и др.), не образуют существенных ореолов рассеяния и перимагматических месторождений.

Основные магмы в большой мере также обладают свойством *интрамагматической концентрации* таких элементов, как Fe, Ti, V, Cu, Ni, Co, Pt, Pd, S, Pb, Zn, но в то же время значительная часть этих элементов выносится из интрузий вместе с легкоподвижными дериватами последних.

Кислые магмы при раскристаллизации почти не удерживают в себе рудных полезных компонентов и дают наиболее мощные ореолы *внемагматических минеральных образований,* за исключением особых случаев возникновения дочерних очажков остаточных пегматитообразующих магм, формирующихся в ловушках, связанных с интрагеоморфологией коры плутона (выступы), и в усадочных кавернах [35].

Интенсивность метаморфизма окружающих пород, связанная, кроме высоких температур и давлений, со способностью рассеяния магмой летучих дериватов, также увеличивается от ультраосновных к кислым интрузиям магмы. Такого рода различия в метаморфизующем воздействии расплавов разного состава связаны также с различиями в термодинамических уровнях основных параметров ($T$ и $P$) существования магм в самой наружной оболочке — стратисфере земной коры. По-видимому, наиболее длинный путь продвижения вверх расплавов ультраосновного состава сказывается в достаточном снижении их температуры к моменту выхода в места становления соответствующих интрузивов. Как можно судить по степени ококсования углей, например, около перидотитовых даек в Пенсильвании, поступавшие ультраосновные магмы имели температуру 500—600° С [33].

Необходимо отметить главную особенность собственно магматических жидкостей (расплавов) по сравнению с гидротермальными растворами, заключающуюся в том, что главные компоненты первых при проявлении основной минеральной формы движения обычно фиксируются в твердых продуктах, а для вторых они являются лишь транспортерами веществ и посредниками в процессе кристаллизации минералов. Сами они (вода и др.) в большинстве случаев не входят в состав минералов и пород.

При раздельном действии магматических жидкостей, газовых сред и гидротермальных растворов нет строго определенных температурных

границ их деятельности. Температурные поля минералообразования в разных активных средах перекрывают друг друга и лишь в общей схеме процессов эндогенного рудообразования [33] можно принять наиболее низкий температурный уровень для магм (700—600° С), средний для газовых сред (600—250° С) и относительно низкий (550—50° С) для гидротерм.

В отличие от «сухих» расплавов, которые можно получить из любых твердых веществ, достигнув точки их плавления, природные магматические расплавы содержат компоненты воды, углекислоты и других легколетучих веществ (с большой упругостью пара при невысоких температурах), таких как CO, HCl, HF, $H_2S$, $SO_2$, $Cl_2$, $N_2$, $H_2$, $S_2$, $CH_4$ и др. Некоторые из этих веществ, особенно Cl и F, образуют легколетучие соединения с металлами (типа $MoF_6$, $SnCl_4$, $WF_6$), обеспечивая их удаление из магмы еще в газовой фазе. Другие вещества магмы, такие как сера, мышьяк, селен, теллур, NaCl, KCl, легко переходят в парообразное состояние и также улетучиваются в окружающие горные породы с последующими трансформациями и переходом в жидкие гидротермы.

По газовым включениям можно видеть, что отделяющиеся от магмы ее дериваты *проходят путь* от «сухих» надкритических электронных и атомарных газов через ионно-молекулярные химические флюиды к докритическому газу и молекулярному пару и к жидким гидротермальным растворам.

Дистилляция газов воды и возникновение различных надкритических растворов связаны с образованием *гидратированных и иных разнообразных легколетучих комплексов элементов металлов и неметаллов.*

Таким образом, при изначально высоких термодинамических параметрах магмы одни вещества находятся в ней в диссоциированном состоянии, а другие в газообразных соединениях хлоридов, фторидов, боридов и других газов.

Чаще всего в пневматолитовых растворах по мере снижения температуры увеличивается количество молекул воды, вплоть до образования водяного пара, сохраняющего большую минералообразующую активность и ниже критических температур.

Согласно теоретическим воззрениям В. А. Николаева [75], одновременное присутствие в магматическом расплаве его основных составляющих — силикатов, воды и легкорастворимых в ней солей — иллюстрируется системами смешанного типа. Рассмотрение таких систем показывает, что выше определенных температур существует гомогенный магматический расплав. При понижении температуры наступает момент, когда из расплава в виде газовой фазы отделяются легколетучие компоненты (магматическая дистилляция первого рода). При этом если система открытая, то газовая фаза навсегда теряется для магматического очага, а если она закрытая, то какое-то время газовая фаза сосуществует с магматическим расплавом. Сам механизм дистилляции показывает, что следует ожидать наличия больших количеств воды в газовой фазе, которая, как отмечает В. А. Николаев, находится в сильно сжатом состоянии.

Как показывают многочисленные эксперименты с естественными системами включений газовых растворов (Ю. А. Долгов, Н. П. Ермаков, В. А. Калюжный и др.) и искусственное воспроизведение сходных систем (Л. Н. Овчинников, Н. И. Хитаров, Г. Мори и др.), на всех стадиях природной эволюции минералообразующие и преобразующие (особенно метасоматирующие) газообразные среды играли существенную роль. Она проявлялась в мобилизующем (флотационном, коалесционном и ином) извлечении из магмы рудообразующих веществ, в агрессивной мобилизации и выносе труднорастворимых компонентов из

минералов, а также в реакционном взаимодействии между газами и породами.

Л. Н. Овчинников [78], проведя серию очень важных опытов по растворению и переносу в газовых средах, особенно подчеркивает роль комплексных соединений, в частности, хлорацидокомплексов. Такие соединения обеспечивают резкое увеличение экстракции элементов из минералов и горных пород, многократное увеличение их растворимости в паровой, газовой и жидкой фазах (по сравнению с простыми соединениями) и многократное повышение устойчивости металлов в рудообразующих растворах, в их гидрооксокомплексах и двойных солях типа $KCl \cdot FeCl_3$, $NaCl \cdot PbCl_2$ и т. п. Степень комплексообразования, по-видимому, растет с температурой. Для комплексной соли $NaCl \cdot FeCl_3$ уже при температуре 132° С все железо в растворе оказывается связанным в комплекс $Na(FeCl_4)$, устойчивый до 500° С.

При снижении температур газовых растворов и пара происходит их конденсация в гидротермальные растворы, сопровождающаяся гидролизом безводных устойчивых комплексов, полимеризацией и распадом соединений, не устойчивых в жидких растворах. Преемственность в элементном составе тех и других растворов в общем сохраняется, но объемная концентрация веществ в жидкостях, конечно, достигает больших значений.

В газовых средах по их включениям в пневматолитовых минералах можно проследить эволюцию от малоконцентрированных газовых *«сухих» растворов* через водные *существенно газовые* со значительным содержанием углекислоты и сероводорода к довольно высококонцентрированным *флюидам*, уже содержащим много молекулярных компонентов, характеризующих жидкие фазы.

Эти разные магматогенные газовые среды обеспечивают *эволюцию пневматолитового процесса* кристаллизации минералов, происходящей в глубинных условиях при интенсивном физико-химическом взаимодействии с минералами горных пород, а на поверхности Земли — путем десублимации.

*Гидротермальный процесс,* во многих случаях являющийся продолжением развития пневматолиза, проявляется на глубине в кристаллизующей деятельности, протекающей как в открытых трещинах и пустотах в породах, так и метасоматически, жидких горячих (от 550° С и ниже) растворов электролитов различной крепости. Значительно реже гидротермальное минералообразование происходит из коллоидных растворов с выпадением гелей при резких спадах давлений и последующем их обезвоживанием (синерезис).

Как было раскрыто нами на основании исследований жидких включений [33], а позднее, хотя и без ссылок, принято А. Г. Бетехтиным [10], решающую роль в глубинном гидротермальном рудообразовании играли *истинные, солевые*, обычно чисто *водные,* часто *водно-углекислые, многокомпонентные растворы хлоридов, фторидов, сульфатов* и *карбонатов,* иногда достигающие очень высоких концентраций («гидротермальная рапа» [33]).

Эти легкорастворимые в гидротермальной среде, часто комплексные соединения солей обеспечивали транспортировку металлов и неметаллов и кристаллизацию рудных минералов с совершенно иными сочетаниями веществ по сравнению с материнскими ионно-молекулярными соединениями породивших их подвижных геохимических сред. Конечно, не может быть и речи о переносе готовых минералов, например *сульфидов,* такими растворами или их отложение (осаждение). Имела место кристаллизация их (сульфидов) как производных от присутствующей серы в растворах в виде сульфатных соединений или чаще сероводорода и элементов разных металлов. Роль и значение режима серы (и кислорода) в гидротермальных растворах впервые была хорошо

расшифрована А. Г. Бетехтиным [9] и не нуждается в дополнительных пояснениях. Им же было подчеркнуто важное значение приоткрываний трещин и разломов для продвижения жидких растворов вверх, против действия силы тяжести благодаря возникающему перепаду давлений [10].

В природных условиях гидротермальной деятельности по мере движения растворов вверх и резких изменений в их физико-химических параметрах, а также в результате смешения истинных ювенильных растворов с вадозными иногда возникают коллоидные *псевдорастворы*, рудообразующая деятельность которых возрастает в верхних частях земной коры.

В отличие от истинных растворов, становящихся гетерогенными только в моменты достаточно резкого спада давлений и кипения, золи представляют собой двухфазные системы взвесей (дисперсионная среда и дисперсная фаза), возникающие в результате реакций окисления и восстановления, гидролиза и обменного разложения *веществ с малой молекулярной растворимостью*. В числе таких веществ в кристаллическом ядре мицелл могут быть и сульфиды, которые только в этом случае могут выпадать в осадок * вследствие коагуляции под влиянием электролитов или резкого пересыщения растворов при спаде температур и давлений. Содержание сульфидов и окислов во взвесях жидких псевдорастворов, по Ф. В. Чухрову [122], может достигать первых десятков граммов на литр. Им же впервые была указана вероятная возможность образования *аэрозолей в пневматолитовой среде*, что подтвердилось позднее некоторыми газовыми включениями.

Газообразная среда проявлений пневматолитового процесса, конечно, менее совершенна по организации, чем жидкая водная минералообразующая среда, обеспечивающая гидротермальную деятельность, и жидкая магматическая среда пирогенного породо- и рудообразования.

Между постмагматическими минералообразующими средами, как было показано, существуют взаимные постепенные переходы, им свойственны также быстрые превращения в агрегатных состояниях (газа в жидкость и наоборот). Эти изменения минералообразующих сред зависят от изменений в геологической обстановке эндогенного рудообразования. В первую очередь образование разломов и трещин в горных породах отражается на снижении параметра давления. Это, *как в цепной реакции*, влечет за собой и изменения связанных с давлением других физико-химических параметров, через минералообразующую среду определяющих и регулирующих рудообразование.

Следует отметить, что активные геохимические среды, возбуждающие процессы эндогенного минералообразования, обычно находятся на более высоком термодинамическом (энергетическом) уровне, чем твердая геологическая среда, в окружении которой они действуют.

Выравнивание параметров той и другой среды стабилизирует процесссы минералообразования в определенном отрезке времени, а абсолютное снижение их значений приводит к угасанию процесса минерализации, сокращает до минимума взаимодействие этих сред и в первую очередь ограничивает химические реакции вещественного обмена.

Для любой основной формы движения материи далеко не все элементарные частицы, образующие и определяющие характер среды, ее состав и агрегатное состояние на разных термодинамических уровнях (параметрах), входят как компоненты развивающегося нового, более сложного и совершенного по организации неорганического или, тем более, органического объекта.

---

* Автор подчеркивает, что осаждение (выпадение в осадок) и кристаллизация — разные процессы, и указывает, что отложение минеральных веществ может происходить только из коллоидных растворов. *(Прим. ред.)*.

В частности, вода как главный компонент «постмагматических» рудообразующих сред, являясь лучшим *растворителем, концентратором* и *переносчиком* легкоподвижных молекулярных соединений минералообразующих веществ в виде хлоридов, фторидов, бикарбонатов, сульфатов, гидроксильных и других комплексов, при кристаллообразовании сама чаще всего не входит в кристаллические постройки минералов.

В то же время благодаря электромагнитному полю, возникающему вокруг каждого растущего кристалла на подходящем термодинамическом уровне из химических соединений водных жидких растворов легко отделяются соответствующие кристаллообразующие атомы, вступающие, таким образом, уже в сферу основной минеральной, более высокой формы движения материи.

Таким образом, при образовании кристаллических минералов химическая форма движения материи в основном проявляется *не в их синтезе* или «отложении», а в *разложении* на атомы и радикалы ранее возникших гидроксильных комплексов и солевых молекулярных соединений, компоненты которых затем кристаллизуются, т. е. пространственно объединяются друг с другом уже на более высоком уровне минералогической формы движения, в виде кристаллов и их агрегатов (см. рис. 5).

Любые геохимические минералообразующие среды всегда представляют собой подвижные субстанции, более низкие по уровню организации, чем их производные минеральные продукты, образующие эндогенные месторождения и рудные тела.

### *Представление о подвижном уровне агрегатных превращений минералообразующих растворов по вертикальному разрезу и о телескопировании процессов минералообразования*

В былых магматических очагах и их ответвлениях, ныне зафиксированных в земной коре крупными и малыми интрузивами, при высоких температурах и давлениях происходили очень сложные процессы физико-химического взаимодействия атомов, радикалов и молекул разнообразных веществ. Эти процессы, с одной стороны, приводили к кристаллизации пирогенных минералов, образованию плутонов и собственно магматических месторождений, а с другой — к длительной дистилляции значительной части минерализаторов, отгонявшихся в окружающие породы в виде высокоподвижных надкритических газовых растворов, иногда достигавших в расплавах предельно возможного насыщения. Последнее, конечно, зависело от разного состава возникавших химических соединений, различных для термодинамических уровней развития каждой магматической ограниченно замкнутой системы интрузии.

Эволюционный отгон («испарение») летучих из затвердевающих частей интрузии в процессе ее нормальной кристаллизационной дифференциации легко мог нарушаться посредством тектонических трансформаций в окружающей твердой геологической среде и в затвердевшей коре формирующегося интрузива. Такое внешнее воздействие на систему интрузии часто обусловливало прерывистость и пульсационный характер отделения надкритических дериватов интрузии. Это очень проницательно было подчеркнуто С. С. Смирновым [95], давшим первые представления и о *пульсационном действии газовых и жидких растворов* на путях их движения.

Эти эманации, представляющие собой закономерный продукт геохимического процесса дифференциации магмы, ассимиляции ею интрудируемых пород с частичным заимствованием их вещества, на путях своего энергичного продвижения от магматического очага создавали, как уже отмечалось, в высшей степени активную природную систему перимагматического пневматолитового минералообразования. Исключи-

тельная подвижность выделяющихся из магматической интрузии перегретых и находящихся под большими давлениями газовых и флюидных струй обусловливала *пропаривание и изменение минерального вещества* окружающих горных пород, особенно интенсивное на главных путях движения этих растворов. Зоны измененных пород, образовавшиеся в результате пневматолиза, оказывались более мощными, чем зоны гидротермальных преобразований. Продукты кристаллизации из газовых и жидких растворов для большинства случаев локализовались в местах наиболее интенсивного тока эманационных струй — в трещинах и разломах. Там, где проходила главная масса эманаций, возникало по закону действующих масс наибольшее количество минеральных новообразований и наибольшую интенсивность развития получал метасоматоз и на контактах биметасоматоз [53].

Пневматолитовое минералообразование происходило в очень изменчивой во времени и пространстве природной системе, почти всегда более открытой, чем относительно замкнутой. Эти изменения, с одной стороны, зависели *от стадии развития сосуществовавшего связанного с ней магматического очага, а с другой — от окружающей геологической среды* — горных пород и минералов, в разной степени способных к обменным реакциям.

Природная физико-химическая система надкритических растворов характеризовалась *для каждого момента времени и разного места ее действия* взаимосвязанными параметрами (температура — давление — концентрация), находящимися в очень подвижном равновесии друг с другом. Это равновесие в каждый следующий момент продвижения растворов снизу вверх могло нарушаться в отношении того или иного фактора, а следовательно, и для всех интенсивных параметров рудообразующей среды.

Постоянно происходившие во времени и пространстве изменения в условиях существования надкритических растворов, доходя до определенных количественных отношений, вызывали быстрые, а иногда относительно постепенные превращения этих растворов в другое агрегатное состояние. Пневматолитовые газовые растворы на том или ином расстоянии от действовавшего магматического очага в глубинах земной коры в конце концов превращались в жидкие гидротермальные растворы, если не было открытой сквозной связи этого очага с поверхностью (вулканы).

Такая трансформация агрегатного состояния растворов ощутимо сказывалась на продуктах рудообразования, на изменениях состава парагенезисов, текстур и структур кристаллизовавшихся ими минералов и руд. Значительно снижалась, особенно после конденсации флюидов, активность воздействия ювенильных растворов на окружающие породы и ранее отложившиеся минералы, сужался в пространстве ореол их изменений. Кстати, наиболее интенсивные изменения пород, как показывают исследования газово-жидких включений, далеко *не всегда сингенетичны* со стадиями продуктивного рудообразования, а следовательно, характер этих изменений не может служить достаточно четким критерием в систематике и тем более классификации внемагматических («постмагматических») эндогенных месторождений.

В процессе магматической дифференциации и образования интрузива не было *стабильного места превращения растворов из одного состояния в другое.* Оно с течением времени в процессе формирования каждого интрузива все более приближалось к верхней границе первоначального магматического резервуара (контакт плутона) и, таким образом, удалялось от поверхности земли. В связи с отодвиганием активной магмы к корневым частям интрузии, т. е. вглубь от эндоконтакта, на том уровне земной коры, где ранее действовали газообразные растворы, начиналось гидротермальное, сначала высокотемпературное,

а затем более низкотемпературное минералообразование. В этом наиболее обычном случае возникали сложные *полигенные* рудные месторождения (скарны, грейзены). Верхние части проводящих растворы («рудопроводящих») тектонических каналов, которых не достигал *подвижный уровень превращений* растворов из одного агрегатного состояния в другое, характеризуются *моногенными* гидротермальными месторождениями с более однообразным комплексом минералов [35].

Ниже максимального «опускания» в сторону остаточного магматического очага этой подвижной границы действия разных по агрегатному состоянию растворов возникали и «чисто» пневматолитовые месторождения. Последнее было возможно тогда, когда нормальный процесс действия магматических эманаций в данном участке литосферы над магматическим очагом относительно быстро прекращался. Это происходило или по причине закупорки путей продвижения растворов, или из-за затухания активности магматического очага вследствие быстрого формирования интрузива.

Иногда же процесс развития рудообразования в зоне циркуляции эндогенных растворов был настолько полным, что *подвижный уровень превращения их из одного состояния в другое опускался* в пределы раскристаллизовавшейся в верхней части материнской интрузии, т. е. ниже первоначальной границы пирогенного минералообразования, фиксированной корой интрузива.

Гидротермальный и тем более пневматолитовый рудогенез, таким образом, могли иметь место и в самом магматическом теле интрузива, что наиболее ярко проявляется при формировании оловянных, молибденовых и так называемых меднопорфировых вкрапленных и штокверковых руд в гранитоидах. По времени он отвечал одной из стадий деятельности «отодвинувшейся», вглубь активной части того же самого магматического очага, в которой к этому времени произошло обогащение рудными компонентами.

В этом случае вкрапленное оруденение в гранитах, скарны, образовавшиеся на их контактах, грейзены, возникшие в ореоле изменений кислых интрузивов и эффузивных пород, пегматиты замещения и даже «чистые» минеральные продукты пневматолиза существенно преобразовались процессом наложенной гидротермальной минерализации. При этом возникали, например, *полигенные* пегматитовые тела эпимагматического, пневматолитового и гидротермального происхождения в широком объеме их понимания, впервые охарактеризованные А. Е. Ферсманом еще в 1932 г.

Нами представлена, конечно, лишь самая общая схема *телескопирования,* часто нарушающаяся в связи с внутрирудными тектоническими подвижками*, повторными магматическими внедрениями и изменениями температур и давлений в зоне перимагматической минерализации.

Как было показано, любая попытка даже самого общего рассмотрения проблемы эндогенного рудообразования никак не может быть обстоятельной, если *геологическая среда — геохимическая* (*рудообразующая*) *среда и минеральные продукты* их взаимодействия (парагенезисы руд) изучаются раздельно друг от друга.

Их органическую взаимозависимость мы попытались предварительно раскрыть только в самом общем виде на фоне представлений о существовании основной минералогической формы движения материи и геологических форм ее движения. Пока еще недостаточны исследования образцов природных рудообразующих сред, герметизированных во включениях минералов, но зато очень подробно петрографически

---

* Здесь следует напомнить, что, как указывал впервые сам автор [33, 35], возможен и обратный процесс — превращение жидких гидротерм в газовые растворы, например, в результате резкого падения давления и приращения объема при быстром раскрытии трещин. *(Прим. ред.).*

изучены рудовмещающие породы и их деформации, а также разные минеральные индивиды, текстуры и структуры их парагенезисов на месторождениях. Это дает нам возможность лишь очень кратко рассмотреть в порядке введения к проблеме особенности геологической среды и структур локализации.

## Глава 6

## ВАЖНЕЙШИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

Первостепенное значение имеют коэффициент диффузии элемента, время действия растворов, их концентрация, температура процесса и такие свойства горных пород, как эффективная пористость в направлении диффузии, химическая активность пород и форма поровых пространств. Указанные факторы больше всего сказываются на составе ореолов вокруг рудных тел, создающихся в силу фильтрации растворов сквозь толщу вмещающих пород.

*В. И. Смирнов,* «Советская геология», 1955, № 49

При учете всегда неизбежного физического и химического *взаимодействия интенсивной рудообразующей среды со средой геологической* оказывается совершенно необходимым рассмотреть и свойства последней в пределах современного ограниченного их познания.

Физико-химические свойства геологической среды до сих пор не очень привлекали внимание геологов, в первую очередь потому, что рудообразующая среда геологического прошлого казалась не познаваемой. При ежегодно возрастающем понимании и техническом нарастании возможностей непосредственного точного изучения последней по ее образцам, законсервированным в минералах в виде включений, проявилась и острая необходимость исследования физико-химических свойств геологической среды, которые до недавного времени раскрывались только с тектонофизических позиций.

Среди разных свойств геологической среды, активно проявляющихся в процессах глубинного рудообразования, очень кратко рассмотрим только главнейшие *фильтрационые, теплофизические, физико-химические, тектонофизические и реологические* свойства, в совокупности отражающиеся на ходе процессов и явлений эндогенного рудообразования и формировании благоприятной или неблагоприятной для него геологической обстановки в том или ином участке земной коры.

### *Фильтрационные свойства и генезис трещиноватости*

Активность взаимодействия минералообразующих растворов с геологической средой зависит в первую очередь от степени и характера проницаемости горных пород для жидкостей и газов.

Различают *физическую проницаемость*, под которой подразумевается способность максимально насыщенной породы фильтровать через себя при наличии перепада давления газ или гомогенную жидкость, и *фазовую проницаемость,* при которой из гетерогенных растоворов проникает лишь та или иная фаза минералообразующей среды.

Способность пород к фильтрации среди ряда других факторов (градиент давления, вязкость растворов и др.) в очень большой степени зависит от их межгранулярной и трещинной пустотности, т. е. от наличия полых пространств различной формы и величины.

Межгранулярная проницаемость в свою очередь зависит от *откры-*

*той пористости* пород, представляющей собой совокупность пор, сообщающихся между собой и с источником растворов, и особенно от оптимальной *эффективной пористости,* обеспечивающей реальную пропускаемость жидких и газовых растворов при установившемся их движении, в котором используется лишь часть пространства относительно крупных пор.

*Общая пористость* представляет собой безразмерный параметр в виде совокупности всех открытых и замкнутых пор, выражающихся в долях единицы объема пород, при этом сами поры являются одним из важных элементов микроструктуры пород.

По размерам различаются макропоры (более 1 *мм* в диаметре), сверхкапиллярные поры (0,1—1 *мм*), капиллярные (0,0002—0,1 *мм*) и субкапиллярные поры с просветом менее 0,0002 *мм*.

В одной и той же породе могут оказаться поры всех этих размеров, однако литолого-генетические типы пород характеризуются каждый своим типом пористости с определенным характером движения в них растворов.

В макро- и сверхкапиллярных порах возможно свободное движение растворов в турбулентной форме, в капиллярных оно происходит лишь в ламинарной форме, а в субкапиллярных ни то ни другое движение невозможно и может осуществляться лишь медленная диффузия растворенных веществ, иногда сопровождающаяся фильтрационным эффектом их сепарации. В общем фильтрующими являются поры, превышающие 0,02 *мм* в диаметре.

По экспериментальным данным Л. Н. Овчинникова и А. С. Шура [80], фильтрационный эффект, впервые выявленный Д. С. Коржинским [54], проявляется тем более интенсивно, чем больше в породе ультрамикропор до 50 μ и чем меньше концентрация самих растворов *.

Явления замещения также происходят в результате проникновения растворов в сверхтонкие и субкапиллярные поры, а в капиллярных и макропорах осуществляется заполнение их пространства путем кристаллизации минералов из растворов или отложением из них коллоидного вещества.

Свободное пространство пород, характеризующееся более или менее равномерным распределением его по объему, возникает чаще всего первичным путем, между частицами кластических пород и туфов, между кристаллами интрузивных пород, а в эффузивах оно обеспечивается микро- и макропузырьками захваченных лавами газов.

*Трещиноватость всех масштабов,* вплоть до ультрамикрощелеватости отдельных минералов, представляет собой результат эпигенетических вторичных процессов.

Напряжения в геологической среде при достижении определенных значений вызывают нарушения в ее сплошности по разным плоскостям или неправильным поверхностям раздела, с разъединением физических связей между отдельными частями пород или минералов пространством возникающих щелей — трещин. Чаще всего развивается так называемая тектоническая, в том числе гравитационная трещиноватость разного масштаба.

Существенное значение для проникновения рудообразующих растворов в гранитоиды имеет контракционная трещиноватость, связанная не только с охлаждением и усадкой образовавшихся пород, но и с α — β-превращениями пирогенного кварца, вызывающими сокращение объема его зерен при охлаждении породы от 600 до 300° С на 5,36%.

Для наложенного минералообразования в ультраосновных интрузивах, связанного с их серпентинизацией, большую роль в асбесто- и

---

* На этих и последующих примерах можно видеть, как тесно связано действие минералообразующих сред с разными особенностями геологической среды.

| Свойства | Карбонатные | | Сланцевые | |
|---|---|---|---|---|
| | мрамор | известняки и доломиты | глинистые | хлоритовые и др. |
| **Фильтрационные** | | | | |
| Эффективная пористость $n_{эфф}$, об. % (по Б. П. Беликову) | Низкая до очень высокой 0,46—0,83 | 0,85—21,32 | Наименьшая 0,24—0,36—0,50 | |
| Типы трещиноватости (по Н. П. Ермакову) | 1—тектоническая, 3—катаклаза, 8—минерализационная | | 1,2 — кливажа, 10 — литогенетическая | |
| Водопроницаемость: | | | | |
| а) межгранулярная | Низкая (от 0,1 до 10) | | Наименьшая (до 0,1) | |
| б) трещинная | Высокая (зависит от количества и степени раскрытости трещин) | | От низкой до высокой в трещиноватых разновидностях | |
| **Физико-химические** | | | | |
| Растворимость: | | | | |
| а) в щелочной среде | Слабая | | Инертны | |
| б) в кислой среде | Очень высокая | | » | |
| Метаморфизуемость: | | | | |
| а) перекристаллизация | То же | | Слабая до высокой | |
| б) податливость метасоматозу | » | | Инертны до слабой | |
| Диффузионно-адсорбционная активность, *мв* (по В. Н. Кобрановой) | От —5 до +25 (45) | | От +10 до +70 | |
| **Теплофизические** | Мрамор | | | |
| (по В. М. Огиевскому) | | | | |
| Теплопроводность, *ккал·м·ч××град* ($\lambda$) | 0,217 | 0,846; 1,487 | 0,801—1,142 | |
| Температуропроводность, $a \cdot 10^{-4} м^2/ч$ | — | 16,03, 25,04 | 13,74—17,75 | |
| Теплоемкость ($C$) (теплосодержание), *ккал·кг·град* | — | 0,212; 0,222 | 0,237—0,240 | |
| **Тектонофизические** | | | | |
| Степень анизотропии | Анизотропны (кроме рифов) | | Очень высокая | |
| Прочность пород: | | | | |
| а) на сжатие, *кг/см²* | 800—1400 | 400—1900 (пористые 50—600) | Перпендикулярно слоистости | 950—2290 |
| | | | Параллельно слоистости | 620 |
| б) на разрыв (растяжение), *кг/см²* | 31—81 | | Очень высокая по слоистости<br>Очень низкая перпендикулярно<br>Очень слабая | |
| Несущие свойства при изгибе (по А. В. Королеву, П. А. Шехтману) | Очень высокие | | | |
| Хрупкость (жесткость) | Низкая | | Низкая | Средняя |
| Пластичность | Высокая (в тонкослоистых свитах) | | Очень высокая | |
| Течение (и ползучесть) в твердом состоянии (при повышенных литостатических давлениях) | Значительны (особенно для галолитов) | | Значительны до слабой | |

Таблица 2

**геологической среды по группам пород**

| Кластические | | Эффузивные | | Интрузивные | |
|---|---|---|---|---|---|
| песчаники и конгломераты | туфы и туфобрекчии | кислые | основные | кислые | основные и ультраосновные |
| Низкая до очень высокой (1,79—4,75 и 13,22—25) | | Низкая до высокой 1,47—8,60 | 0,50—3,77 | Низкая 0,64—2,0 | 0,25—0,52 |
| 1, 3,10 и 6 — усадки и встряхивания | | 1, 3, 6 и 5 — отдельности | | 4 — контракции, 8 — реакций, 7 — дилятации, 9 — $\alpha$ — $\beta$ трансформации, 1, 3 и 5 | |
| Высокая до очень высокой (от 10 *мд* до нескольких тысяч) | | Очень низкая | | Низкая при изолированных порах, высокая при катаклазе пород | |
| | | Высокая (при наличии трещиноватости) | | | |
| Очень высокая | | Высокая до слабой | | Высокая до слабой | |
| Слабая | | То же | | То же | |
| » | | Слабая | | Значительная | |
| Очень высокая | | Высокая до слабой | | Высокая | |
| От —2,5 до +15 (+30) | | — | — | — | — |
| 1,782 (песчаник) | — | 1,705 (альбитофир) | 1,92 (порфироид) | 1,904 (гранит) | 1,360 (змеевик) |
| 28,5 (песчаник) | — | 28,04 (альбитофир) | 30,6 (порфироид) | 31,82 (гранит) | 22,85 (змеевик) |
| 0,230 (песчаник) | — | 0,234 (альбитофир) | 0,226 (порфироид) | 0,219 (гранит) | 0,227 (змеевик) |
| Значительная | | Значительная при чередовании с пирокластами | | Квазиизотропные | |
| 740 и более | 910—1570 | 2990 (кварцевые порфиры) | 1000—3500 (базальты) | 1480 (гранит) | 1800 |
| 6—80 | | 60 | — | 50—80 | — |
| От очень слабых до высоких | | Слабые | | Средние | |
| Высокая до низкой (зависит от метаморфизма) | | Очень высокая | | Высокая | |
| Различная | | Очень низкая | | Низкая | Высокая |
| Слабое (при глинистом и карбонатном цементе) | | Отсутствует | | Очень слабые или отсутствуют | |

таллкообразовании имеет дилятационная трещиноватость. Проникновение растворов по порам в некоторые породы вызывает существенную внутриминерализационную трещиноватость, связанную с сокращением объема пород и минералов под влиянием возникающих химических реакций (каолинизация полевых шпатов 54% объема, доломитизация кальцита известняков — 12% и др.).

Как видно, в возникновении *скважности пород* (оптимальная пористость и трещиноватость) играют роль разнообразные внешние и внутренние факторы, проявляющиеся в геологической среде. В физической и технической системе мерой определения проницаемости пород является единица *дарси,* измеряющаяся площадью образца породы 1 *см*$^2$ при длине 1 *см*, через который при градиенте давления 1 *атм* обеспечивается проникновение жидкости с вязкостью 1 *спз*, со скоростью 1 *см/сек*, а миллидарси (*мд*) составляет, таким образом, 0,001 *дарси.*

Проницаемость геологической среды, обеспечивающей то или иное действие глубинных рудообразующих растворов, оказывается существенно различной и обязательно связанной с общими процессами образования пород и их доминерализационного преобразования и даже может быть субсинхронной самому процессу эндогенного рудогенеза, в котором иногда сами рудообразующие растворы определяют пути своего проникновения.

В первом приближении представляется возможным в развитие данных В. А. Обручева [76], В. Линдгрена [67], А. В. Королева [57], Р. Шрока различать в породах сингенетические пустоты и субсингенетические поры:

1) структурные поры неплотной «упаковки» обломочных, в том числе пирокластических пород (межзерновые и межслоевые) и усадочные в интрузивных породах;

2) микро- и макрополости, возникающие в породах в результате запаздывающего истлевания органических компонентов, а в глинистых породах (илах) — в результате задержки пузырьков газа;

3) макро- и микропустоты пузырчатых лав, связанные с задержкой газообразных продуктов магмы.

При внедрениях магм и предрудном воздействии горячих растворов на породы часто происходит разогрев пород и эпигенетическое увеличение их пористости и проницаемости вследствие трансформации объемов, частичного растворения и перекристаллизации минералов, наблюдающееся при их хлоритизации, серицитизации, пропилитизации, доломитизации, карбонатизации и прочих явлений «наложенного» (вторичного) минералообразования. Наоборот, окварцевание и турмалинизация пород, часто опережающие рудные стадии процесса, приводят к существенному уменьшению их первичной пористости.

Из весьма обильной литературы по формальному изучению структур рудных полей и месторождений можно видеть, какое огромное внимание уделялось «тектоническим» нарушениям сплошности пород под воздействием часто непонятных по происхождению внешних усилий, ориентации этих трещин в пространстве и механизму их возникновения (отрыв, скол), но не их происхождению.

Между тем именно генезис различных структур, в том числе трещиноватости, имеет первостепенное значение для выяснения условий локализации оруденения и прогнозов его развития по простиранию и на глубину. Именно это обстоятельство заставило нас опубликовать работу, посвященную структурам локализации полезных ископаемых [37] и представить по возможности в систематическом виде их большое генетическое разнообразие.

Среди 77 выделенных типов структур локализации, из которых 53 относится к эндогенным, были обособлены в 15 типах *атектонические структуры* крупных разрывов и мелкой трещиноватости интраплутони-

ческого, интравулканического и перимагматического (внутриминерализационного) происхождения.

Все эти мега-, макро- и микроструктуры — проводники растворов — характеризуются в 7 главе. Здесь мы представим генетическое разнообразие главных типов трещиноватости лишь мелкого масштаба:

1) тектонические трещины срезания, отрыва и изгибания при сжатии, растяжении и скручивании горных пород в складчатых структурах;

2) кливаж трещиноватости и скалывание при стрессе (сланцеватость);

3) трещиноватость катаклаза (раздробления) пород при тектонических напряжениях;

4) эндокинетическая трещиноватость контракции в интрузивных породах, в том числе в экструзивах и дайках;

5) трещины отдельности и растяжения эффузивных пород при их охлаждении и отвердевании лав;

6) трещиноватость просадки, связанная с дефицитом массы на глубине, и трещиноватость «встряхивания» пород при бурных вулканических извержениях;

7) трещиноватость дилатации при химических реакциях, вызванная увеличением объема минералов и пород (серпентинизация, гидратация и др.);

8) внутриминерализационная трещиноватость, связанная с химическим воздействием растворов и реакциями, вызывающими сокращение объема минералов и пород (каолинизация, доломитизация и др.), порождающими гравитационные оседания, а также с обрушениями пород над полостями выщелачивания;

9) микротрещиноватость $\alpha$ — $\beta$-превращения кварца в гранитах, прямо связанная с сокращением объема его зерен;

10) литогенетическая (диагенетическая) внутрипластовая трещиноватость, возникающая при усыхании и уплотнении осадков при превращении их в породы.

Кроме этих генетических типов, наблюдаются сложные случаи трещиноватости совмещенного физического и химического воздействия внешних и внутренних сил, преобразующих породы. Правильная генетическая расшифровка вызывает наибольшие затруднения у геологов-«структурщиков», если они упускают из внимания причины процессов структурообразования.

Восьмой и девятый типы трещиноватости иллюстрируют активное химическое взаимодействие рудообразующей и геологической среды, сопровождающееся существенным повышением скважности последней.

Экзотрещиноватость наземного выветривания пород (в геологическом прошлом) имеет для наших целей малое значение.

Генетическое изучение трещиноватости является очень важным звеном познания глубинных процессов рудообразования и поэтому при таком исследовании даже в полевых условиях необходим подход с разумом, мерой и числом.

А. В. Королев и П. А. Шехтман различают *удельную трещиноватость*, измеряющуюся количеством трещин, приходящихся на 1 $м^2$ породы, и *объемную трещиноватость,* или активную скважность, выражающуюся в процентах суммарного объема трещинных полостей, приходящихся на 1 $м^3$ породы.

В естественных массивных и слоистых породах их общая проницаемость обычно связана как с пористостью, так и с трещиноватостью. Экспериментальные исследования пропускной способности пор в зернистых породах издавна проводятся по методу Бейна. Теоретические основы гидродинамики растворов в трещиноватых породах были разработаны Г. М. Ломизе [68] с учетом влияния не только размеров при-

открывания, но и морфологии трещин (шероховатость их стенок, извилистость и т. п.).

Этот ученый предлагает считать породы водонепроницаемыми по трещинам, если последние отсутствуют или настолько тонки, что не могут содержать в себе свободную воду (раствор), и нефильтрующими, если они не пропускают практически измеримого фильтрата.

В этих случаях породы не передают гидромеханического давления и могут считаться *водоупорными*, а для геологов — совершенными *экранирующими горизонтами*.

Однако чаще всего не только пористость, но и микро- и макротрещиноватость разного происхождения обеспечивают проницаемость пород для рудопроизводящих растворов. Используя данные Г. М. Ломизе [68], А. В. Королев и П. А. Шехтман представили важную номограмму для определения коэффициента фильтрации растворов через трещиноватые горные породы и методику реставрации проницаемости пород в процессе былого рудообразования.

В обширном комплексе рудогенетических исследований нам представляются очень важными экспериментальные работы Б. В. Залесского и Е. А. Саниной [41] по определению проницаемости массивных пород и Ю. А. Розанова [91] по пористости и деформациям горных пород при высоких давлениях. Большое значение имеют также исследования по фильтрации жидкостей и газов через пористую среду, проводящиеся применительно к нефтегазовым месторождениям [107].

Наличие этих работ позволяет нам не останавливаться более подробно на фильтрационных свойствах геологической среды.

### *Некоторые физико-химические и теплофизические свойства горных пород*

Стандартные химические свойства пород в первую очередь связаны с их растворимостью и реакционной способностью, т. е. способностью к образованию новых соединений при взаимодействии с растворами. Эти свойства зависят от состава минеральных компонентов геологической среды и от состава и химической реакции поступивших в нее растворов.

Такой минерал-космополит, как кварц, а следовательно, кварциты, песчаники и другие существенно кварцевые породы, инертны к действию кислых растворов, но легко подвергаются растворению щелочными, а кальцит и карбонатные породы обладают обратными свойствами.

Полевые шпаты разлагаются и в кислых, и в щелочных растворах. При серицитизации и альбитизации из них происходит вытеснение натрия и кальция калием, и поэтому плагиоклазы подвергаются разрушению раньше, чем калишпаты, а пироксены разлагаются под воздействием растворов еще быстрее. Биотит под воздействием глубинных растворов легко замещается хлоритом или мусковитом, в то время как последний оказывается устойчивым и т. п.

Все эти легко различимые процессы минеральных новообразований осуществляются с обменом веществами между породой и раствором и в то же время часто происходит существенное повышение эффективной пористости в самой геологической среде.

Например, по данным И. Х. Хамрабаева [115], альбитизация гранитов и гранодиоритов приводит к увеличению в них эффективной пористости до 5,5%. Это обозначает переход в химические соединения растворов значительной части вещества твердых фаз, которое транспортируется и участвует в гидротермальном минералообразовании на более высоких горизонтах земной коры.

Не останавливаясь на этих и других общеизвестных химических

свойствах пород (и слагающих их минералов), нам хотелось бы в аспекте восприимчивости их к новому минералообразованию и возникновению первичных геохимических ореолов и ореолов пропаривания рассмотреть лишь отдельные физико-химические свойства геологической среды, еще очень мало привлекавшие внимание геологов.

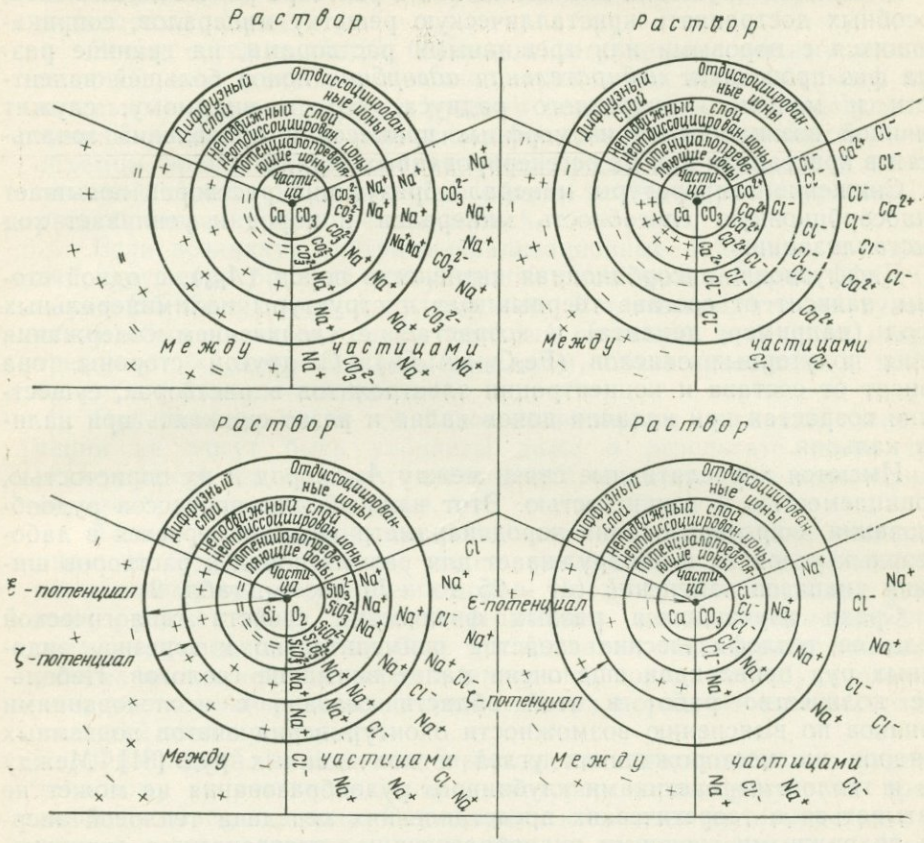



Рис. 13. Схемы адсорбции ионов электролитов на границе твердых и жидких фаз

Эти свойства прежде всего связаны с *диффузионно-адсорбционной активностью* пород при взаимодействии их с истинными рудообразующими растворами.

Здесь мы встречаемся с явлением возникновения электрических зарядов и адсорбционных слоев на границе твердой и жидкой фаз.

По В. Н. Кобрановой [52], под *ионносорбционной способностью* влажных проницаемых пород подразумевается их свойство адсорбировать вместе с водой ионы насыщающих их электролитов с образованием двойных электрических слоев на границе твердых и жидких фаз.

В результате *специфической адсорбции* ионов, родственных кристаллическим зернам пород, происходит «дорастание» (регенерация) последних. Так, из раствора $Na_2CO_3$ происходит адсорбция кальцитом иона $CO_3^{2-}$, заряжающая поверхность кристалла отрицательно, а из раствора $CaCl_2$ — общих ионов $Ca^{2+}$, сообщающая ей положительный заряд (рис. 13).

Таким образом, минералообразующие растворы, содержащие указанные вещества, при проникновении в известняки могут вызывать перекристаллизацию и укрупнение зерен в них, наблюдающиеся вблизи гидротермальных рудных тел. При этом сами растворы консервируются в виде вторичных для пород газово-жидких включений (см. главу 15), фиксируя ореолы пропаривания.

Дорастание кварцевых зерен в породах может происходить в результате *диссоционной адсорбции* ионов $SiO_3^{2-}$, насыщающих растворы при распаде метакремневой кислоты, возникшей в процессе растворения кварца на более глубоких горизонтах.

В случаях отсутствия или истощения в растворе родственных ионов, способных достраивать кристаллическую решетку минералов, соприкасающихся с поровыми или трещинными растворами, на границе раздела фаз происходит *избирательная адсорбция* ионов большей валентности и меньшего гидратного радиуса, что, по-видимому, служит причиной возникновения изоморфных примесей и проявлений зональности в кристаллах или их регенерированных зернах.

Снижение температуры минералообразующих растворов повышает ионносорбционную способность минералов и пород и усиливает ход кристаллизации.

Диффузионно-адсорбционная активность пород ($A_{да}$), с одной стороны, зависит от состава твердых фаз и структуры полиминеральных пород (например, цемента) и возрастает с увеличением содержания в них полуторных окислов ($Fe_2O_3+Al_2O_3$). С другой стороны, она зависит от состава и концентрации электролитов в растворах, существенно возрастая при наличии ионов калия и резко снижаясь при наличии кальция.

Имеются коррелятивные связи между $A_{да}$ пород и их пористостью, проницаемостью и глинистостью. Этот важный для процессов рудообразования и преобразования пород параметр ($A_{да}$) измеряется в лабораторных условиях и обнаруживает для разных пород и растворов широкий диапазон изменений (от —25 до +70 *мв*, см. табл. 2).

Среди изучавшихся разных физических свойств геологической среды ее теплофизические свойства применительно к генезису эндогенных руд привлекали еще очень малое внимание геологов. Небольшое количество работ в этой области связано с исследованиями горняков по выяснению возможности оконтуривания очагов подземных пожаров на месторождениях углей и колчеданных руд [81]. Между тем и геологами-генетиками глубинного рудообразования не может не учитываться в теоретических представлениях передача тепловой энергии подвижными горячими рудообразующими растворами в окружающие породы, так как среди термодинамических параметров температура минералообразования справедливо ставится на первое место. Выявление темпа охлаждения эндогенных рудообразующих растворов при продвижении их снизу вверх, возможное по газово-жидким включениям, отражается на прямой и обратной вертикальной зональности распределения минерального состава руд, на быстром или медленном исчезновении их полезных компонентов с глубиной. Эти вопросы, как будет показано, имеют не только теоретическое значение.

Понятно, что темп снижения температур зависит не только от характера и интенсивности поступления самих растворов к месту рудообразования, но и в очень большой мере от теплофизических свойств геологической среды.

Главнейшими среди них являются *теплопроводность* (тепловое сопротивление пород), *температуропроводность и теплоемкость* пород. В любой твердой геологической среде происходит *кондуктивная передача* тепла (теплообмен через теплопроводность), т. е. в результате непосредственного соприкосновения в минералах горных пород атомов, ионов и радикалов, находящихся в непрерывном тепловом движении (колебании) в кристаллических решетках.

При формировании глубинных рудных залежей газовые и жидкие растворы продвижением вверх от интрузивного источника обеспечивают *конвективный* привнос тепла к месту рудообразования с нарушением установившейся здесь ранее термодинамической обстановки.

При первоначальном поступлении горячих растворов (или расплавов) к месту будущего оруденения вначале возникает неоднородное тепловое поле, связанное с тепловой анизотропией самой геологической среды и неравномерным распределением в ней рудообразующей среды по апофизам трещин или по участкам повышенной пористости (проницаемости) пород.

Затем осуществляется переход к регулярному режиму возникшей тепловой аномалии, и ее внешние ограничения выравниваются применительно к форме будущего рудного тела. После этого наступает временная стабилизация (относительное тепловое равновесие) между объемом проникшей рудообразующей среды и окружающей ее геологической среды, после которой общий температурный уровень минералообразования начинает снижаться.

Если возникнут внутриминерализационные подвижки, то происходят нарушения баланса поступающих растворов, которые С. С. Смирновым [95] были названы пульсациями. Естественно, что эти пульсации могли обеспечиваться только потоками растворов в крупных открытых трещинах («рудопроводящих каналах»), обеспечивающих в них турбулентное движение жидкостей.

При ламинарном и тем более капиллярном движении такие пульсации не могут быть уловлены даже в результате очень тонких исследований температур гомогенизации газово-жидких включений минералообразующих растворов.

Такие исследования применительно к конкретным месторождениям в будущем должны тесно увязываться с теплофизическими испытаниями рудовмещающих пород. Предстоящие поисковые (на слепые рудные тела) декрептометрические и палеотермометрические съемки, проводящиеся на базе исследования законсервированных вторичных включений растворов в минералах пород, потребуют очень точного учета теплофизических свойств этих пород, из которых главным является теплопроводность.

Физический смысл теплопроводности противоположен удельному тепловому сопротивлению пород, которое характеризует их противодействие передаче тепла. Размерность и единицы их измерения в литературе представляются в сопоставимом, но различном виде. Мы принимаем за коэффициент теплопроводности

$$\lambda \frac{ккал}{м \cdot ч \cdot град},$$

а тепловое сопротивление $\xi = \frac{м \cdot ч \cdot град}{ккал}$ (см. табл. 2). Этот коэффициент в численном отношении фиксирует количество тепла, протекающего при данном режиме через вырезанный из породы куб, если разность температур на его противоположных гранях составляет 1° С, а боковые утечки тепла отсутствуют. Таким образом, он показывает хорошо или плохо геологическая среда пропускает тепло при установившемся тепловом режиме.

*Температуропроводность* пород является мерой быстроты, с которой геологическая среда передает температурные изменения во времени от одного места другому.

Численно коэффициент температуропроводности ($a$) выражает повышение температуры в образце породы кубической формы в единицу времени при подводе к нему количества тепла, создающего на противоположных гранях разность температур, равную 1° С. Его размерность — $м^2/ч$. Эти параметры и их коэффициенты связаны с представлениями о теплоемкости, т. е. способности пород поглощать или рассеивать тепло.

*Удельная теплоемкость* ($C_p$) определяется количеством тепла, необходимым для повышения температуры единицы массы вещества на 1° С. Она измеряется в *ккал/кг*° С при определенной заданной температуре. Удельная теплоемкость полиминеральной породы может быть вычислена по процентному содержанию и теплоемкости отдельных слагающих ее минералов.

Связь между всеми этими теплофизическими свойствами может быть представлена зависимостью

$$a = \frac{\lambda}{C_p \gamma},$$

где $\gamma$ — объемный вес (плотность), *кг/м*³.

Породы по величине теплоемкости при обычной температуре могут существенно (до 50—60%) отличаться друг от друга. На разных уровнях их нагрева удельная теплоемкость различна, и при высоких температурах (до 800—1000° С) приращение этого физического параметра достигает 100% исходной величины.

Обстоятельные исследования удельной теплоемкости были проведены в самое последнее время А. Н. Дударевым [28] методом смешения в обычных условиях, а при высокой температуре с помощью массивного колориметра. По Кондомскому железорудному месторождению им был установлен спад теплоемкости хлоритовых сланцев после возрастания при нагревании, начиная примерно с 500° С, а мраморов с 600° С. Разность удельных теплосодержаний между ними достигала на 1 *м*³ 613,7 *кал/м*³ (мегакалорий).

После проведенной «реставрации» степени нагрева пород автор пришел к выводу о том, что активность рудовмещающих пород при эндогенном рудообразовании зависит от температуры их прогрева и при $t<500°$ С хлоритовые сланцы оказались более восприимчивы к оруденению, а при $t>500°$ С более активными были мраморы.

Таким образом, теплофизические свойства пород (см. табл. 2), наряду с некоторыми другими свойствами, имеют рудоконтролирующее значение.

### *Тектонофизические особенности горных пород и их классификация по физическим и химическим свойствам*

Степень подготовленности того или иного участка земной коры к проникновению растворов и восприятию оруденения в очень большой мере зависит от особенностей деформации горных пород, происходящей в результате их перемещений в горизонтальном и вертикальном направлениях.

Характер разрывных или складчатых структур связан не только с их различным генезисом, но в большой мере и с тектонофизическими свойствами геологической среды. Это прежде всего прочностные свойства пород, их разная способность к деформациям и разрушению (трещинообразованию) под воздействием внешних усилий (физико-механические свойства пород).

Эти свойства, за исключением реологических (вязко-пластичных), относительно хорошо изучены. Однако применительно к структурам конкретных рудных полей и месторождений они еще нуждаются в более глубоком познании их влияния и взаимодействия при разном механизме деформаций. Известно, что физико-механические свойства пород зависят от их структуры и текстуры, минерального состава и термодинамических условий существования.

Теория зависимости этих свойств от природы твердых, в том числе минеральных веществ, была представлена академиком П. А. Ребиндером [89], который все многообразие пород по их структурам и происхождению представил в следующих четырех группах: 1) плотные

кристаллизационные, 2) рыхлые кристаллизационные, 3) конденсационные и 4) коагуляционные.

В первую группу им отнесены магматические породы, механические свойства которых определяются свойствами отдельных минеральных компонентов, их размерами и условиями срастания, специфической текстурой и малой пористостью. Повышение дисперсионности компонентов приводит к переходу интрузивных зернисто-кристаллических пород в криптокристаллические и стекловидные образования эффузивов, которые являются уже упруго-хрупкими телами.

Ко второй группе относятся кристаллически-зернистые мономинеральные осадочные породы с пониженной из-за пористости прочностью и повышенной способностью к перекристаллизации. В минералогическом отношении такие породы представлены карбонатами, сульфатами и хлоридами.

В третью группу им отнесены осадочные породы, сцементированные аморфным или частично закристаллизованным кремнеземом (первично — студень кремневой кислоты как типичный пространственный полимер). Эти породы при достаточном увлажнении и повышенной температуре восстанавливают высокоэластичные свойства и, по-видимому, к ним могут быть отнесены некоторые песчаники с кремневым цементом и другие кремнистые породы вплоть до опок.

В четвертую группу этим ученым были отнесены породы, образованные высокодисперсными частицами, осаждавшимися в водной среде. Прочность пород с удалением воды повышается, но при ее наличии в порах такие породы обладают высокопластичными (вплоть до ползучести) свойствами. В эту группу входят все глинистые породы, включая песчаники с глинистым цементом.

П. А. Ребиндер [89] особо подчеркивает зависимость структурно-механических свойств пород от их увлажнения «как водой, так и водными растворами электролитов с учетом равновесного состава водной среды в порах».

Нужно отметить, что это важное обстоятельство, подчеркивающее влияние растворов на физико-механические свойства геологической среды, пока не учитывается геологами при изучении особенностей внутрирудных нарушений вмещающих месторождения пород.

Их изменения под воздействием минералообразующих растворов (хлоритизация, серицитизация, окварцевание и др.) через изменения пористости и пластичности еще более отражаются на тектонофизических свойствах геологической среды и на механизме ее преобразований.

При геологическом изучении месторождений и их структур как конечного результата деформации и разрушения пород генетический подход должен выражаться не только в выяснении конкретных причин возникновения этих структур, но и, по возможности, в реставрации былых термодинамических и гидродинамических условий, существовавших на месте глубинного рудообразования во время формирования того или иного месторождения.

Физико-механические особенности, в том числе ионно-адсорбционное влияние рудообразующей среды на прочностные свойства пропитанных растворами пород, являются наиболее слабо изученным фактором внутрирудного тектонического структурообразования.

В приведенном четырехчленном подразделении горных пород по структурно-механическим свойствам геологам трудно согласиться с объединением в первой группе плутонических и вулканических образований, чрезвычайно различных по структуре, текстуре и условиям залегания.

Именно поэтому вслед за А. В. Королевым и П. А. Шехтманом нами принято пятичленное подразделение пород по физическим и хи-

мическим свойствам, решительно влияющим на образование структур месторождений (см. табл. 2). Названные ученые выделили: 1) карбонатные породы, 2) сланцевые породы, 3) песчаники и конгломераты, 4) эффузивные породы, 5) интрузивные породы, 6) сложные литологические комплексы. Последняя группа, конечно, не характеризует индивидуальных свойств пород, а представляет только самые разнообразные сочетания первых пяти групп.

Как видно, из этой систематики выпали сульфатные породы и галолиты, которые почти никогда не бывают рудовмещающими для эндогенных образований. При участии в деформациях они по физико-химическим свойствам близки к карбонатным породам первой группы.

Положение вулканокластических пород (пирокласты) в этой систематике также остается недостаточно ясным, однако по фильтрационным, теплофизическим, физико-химическим и тектонофизическим свойствам они близки ко многим разновидностям пород третьей группы, где нами и учитываются.

Отличия этих свойств пирокластов от эффузивных пород слишком велики для того, чтобы можно было допустить их объединение друг с другом, хотя благодаря сходству генезиса они залегают обычно в совместном комплексе.

Из тектонофизических свойств пород в классификационной таблице нами учитываются следующие: степень анизотропии, прочностные свойства (на сжатие и разрыв), несущие свойства при изгибе. Очень большое значение имеют учет и изучение реологических свойств горных пород, радикально влияющих на характер тектонических и атектонических деформаций и нарушений сплошности горных пород.

К этим свойствам (как и во всех случаях проявлений дихотомии и единства противоположностей) относятся в данном случае хрупкость и пластичность (ползучесть и текучесть в твердом состоянии) компонентов геологической среды. Реологические свойства пород обязательно следует не только учитывать, но и тщательно изучать.

Все эти широко известные тектонофизические (физико-механические) свойства горных пород, зависящие от их минералого-петрографических и текстурно-структурных особенностей, кажется, не нуждаются в точных определениях, которые мы представили ранее.

К большому сожалению, при изучении структур рудных полей и отдельных месторождений эти свойства рудовместивших пород, так же как и сами рудообразующие растворы, в большой мере только «подразумеваются», но не подвергаются специальным исследованиям. Поэтому для создания будущей теории рудообразования оказалось необходимым хотя бы в самом общем виде заострить внимание исследователей-геологов на появившихся сейчас возможностях точного изучения свойств как геологической, так и рудообразующей среды.

Относительные характеристики тектонофизических и реологических свойств, пока без выявления у них размерных параметров, сведены нами по пяти группам в общей систематике (см. табл. 2).

Однако следует иметь в виду, что в природных условиях больших или меньших глубин при разных термодинамических параметрах геолого-химических процессов эти свойства существенно изменяются, и реставрация действительных их значений при рудоструктурообразовании встречается со значительными трудностями.

В дополнение к сказанному уместно привести опубликованную Р. Фарминым полезную для первой ориентировки сводную таблицу, характеризующую взаимосвязи между типами деформаций и тектонического разрушения пород и условными величинами статической нагрузки на геологическую среду в условиях разных глубин земной коры (см. табл. 3).

В заключение расмотрения тектонофизических свойств горных по-

Таблица 3

**Типы деформаций в геологической среде при разной нагрузке (по Р. Фармину)**

| Зона статической нагрузки | Типы деформаций | Характеристика структур | Соотношение типов движения |
|---|---|---|---|
| Легкая | Расщепленные полости разрыва | Открытые трещины | 99% растяжения |
| | | Трещины с шелушащимися стенками | 1% скола |
| | | Образование черепитчатого щебня в них | |
| | Брекчирование | Грубая не сцементированная брекчия | 50% растяжения |
| | | Смешанная плотная брекчия | 50% скола |
| | | Песчанистая грануляция | |
| | | Смешанная брекчия и глинка | |
| Средняя | » | Уплотненные брекчии и глинка | |
| | Раздробление и истирание | Образование зон тектонических глинок (без брекчии) | |
| | | Глинки различной мощности, сопровождающиеся рассланцеванием пород | 1% растяжения 99% сжатия |
| | | Сжатые развальцованные тектонические глинки | |
| Большая | Скольжение | Проскальзывание и складки волочения без глинки | |
| | » | Проскальзывание без складок волочения | — |
| | » | Трещины кливажа | |
| | | Кливаж течения и гнейсоидные деформации | |
| Зона «перегрузки» | Пластическое течение | Течение без образования отдельности | Растяжения нет |

род отметим, что в советской геологии под руководством В. В. Белоусова сформировалось новое перспективное направление тектонофизического анализа связных и разрывных деформаций горных пород, подкрепляющееся лабораторным моделированием тектонических явлений. Наибольшее теоретическое и практическое значение в этой проблеме имеют очень обстоятельные работы М. В. Гзовского [24], наличие которых позволяет нам ограничиться здесь лишь самыми краткими сведениями из этой области знаний.

В табл. 2 впервые комплексно систематизируются главнейшие физические и химические свойства геологической среды. Она, конечно, нуждается в более развернутых пояснениях, однако объем книги не позволяет это сделать, и мы ограничились лишь минимумом сведений и основных понятий в этой важной области познания свойств пород.

## Глава 7

# ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА ФОРМИРОВАНИЯ ЭНДОГЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Элементы геологической структуры и структура в целом не являются, собственно, прямыми или косвенными указателями возможных глубинных рудных тел. Но изучение геологической структуры в сочетании с исследованием других признаков глубинного оруденения позволяет, во-первых, оценить степень ее благоприятности для возможного выявления невскрытых залежей, а, во-вторых, наметить участки структуры, в пределах которых на глубине имеется больше шансов на вскрытие слепых рудных тел.

*В. И. Смирнов*, «Советская геология», 1955, № 49

### *Месторождения в геологическом аспекте*

Рассмотренные в предыдущей главе разнообразные свойства геологической среды в очень большой мере влияют на ход эндогенного рудообразования. Однако при всестороннем генетическом изучении месторождений приходится учитывать не только эти свойства, но и степень нарушенности рудовмещающих пород, существовавшую в геологическом прошлом при проявлении процессов оруденения.

Ранее этот вопрос был рассмотрен нами только в отношении мелкой трещиноватости в связи с проницаемостью пород для рудообразующей среды. Ее проникновение в участок локализации оруденения и распределение в нем очень часто контролируется крупными разрывными или связными «рудопроводящими» макроструктурами земной коры, чаще всего тектоногенными или магмогенными, создающими иногда большое разнообразие в геологической ситуации.

*Геологическая обстановка* рудообразования, таким образом, включает в себя не только геологическую среду со всеми ее свойствами, но и разные макроструктуры, возникавшие в породах сингенетически (слоистость) или же чаще эпигенетически (складки, разрывы).

В связи с тем, что наша работа нацелена на раскрытие возможности всесторонних исследований эндогенных рудных месторождений металлов и неметаллов с обязательным учетом среды рудообразования, в настоящем вводном ее разделе представляется желательным перед рассмотрением большого генетического разнообразия структур локализации представить содержание ряда понятий, которыми придется широко оперировать, особенно во втором томе книги.

Изучению и описанию *месторождений* и их *структур* посвящена многочисленная литература. Однако в ней часто мы не находим четких градаций, связанных с масштабом скоплений полезных ископаемых, а главное с однозначным определением ряда важных рудогенетических понятий. Это связано с очень большим разнообразием видов эндогенного минерального сырья и очень широким диапазоном условий их образования, еще недостаточно осмысленным в единой системе закономерностей развития земной коры и ее поверхности.

Этимология слова «месторождение» совпадает с понятием *места рождения* полезных ископаемых, а обычное смысловое содержание этого термина оказывается значительно более широким и распространяется, например, на *россыпи* или на *месторождения* нефти и газа.

Д. И. Щербаков, рассматривая этот вопрос, отметил, что месторождением называется одно или несколько близко расположенных друг к другу рудных тел, объединяемых генетическим единством условий образования. Но так как понятие «месторождение» недостаточно подчеркивает структурные особенности локализации рудных тел, которым в

настоящее время придают решающее значение, то с ним стал конкурировать новый термин — «рудное поле», частично вытеснивший старый термин [125].

Следует отметить, что новый термин чаще всего применяется не как синоним старого, а в более общем смысле как *совокупность месторождений,* связанных общностью происхождения на относительно обширной территории, а изредка даже и как часть месторождения. Вряд ли следует без особой на то надобности отходить от терминов, унаследованных из прошлого науки и глубоко укоренившихся в практическом обиходе. Просто нужно придать им более четкое определение на новом уровне понимания.

Лучшее в литературе определение понятия «месторождение» было недавно представлено В. И. Смирновым в следующем кратком виде: месторождением полезного ископаемого называется участок земной коры, в котором в результате тех или иных геологических процессов произошло накопление минерального вещества, по количеству, качеству и условиям залегания пригодного для промышленного использования [101].

В несколько более развернутом виде под месторождением следует понимать одно или несколько природных тел (залежей) моно- или поликомпонентных полезных ископаемых, образовавшихся в земной коре или на ее поверхности и характеризующихся единством местонахождения, генезиса и структуры локализации. Месторождение должно содержать минеральные вещества, в количественном и качественном отношении и по условиям залегания отвечающие экономически рациональному извлечению и использованию их при существующем уровне техники.

Для объединения месторождений в родственные территориальные *семейства* нам кажется вполне применимым и термин «рудное поле» в понимании и определении В. И. Смирнова (1965). Рудное поле представляет собой группу месторождений, объединяемых общностью происхождения и единством геологической структуры [101]. Такие поля генетически и территориально связаны с крупной тектонической или комбинированной структурой, с единым плутоном или вулканом, с родственными структурами выветривания или седиментации.

Обратимся теперь к рассмотрению элементарных скоплений полезных ископаемых в земной коре и на ее поверхности и их определению.

Рудные тела или залежи, являясь составной частью месторождений, характеризуются местной непрерывностью распространения полезных ископаемых, общностью формы и содержания, определенных единым генезисом и локализаторами минерального накопления, а также характером взаимодействия растворов с окружающими породами.

Форма тел (залежей) полезных ископаемых очень разнообразна, но в общем может быть примерно изометрической, линзообразной, плитообразной, трубообразной или комбинированной, неправильной.

В. И. Смирнов для рудных месторождений показал необходимость учета и выделения при поисково-разведочных работах наименьших по размерам, но наиболее продуктивных элементарных скоплений полезных ископаемых, возникающих несколько обособленно в пределах самих рудных тел и залежей полезных ископаемых. Такие мелкие аккумуляторы гидротермального оруденения он удачно назвал «рудными капканами», а скопления полезных ископаемых в них гнездами [99, стр. 25—26].

В общей градуировке локальных скоплений минеральных веществ в пределах тел и залежей твердых эндогенных ископаемых такому макроскопически самому малому, но очень важному структурно-генетическому элементу тел можно дать следующее определение: гнездо

минерального ископаемого на рудных месторождениях представляет собой наиболее обогащенный полезными компонентами элементарный участок тел и залежей, возникший в них в особо благоприятной структуре локализации того или иного происхождения.

Можно привести много примеров *гнездовой локализации* металлических и неметаллических полезных ископаемых. К ним, например, можно отнести кварцево-золотоносные скопления в «лестничных жилах», рудные столбы, шлиры магматических залежей, экзогенные карманообразные накопления железных, марганцевых и бокситовых руд в закарстованных горизонтах и т. п.

Среди неметаллов наиболее наглядными для иллюстрации этого понятия могут оказаться гнезда хрусталеносных кварцевых жил, частные скопления агата или исландского шпата в залежах пузырчатых и шаровых эффузивов, кристаллоносные погреба и «занорыши» в телах многокамерных пегматитов и т. п. Нужно отметить, что для месторождений пьезооптического кристаллосырья отыскание гнезд минерализации является главной задачей детальных поисковых и разведочно-эксплуатационных работ.

Для охарактеризованных понятий «рудное поле», «месторождение», «тело (залежь)» и «гнездо» первостепенное значение на фоне того или иного рудогенетического процесса без преувеличения принадлежит структурам локализации, генетическое разнообразие которых мы попытаемся рассмотреть.

Более крупные родственные объединения полезных ископаемых по территориям, имеющим общее геологическое строение и географо-экономическое значение, являются важнейшими объектами исследований региональной геохимии, металлогении и экономической геологии. Эти объединения требуют более широкого регионального анализа, чем конкретные структуры локализации, анализа, непосредственно связанного с общими закономерностями развития земной коры и даже экономическими сочетаниями разных природных факторов.

В частности, А. Е. Ферсманом и В. И. Коганом [111] выделяются геохимические узлы сосредоточения определенных типов полезных ископаемых, источников энергии и других природных экономических факторов, в совокупности приводящих к развитию промышленных узлов с особыми отраслями производства.

В металлогенических эндогенно-рудных поясах и провинциях, характеризующихся общностью геологического строения и тектономагматического развития, образуются однородные промышленно-генетические типы месторождений разнообразных полезных ископаемых, закономерности пространственного распределения которых пока связываются в основном только с особенностями тектоники и магматизма соответствующих обширных территорий.

В железо- и марганцеворудных, бокситоносных, фосфоритоносных, нефтегазоносных, угленосных и других провинциях и поясах выделяются бассейны и районы закономерного развития осадочных полезных ископаемых, рассмотрение которых выходит за пределы задач, поставленных в нашей книге.

Выделяются также провинции и бассейны минерализованных и пресных, холодных и горячих вод, также закономерно размещающиеся в региональных структурах земной коры, в пределах платформ, складчатых и переходных между ними областей.

Закономерностям регионального распространения металлических, неметаллических, горючих и гидроминеральных ресурсов земной коры посвящено очень много работ наших и зарубежных ученых, обеспечивающих металлогеническое, литоминералогическое, каустогеологическое, гидрогеологическое и другое районирование, дающее общее рациональное направление в изучении богатств недр Земли.

### *Структуры месторождений и их разграничение по времени образования*

Определение такого важного понятия, как «структура месторождения», впервые появилось в монографии В. М. Крейтера применительно к эндогенным месторождениям в следующем виде: «Под структурой эндогенных месторождений понимается совокупность структурных элементов, определяющих форму месторождения и влияющих на его локализацию» [63, стр. 145]. А. В. Пэк, Ф. И. Вольфсон и Л. Н. Лукин дополнили это определение, указав, что «такими элементами являются пликативные и дизъюнктивные нарушения, слоистость, сланцеватость, а также особенности пород и руд, зависящие от их состава и физико-механических свойств, и прежде всего их пористость, упругие свойства и др.» [88, стр. 5].

Для рудных месторождений компактная формулировка была представлена Я. Н. Белевцевым. «Под структурой месторождения следует понимать сочетание таких структурных форм в породах, которые в историческом аспекте определили размещение, условия залегания и морфологию рудных залежей» [3, стр. 208].

Для месторождений всех полезных ископаемых нами было дано следующее общее определение этого важного понятия: «Структура месторождения — это геологическое строение участка земной коры, содержащего тела полезных ископаемых. Она исторически возникает в результате взаимодействия геолого-тектонических явлений с процессами концентрации и изменения минеральных веществ» [35, стр. 65—66].

По-видимому, это синтетическое определение, лишь схематически отражающее всю сложность природы накопления и изменения ископаемых в структурах локализации, можно пока сохранить.

При аналитическом рассмотрении структур любого месторождения необходимо различать ее первичные — сингенетические и вторичные — эпигенетические элементы. Именно в совокупности тех и других предстают перед нами *строение — структура* и *содержание — минерализация* каждого месторождения в его современном виде.

*Дорудные элементы структуры*, определившие первоначальные место и форму локальных скоплений полезных ископаемых, заблаговременно были подготовлены геологическим развитием данного участка земной коры.

*Внутрирудные элементы структуры* являются результатом унаследованного развития деформаций или могли возникать в зависимости от нового геологического процесса, синхронного минерализации месторождения.

*Послерудные элементы структуры* представляют собой нарушения ранее образованных структур и разместившихся в них залежей полезных ископаемых, к образованию которых они уже не имеют отношения.

Эти возрастные разграничения структурных элементов очень важны, в особенности для эманационных месторождений многостадийного образования или тем более для полигенных пневматолитово-гидротермальных месторождений, образовавшихся в единый период минерализации, но в несколько этапов и стадий, разделенных тектоническими подвижками (см. главу 8).

Однако даже на простых моногенных гидротермальных месторождениях (Садон, Згид и др.) выявляются пять и более стадий минерализации, а на полигенных, типа месторождения Тырны-Ауз, до 12 стадий.

В результате проявления каждой фазы внутрирудных подвижек в минеральных образованиях предыдущей стадии возникает макро- и микротрещиноватость.

В макротрещинах и иных пустотах образуются жилы, прожилки и гнезда новых минералов, а в микротрещинах происходит сингенетическое залечивание их, сопровождающееся образованием вторичных включений растворов, по физико-химическим параметрам отличных от включений предыдущей и последующей стадий минерализации.

Короче говоря, природа сохранила нам разные возможности для тонких структурно-генетических исследований месторождений, предоставив даже возможность исследований с использованием включений рудообразующих растворов (см. II раздел).

Однако следует отметить существенную трудность и условность возрастных разграничений структурных элементов на месторождении, возникающих в результате действия ювенильных растворов. Для иллюстрации этого возьмем в качестве примера обычное гидротермальное месторождение, сформировавшееся в три стадии минерализации.

Внутрирудные тектонические нарушения, прошедшие после первой стадии, будут для ее минеральных продуктов послерудными, а для продуктов второй стадии, конечно, дорудными. Нарушения-локализаторы минералов третьей стадии будут послерудными для первой и второй стадий и дорудными для третьей стадии минерализации.

Как видно, все внутрирудные деформации являются *вторичными* по отношению к дорудной структуре в целом, но в то же время они имеют *первичное значение* для процесса накопления полезных веществ.

Таким образом, внутрирудные структуры в координате времени формирования месторождения являются *первично-вторичными* структурами локализации.

Структурный анализ в телах и гнездах месторождений осложняется и метасоматирующим действием самих растворов или выщелачиванием и переотложением ими минеральных веществ, еще более затушевывающими картину взаимоотношений внутрирудных структур. Иногда путем опережающего растворения даже сами гидротермы могут обеспечивать себе благоприятную внутрирудную структурную обстановку гидротермально-альпийской минерализации, что особенно характерно для месторождений пьезооптического кристаллосырья и регенерированных месторождений.

Учитывая эти и другие трудности, мы для поисково-разведочных целей объединяем все сингенетические структурные элементы эманационных месторождений, дорудные и внутрирудные, совпадающие во времени и пространстве с накоплением полезных ископаемых и контролирующие минерализацию, в единую группу *структур локализации* [37].

Эпигенетические структуры, связанные главным образом с позднегектоническими и экзогенными преобразованиями элементов первичной локализации месторождений полезных ископаемых, можно выделять под названием *структур трансформации.* Последние структуры в сочетании со структурами локализации также имеют важное значение для направления детальных поисковых, разведочных и эксплуатационных работ.

Структуры трансформации особенно характерны для складчатых областей с длительным режимом тектонических движений. Однако консолидированные в них монолитные участки, например, занятые плутонами или вулканическими некками, плохо поддаются внешним тектоническим трансформациям. Структуры локализации в интрузивных магматических телах часто представляют и современное строение месторождений. Понятия структуры месторождения и структуры его локализации очень часто совпадают и на месторождениях, располагающихся в пределах древних щитов, плит и платформ.

Так как настоящая глава посвящена в основном структурам локализации, в дополнение к уже сказанному требуется дать определе-

ние этого важного понятия, хотя бы в самом общем виде. *Структура локализации — это благоприятный для формирования рудного поля, месторождения и его тел и гнезд участок земной коры или ее поверхности, подготовленный заблаговременно или синхронно для накопления полезных минеральных веществ при последующем развитии геологических процессов и явлений.*

Такие структурные места рождения или вторичной аккумуляции полезных ископаемых подготавливаются в природе разными процессами, развивающимися в зависимости от геологической или физико-географической обстановки их проявления.

На структуры локализации и эндогенно осложненные *вторичные* структуры месторождений в условиях поверхности земли иногда накладываются новые, поздневторичные, структуры, связанные с экзодинамикой, чаще всего с выветриванием руд и вмещающих их пород. В ряде случаев именно эти структуры, фиксирующие результат экзогенной дифференциации вещества, например, в виде шляпы окисления или зоны вторичных сульфидов, имеют решающее значение для пространственной локализации полезных компонентов и практического использования того или иного месторождения. Примеры этого многочисленны и здесь можно напомнить только о меднорудном месторождении Коунрад, имеющем сложную комплексную структуру.

Таким образом, в группе различных структур трансформации месторождений можно выделить два класса: структуры *вторичные,* чаще всего тектонические, и *поздневторичные* — экзодинамические, чаще связанные с выветриванием и реже с оседаниями над выщелоченными участками руд. Предлагается следующее разграничение структур по относительному времени их формирования.

| *Структуры локализации* | *Структуры трансформации* |
|---|---|
| Первичные (дорудные) | Вторичные (эндодинамические) |
| Первично-вторичные (внутрирудные) | Поздневторичные (экзодинамические) |

Несмотря на все многообразие природных процессов и явлений и трудности определения результатов их влияния на развитие структур месторождений, посредством анализа структур локализации и трансформации в их исторической преемственности раскрывается синтетический геологический образ каждого данного месторождения в целом.

### *Пространственное разграничение эндогенных структур локализации, их генезис и принципы классификации*

Строение земной коры исторически сложилось для разных ее участков неодинаковым и неоднородность ее развития усиливалась в каждом последующем геологическом периоде. Различные крупные сегменты земной коры, уже консолидированные или еще подвижные, или переходные между ними, по-разному реагировали на эндогенные преобразования в перисфере Земли.

Из-за различий в общей геологической или физико-географической обстановке процессов формирования структур локализации последние приобретали свои особенности в разнопостроенных регионах земной коры или ее поверхности или имели общее сходство в пределах этих регионов. Фактор такого сходства и различий требует хотя бы самых общих разграничений структур локализации по территориям и глубинам образования на закономерные пространственно-генетические группы, которые отражали бы также и степень региональной подчиненности или автономии локальных структур месторождений.

Естественная классификация, представляющая собой один из очень важных научных методов выявления природных закономерностей

их взаимосвязей и опосредствования, требует в каждой сфере объектов, процессов и явлений достаточно полной их изученности. Такая генетическая классификация должна базироваться на анализе множества разнородных факторов и синтезировать их до логических обобщений. Последние в свою очередь направляют практику дальнейшего углубленного изучения этих факторов на более высоком уровне их понимания и обеспечивают развитие теории, раскрывающей существо процессов в том или ином аспекте познания особенностей движения материи.

Почти все без исключения параметры физического состояния горных пород оказывают большее или меньшее влияние на характер их связных или разрывных деформаций. Последние осуществляются под влиянием генетически не вполне ясных, а в общем механических (тектонических) перемещений минеральных масс или реже под воздействием генетически определенных магмогенных процессов.

При одинаковом фиксированном в породах механизме деформаций генезис последних может быть различным. Применительно к структурам локализации рудных тел и месторождений термин «тектоническая деформация» недостаточно отражает их генетическую сущность, но остается удовлетворительным при рассмотрении строения крупных площадей и объемов земной коры.

Поэтому бытующее объяснение генезиса почти всех деформаций на рудных полях и месторождениях собственно тектоническими причинами давно уже требует существенных коррективов.

В местах проявления интрузивной, вулканической и эманационной деятельности при изучении месторождений всегда надо учитывать возможности контроля оруденения зонами (участками) трещиноватости и разрывами, не подчиненными общему тектоническому плану, а связанными с динамикой самих магмогенных процессов.

Например, происхождение жиловмещающих трещин и штокверковой трещиноватости может быть очень различно, и выявлять эти генетические различия для теории и практики отнюдь не менее важно, чем применять представление об эллипсоиде деформации. Происхождение штокверков может быть связано с контракционно-плутонической трещиноватостью или с трещиноватостью взрывов и встряхивания при извержениях вулканов, или даже с внутриминерализационными обрушениями, увеличениями или уменьшениями объемов горных пород и руд в результате действия метаморфизующих растворов.

При одинаковом или почти одинаковом механизме проявления дислокаций и разрушения сплошности пород первопричины их вызвавшие, как видно, могут быть самыми разнообразными или, наоборот, при морфологическом разнообразии такие деформации могут иметь сходное или одинаковое происхождение. Эти черты сходства и различия в нарушениях пород в большой мере зависят от комбинации места (региона) и процесса, стимулировавшего их возникновение и использование для локализации полезных ископаемых.

Генетический подход при изучении структур локализации рудных залежей не должен тушироваться эпитетом «тектоническая» трещина, штокверк и т. п. и тем более подменяться тем или иным определением механизма структурообразования (трещины скола или отрыва).

Более 80% опубликованных работ по структурам рудных полей и месторождений оказываются лишенными генетической сущности, так как действительно «тектоника» является всеобъемлющим термином, касающимся всех форм нарушений горных пород, но *не причин* (т. е. генезиса) таких нарушений.

В прямой зависимости от очень различных причин находятся, например, площадное развитие трещиноватости в породах и возможные пределы распространения этой трещиноватости на глубину. Если те

или иные трещины, не важно какого простирания и падения, «секущие», «согласные» и т. п. служили проводниками минералообразующих сред и концентраторами руды, мы без каких-либо научных раздумий правильно зафиксируем их положение в пространстве с помощью горного компаса.

Однако для оценки масштаба месторождений и тем более для практических прогнозов распространения эндогенного оруденения, очень важна не только формальная фиксация пространственного положения трещин, но и *дешифрирование их генезиса.*

К сожалению, именно на эту сторону вопроса геологи обращают еще недостаточное внимание, забывая, как уже отмечалось, что термин «тектоника» применительно к вопросам конкретной локализации оруденения (месторождения или рудного тела) имеет часто генетически неопределенное значение.

Генетическое разнообразие и развитие структур месторождений во времени и пространстве еще не нашло достаточного для теории и практики отражения в литературе. Между тем общие руководства по структурной геологии и петрологии Г. Д. Ажгирея [1], В. В. Белоусова [4], Н. А. Елисеева [29], А. В. Пэка [87], М. А. Усова [108], В. Е. Хаина [114] и ряда других отечественных и зарубежных ученых, а также большие успехи в изучении структур месторождений самых разнообразных полезных ископаемых позволяют представить разнообразие этих структур на широкой генетической основе.

Успешные начинания в этом отношении для эндогенных месторождений у нас были сделаны А. В. Королевым [56], В. М. Крейтером [63] и В. И. Смирновым [100], которые, уделяя в своих классификациях наибольшее внимание собственно тектоническим рудоконтролирующим деформациям, все же считают необходимым для поисковых целей выяснять не только механизм их возникновения, но и генетические причины, обусловившие действие этого механизма. В разных пределах ими учитываются, например, вулканические извержения, процессы формирования интрузивов, структурообразование в их контактах, структуры растворения и минерализационного обрушения, структуры наслоения осадочных толщ и т. п.

В развитие такого плодотворного подхода нами в 1962 г. была сделана попытка представить первую общую систематику структур локализации полезных ископаемых для эндогенных месторождений (табл. 4). В этой систематике по нисходящим ступеням анализа проведено их разделение на две категории (А—Б), шесть групп, 16 классов и 50 типов структур разнообразного происхождения.

Разделение на генетические категории проведено по главным процессам, вызывающим деформации земной коры и рельефа ее поверхности.

При расчленении на группы (I—VI) учитывается специфика развития этих процессов в пространстве, в геологически различной обстановке образования полезных ископаемых.

Разделение на классы основано на конкретном различии генезиса и места образования структур локализации разного масштаба.

Выделение элементарных типов структур локализации, объединяющихся по родству в пределах каждого класса, осуществлено по различиям в способе (механизме) их образования, по форме проявления и значению их в рудообразовании.

Элементарные типы структур локализации часто встречаются в комбинациях друг с другом. В сложных месторождениях могут быть сочетания различных классов и реже категорий структур или их элементарных представителей. Естественно, что такие комбинированные структуры не введены в систематику, но должны учитываться при изучении конкретных месторождений и направлении их поисков.

Таблица 4

**Эндогенные структуры локализации полезных ископаемых**

| Категория А. Тектогенные | Категория Б. Магмогенные |
|---|---|
| Группа I. *Платформенные*<br>Класс 1. Крупные связные<br>1) Сводов и плакантиклиналей<br>2) Валов и флексур<br>3) Прогибов и плаксинклиналей<br>4) Гомосинклиналей<br>Класс 2. Разрывные<br>5) Крупных разломов<br>6) Локальных разрывов растяжения | Группа IV. Интраплутонические<br>Класс 9. Первичной анатомии интрузивов<br>25) Кристаллизационной полосчатости и течений<br>26) Ликвационного расслоения<br>27) Роевых структур остаточной кристаллизации<br>28) Многофазовых оседаний и внедрений<br>Класс 10. Эндокинетической трещиноватости<br>29) Сводовых трещин отслоения<br>30) Радиальных трещин растяжения и усадки<br>31) Апикально-контракционной трещиноватости<br>32) Эндотрещиноватости сжатых «лестничных» даек<br>Класс 11. Приконтактовых деформаций<br>33) Синингрузивных контактов проплавления<br>34) Краевой усадки и трещиноватости сколов<br>35) Экзоконтактовых нарушений |
| Группа II. *Геосинклинальные*<br>Класс 3. Разрывные крупных амплитуд<br>7) Разломов (раздвигов) и сбросов<br>8) Надвигов (взбросов) и сдвигов<br>9) Разрывов оперения и эшелонирования<br>Класс 4. Структуры зон сдавливания и раздробления<br>10) Линейно-локального рассланцевания и разлинзования<br>11) Брекчирования и мелкой трещиноватости штокверков<br>Класс 5. Локальные линейно-складчатые<br>12) Отслоения в шарнирах и периклинальных окончаниях<br>13) Срывов в крыльях и межпластового дробления<br>14) Дисгармоничной складчатости и кливажа<br>15) Замыкания моноклиналей<br>Класс 6. Локальные трещинные<br>16) Сжатия и сколов (срезания)<br>17) Растяжения и разрывов (отрывов)<br>18) Скручивания (изгиба) и разверзания | Группа V. *Интравулканические*<br>Класс 12. Стратовулканические<br>36) Потоков и пирокластической седиментации<br>37) Пузырчатости и отдельности эффузивов<br>Класс 13. Экструзивные внутрижерловые<br>38) Трубок взрыва и жерловых интрузий<br>39) Брекчий прорыва<br>40) Усадочных периферийных и внутренних рызрывов<br>Класс 14. Эксплозивные внежерловые<br>41) Криволинейных трещин взрывов<br>42) «Штокверковой» трещиноватости встряхивания<br>43) Кольцевых трещин оседания и дугообразных даек<br>44) Трещин блоковых перемещений |
| Группа III. *Промежуточные* (переходные)<br>Класс 7. Прерывисто-складчатые<br>19) Брахиантиклиналей и куполов<br>20) Блокированных складок<br>21) Брахисинклиналей и мульд | Группа VI. Перимагматические<br>Класс 15. Автоструктуры первичной минерализации<br>45) Дилятационной и контракционной трещиноватости<br>46) Гидротермального карста и «трубпродушин»<br>47) Арочного отслоения и оседания<br>48) Минерализационного обрушения |

Продолжение табл. 4

| Категория А. Тектогенные | Категория Б. Магмогенные |
|---|---|
| Класс 8. Складчато-разрывные<br>22) Горст-антиклиналей<br>23) Грабен-синклиналей<br>24) Блоковых структур «разбитой тарелки» | Класс 16. Гидротермально-унаследованные стратоструктуры<br>49) Благоприятных горизонтов замещения<br>50) Непроницаемых перекрытий — экранирования |

Две промежуточные группы метаморфогенных и диагенетических образований полезных ископаемых не имеют «собственных» структур локализации, так как первично их накопления возникали и изменялись экзогенным или магмогенным путем.

Структуры локализации полезных ископаемых по происхождению должны быть подразделены на четыре генетические категории: *тектоногенные, магмогенные, экзогенные* и *биогенные*, из которых две последние почти не имеют значения для эндогенного рудообразования и поэтому здесь не рассматриваются.

В связи с тем, что через понимание значения структур локализации в большой мере осуществляется увязка генезиса месторождений с закономерностями геологического строения, раскрытие этих структур очень важно для практических поисково-разведочных целей. Генезис месторождений и происхождение структур их локализации обычно различны, но имеются случаи неразрывного единства, на которые мы обращали внимание при рассмотрении трещиноватости пород.

### *А. Тектоногенные структуры*

Тектоногенные структуры локализации возникают в связи с гравитационно-механическими перемещениями минеральных масс горных пород, развивающимися чаще всего в осадочной оболочке Земли. Первопричины проявления этой механической геоформы движения материи еще далеко недостаточно выяснены, так же как в большой мере остаются неясными и сама природа гравитации, и превращения подкорового вещества мантии, с которыми обычно связывают тектонические процессы.

С точки зрения механики и учения о сопротивлении материалов основные различия в деформациях сводятся к нарушениям или сохранению сплошности вещества, подвергающегося действию сил сжатия при растяжении или разнонаправленных сил. Поэтому проведенное В. В. Белоусовым (4) подразделение тектоногенных структур на *линейно-складчатые* (связные), *разрывные, складчато-разрывные и прерывисто-складчатые* структуры остается важным не только для собственно тектонических структур месторождений, но и для структур другого происхождения, связанных, например, с плутонической и вулканической деятельностью или даже с экзодинамикой.

Для складчатых геосинклинальных областей, которые являются главной ареной интрузивной и перимагматической деятельности ювенильных флюидов, характерны четкие линейно-складчатые и разрывные структуры, связанные с латеральными механическими перемещениями масс осадочных горных пород, а также структурные «оперения» этих перемещений, структуры сложных тектонических зон сдавливания, рассланцевания и разлинзования пород или их раздробления, брекчирования и развития штокверковой трещиноватости.

В этой группе тектонических нарушений в качестве локализаторов минеральных продуктов эманационной деятельности очень важное значение имеют хорошо изученные локальные трещинные структуры сколов, разрывов и скручивания, а также линейно-складчатые структуры. Эти структуры локализации очень важной группы эманационных месторождений в геосинклинальных областях закономерно «вписываются» в общий план тектонических деформаций рудных провинций и поясов, образующихся в подвижных зонах земной коры.

Крупные связные структуры в чехле платформенных областей в большой мере зависят от вертикальных перемещений глыб кристаллического фундамента или его прарельефа. При этом в многоэтажной структуре платформ и плит развиваются очень пологие сводовые поднятия и прогибы, связанные с вертикальным выпучиванием или опусканием кристаллического фундамента. Своды и плакантиклинали, валы и флексуры, гомоклинали широко используются в качестве нефтегазовых аккумуляторов, а прогибы и плаксинклинали для сингенетических накоплений ряда осадочных неметаллических ископаемых.

Разрывные структуры на платформах в виде сбросов и других разломов являлись проводниками эманаций разного происхождения или служили вместилищами для накопления их продуктов.

В промежуточных, «краевых», платформенно-геосинклинальных областях и регионах развития глыбовой тектоники на фоне общих поднятий или прогибов долгоживущих зон разломов и смятия развиваются своеобразные частные структуры локализации: прерывисто-складчатые в виде брахискладок, блокированных складок, куполов и мульд и складчато-разрывные структуры в виде горст-антиклиналей, грабен-синклиналей, блоковых структур «разбитой тарелки» и т. п.

Таким образом, среди частных структур локализации полезных ископаемых, подчиненных региональному тектоническому плану, отчетливо выделяются платформенные, геосинклинальные и промежуточные структуры.

Самые крупные «долгоживущие» структуры (глубинные разломы, краевые и внутригеосинклинальные прогибы, антеклизы и синеклизы, антиклинории и синклинории), имеющие большое значение для регионального контроля месторождений ископаемых в металлогенических поясах, рудных провинциях и бассейнах, в нашу систематику не включаются. Среди категории тектоногенных структур локализации месторождений на платформах, в геосинклинальных и переходных областях нами выделяются девять классов структур (см. табл. 4).

## Б. Магмогенные структуры

В складчатых зонах и молодых платформах на фоне доминирующего развития подчиненных региональному плану деформаций тектонических структур месторождений мы встречаемся с повышенно консолидированными участками (массивами) в виде плутонов разного масштаба и формы или вулканических аппаратов. И те, и другие сами по себе образовались закономерно во времени и пространстве при развитии подвижных поясов и областей земной коры. Однако месторождения и структуры их локализации, возникшие в телах магматических массивов, в большой мере являются *автономными,* зависящими от особенностей становления самих массивов вмещающих пород. Геологи часто поддаются соблазну объяснять внутренние, особенно разрывные структуры в телах плутонов и вулканов внешним тектоническим воздействием. В начальный период застывания интрузий кора их больше подвергалась взламывающим усилиям снизу под воздействием внутреннего магматического давления, чем под влиянием внешних боковых тектонических напряжений. Влияние последних прогрессивно умень-

шается по мере утолщения коры, игравшей роль свода, и ко времени средней стадии формирования интрузива на месте активной интрузии сводилось уже к минимуму.

К этому времени, продуктивному в отношении эманационной минерализации, такие плутоны в значительной степени служили *контрфорсами* для внешних латеральных давлений, достаточно надежно отражающими их воздействие. Интрузивные массивы как острова среди складчатого моря пластичных осадочных пород плохо поддаются воздействию его «волн» и сохраняют в основном свое внутреннее автономное строение с благоприятными интраплутоническими структурами локализации, разрывными и связными.

Интенсивность динамических напряжений при действии вулканов и последующие реакции оседания, по-видимому, из-за возникшего дефицита массы на глубине после извержения создают целый калейдоскоп главным образом разрывных, автономных структур локализации, благоприятных для проникновения и действия растворов, особенно активных после закупорки жерловины экструзивным некком.

Вулканы по сравнению с плутонами являются менее надежными «буферами» для распространения боковых тектонических усилий, но существенная «помощь» в создании локализаторов оруденения в ближайшем окружении стратовулканов со стороны боковых тектонических усилий не представляется обязательной.

Однако в перимагматических ореолах деятельности дериватов интрузий и вулканов с удалением от контактов и жерловин значение автономных структур локализации, связанных с плутонической и вулканической тектоникой, резко снижается и уступает место другим, особенно тектоногенным структурам локализации, уже подчиненным региональному плану деформаций.

Структуры автономно-магматические по положению в пространстве, связанному с их происхождением, можно подразделить на глубинные — интраплутонические, приповерхностные — интравулканические и структуры перимагматических приконтактовых ореолов интрузий и вулканов.

Магмогенные структуры локализации эндогенных месторождений являются, как уже указывалось, в значительной мере автономными по отношению к региональному тектоническому плану. На глубине они зависят непосредственно от особенностей становления интрузивов, а в приповерхностных условиях причинно связаны с характером вулканических извержений.

Эти структуры локализации, как было показано на примере со штокверками, далеко не однообразны и зависят от места и характера действия магмы и ее дериватов. Преимуществом при изучении данных структур в отличие от тектонических является большая ясность в происхождении, хотя они еще не привлекли к себе должного внимания. Относительно хорошо изучены только структуры интрузивно-магматического (интраплутонического) происхождения, связанные с первичной анатомией плутонов и их эндокинетической трещиноватостью, а также локализующие структуры их контактов. Здесь большая заслуга принадлежит Г. Клоосу, Н. А. Елисееву, А. В. Пэку и их ученикам, содействовавшим развитию методов «прототектонического» анализа.

Однако грандиозные силы действия прорвавшейся к поверхности магмы на окружающие породы и вулканические продукты еще мало учитываются при расшифровке генезиса структур локализации интравулканических (субвулканических) месторождений многих металлов и неметаллических ископаемых.

Кажется своевременным обратить внимание на значительно более широкое распространение у нас эффузивно-вулканических и субвулканических полиметаллических, колчеданных, железорудных, золото-

рудных, оловянных, висмутовых, ртутных и других месторождений, структуры локализации которых в большой мере связаны не с региональной, а с локальной вулканической «тектоникой». Молодые рудные месторождения металлов Кавказа и Закавказья, Закарпатья, Сибири и Дальнего Востока СССР могут дать богатейшие материлы для изучения особенностей контроля оруденения вулканическими структурами локализации с характерными криволинейными и радиальными трещинами, брекчиями прорыва и зонами «спутанной» трещиноватости.

Для этих целей, очевидно, могут служить и молодые месторождения эндогенного неметаллического минерального сырья: исландского шпата и агата, барита и флюорита, первичных каолинов и фарфоровых камней.

Вслед за В. Н. Котляром [60, 61, 62] для целеустремленного раскрытия закономерностей образования вулканогенных структур локализации уже сейчас можно выделить среди них стратовулканические, эксплозивные внежерловые структуры оседания и экструзивные внутрижерловые структуры. Первые имеют большое значение для унаследованной минерализации, вторые — для гидротермального рудообразования, связанного с вулканическими очагами, а последние включают в себя, кроме наложенного оруденения, и первичные, аллолитовые образования алмазов, пиропа и хризолита, зависящие от структур локализации только в самом общем виде (трубки взрывов).

Менее очевидными и специфическими являются эманационные перимагматические структуры локализации. Дериваты магмы, вначале используя для продвижения вверх тектонические или магмогенные структуры минерализации, подготавливали сами для себя благоприятные внутрирудные (первично-вторичные) структуры или наследовали первичные структуры в дислоцированных и недислоцированных породах разной проницаемости и химической активности.

В первом случае частные структуры локализации возникали на месторождениях синхронно или почти синхронно в результате развития того же самого процесса, который обеспечил образование минеральных залежей и гнезд. Такие структуры можно назвать автоструктурами минерализации. Они генетически связаны с опережающим растворением пород и с физическими изменениями объемов минеральных масс, вызванными химическим воздействием растворов, о чем уже говорилось. Мы упоминали широко распространенный процесс автометаморфического превращения ультраосновных пород в серпентиниты, сопровождающийся увеличением объема за счет оливина до 37,1%, что вызывает атектоническую дилятационную трещиноватость пород, по-видимому, играющую важную роль при образовании месторождений асбеста. Также указывалось на сокращение объема полевых шпатов при их каолинизации и кварца при его $\alpha$—$\beta$-трансформациях.

Общее сокращение объема вещества гранитного интрузива при его остывании (контракционная усадка) может достигнуть 10% и это вызывает отрывы и сколы, особенно интенсивные в периферической части и на контактах. Данные явления усиливаются физико-химическими процессами последующих преобразований под воздействием эманаций еще живущего на глубине магматического очага.

Калейдоскоп этих интраплутонических процессов, сопровождающихся механическими подвижками разного рода — отслоениями, оседаниями и обрушениями, образованием трещин — мог еще более осложняться внешними тектоническими давлениями. но влияние последних проявляется далеко не всегда или их воздействие трудно доказать.

Автоструктуры первичной минерализации свойственны не только интрузивным образованиям. Ранее, например, отмечалась гидротермальная доломитизация известняков, в результате которой возникает тонкая трещиноватость, характерная для «штокверкообразного» свин-

цово-цинкового оруденения некоторых изученных нами телетермальных месторождений на Дарвазе [30].

Развитие гидротермального карста в известняках и скарнах («продушины» Тетюхе) обеспечивает структуры локализации для кристаллизации друз рудных минералов, исландского шпата и оптического флюорита. Кварциты и кварцолиты, легко растворяющиеся под воздействием щелочных гидротерм, благоприятны не только для образования структурных емкостей в виде полостей-гнезд, но и для питания последних кремнеземом при медленной кристаллизации пьезокварца. Поверхности соприкосновения таких благоприятных пород с кристаллизующими растворами и объемы резервуаров кристаллизации могут увеличиваться с образованием многокамерных «погребов» со сводовым арочным отслоением, оседанием, обрушением и атектоническим брекчированием, которые сопровождаются также локальными трещинами небольших сбросов, сколов и разрывов [32].

В этих и во многих других случаях мы встречаемся с *автономными структурами локализации,* не зависящими от каких-либо тектонических разломов и тем более от общего тектонического плана строения района месторождений. Однако в складчатых областях такая зависимость проявляется в гидротермальном унаследовании тектонически нарушенных и не нарушенных слоистых структур с благоприятными для метасоматоза пластами или с непроницаемыми перекрытиями, обеспечивающими экранирование поднимающихся снизу ювенильных растворов.

Разнообразие магмогенных структур локализации (интраплутонических, интравулканических и перимагматических) отражено в табл. 4, где они сведены в восемь классов. Подробная характеристика всех пятидесяти выделенных типов эндогенных структур локализации сейчас не входит в нашу задачу.

При образовании эндогенного месторождения в каждом данном участке земной коры необходимо осуществление следующей цепи событий: формирование геологической среды и структурной обстановки; возникновение магматического очага, отделяющего геохимические рудообразующие среды; совмещение и взаимодействие той и другой благоприятной среды ,вызывающее главный процесс минерализации и частные явления рудообразования в структурах локализации; последовательная кристаллизация минеральных парагенезисов и парагенетических ассоциаций, сопровождающаяся возникновением ореолов изменений вмещающих пород.

Часть III

# ВВЕДЕНИЕ К НОВОЙ ИСТОРИИ ИЗУЧЕНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОНСЕРВАТОВ МИНЕРАЛООБРАЗУЮЩИХ СРЕД

> Всякое новое научное течение должно пережить период борьбы за свои идеи, за свою самостоятельность; в этой борьбе оно только закаляет мысль и обтачивает формулировки, находя грани своих исследований и намечая пути развития... Но борьба каждой новой научной мысли должна идти в двух направлениях: внешняя против тех, кто косно и непродуманно борется против новых течений, и внутренняя, которая должна одинаково определенно и решительно бороться внутри — за ясность своих установок и глубину и обоснованность выводов.
>
> *А. Е. Ферсман* [109]

В нашей книге [34] впервые в литературе был представлен обзор истории изучения газово-жидких включений в минералах в предыдущем веке и в первой половине XX столетия. В данной монографии мы опускаем хронологию этих исследований и представляем лишь некоторые материалы, послужившие вводными к новой истории развития гермобарогеохимии глубинных процессов минералообразования по включениям растворов и расплавов в минералах*.

К целеустремленному систематическому исследованию включений минералообразующих растворов и расплавов в нашей стране приступили в первой половине 40-х годов XX века, а во Франции, США и Канаде со второй их половины. За десятилетие, к середине века, за рубежом было опубликовано 16 статей, а в СССР 22 работы, в том числе и первая книга, посвященная включениям в минералах и их использованию в науке**.

Во второй нашей книге [33], которая в 1965 г. была опубликована на английском языке в XXII томе международной серии монографий, посвященной наукам о Земле, были подведены не только первоначальные итоги десятилетних личных исследований автора, но также намечены некоторые пути и установки для дальнейшего использования этих включений в термодинамической геохимии и теории минералообразования, практике изучения и поисков эндогенных месторождений, а также выращивания искусственных минералов.

За последние 17 лет в мировой научной литературе, и главным образом в СССР, появилось свыше 700 новых работ по газово-жидким

---

* Исследования газово-жидких включений, начавшиеся еще в прошлом веке, по разным причинам, прежде всего из-за отсутствия разработанных методов и их теории, прекратились к концу первой половины XX века. Усилиями автора монографии в течение 40-х годов с помощью созданной им принципиально новой конструкции термокамеры, позволившей успешно экспериментировать с включениями до температур 650° С, были разработаны первые теоретические основы методов исследования включений и накоплен большой фактический материал по результатам их практического использования. Результаты десятилетних работ автора были обобщены в книге «Исследования минералообразующих растворов», вышедшей в 1950 г. и в 1951 г. удостоенной Государственной премии. Выход в свет этой книги, показавшей на новом теоретически обоснованном уровне уникальные возможности и результаты практического исследования включений, вызвал новый резкий рост исследований по этому вопросу, и середина XX века справедливо считается началом новой истории исследования включений. *(Прим. ред.).*

** Ермаков Н. П. «Критерии познания генезиса минералов и среда рудообразования. Минерал. сб. № 3, прилож. 1. Изд-во Львов. геол. об-ва, 1949.

включениям. Оказалось, что результаты многочисленных опытов, представления и перспективные суждения, намеченные нами в 1950 г., выдержали испытания тщательных экспериментальных проверок со стороны большого коллектива наших и зарубежных геологов. Были выявлены и многие новые, обнадеживающие факты для дальнейших исследований в области развития теории эндогенного минералообразования, а также в сфере прикладного использования включений.

В третью часть вводного раздела монографии мы включили лишь некоторые материалы, предшествовавшие новой истории изучения и использования консерватов материнских растворов и расплавов, которые были написаны ранее автором [33].

Эти материалы вводят читателя в курс прошлых работ и представлений автора. Материал, излагающийся далее, по существу характеризует развитие этих исследований и представлений на современном этапе.

В приложении приведены решения первых трех совещаний (Москва, 1963 г.; Новосибирск, 1965 г.; Александров, 1968 г.) по изучению включений в минералах, которые в самом сжатом виде ориентируют читателя в современном состоянии, путях дальнейшего развития и организации всего комплекса исследований по третьему каналу информации и их теоретическом и практическом назначении.

## Глава 8

## НОВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ В ТЕРМОМЕТРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ГАЗОВО-ЖИДКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ, ВЫЯВЛЕННЫЕ К 1950 г.

В 1941 г. автор впервые занялся *систематическими экспериментальными исследованиями включений* в природных кристаллах. Для обеспечения этих исследований в широком температурном интервале вскоре пришлось заменить применявшийся способ нагревания минералов в парафиновой среде нагреванием в замкнутом воздушном пространстве. Это было достигнуто с помощью приспособленной к микроскопу *термокамеры*, которая в предложенной комбинации с другими приборами обеспечила все необходимые экспериментальные процедуры до температур 600—650° С.

*На основе этой новой техники* в процессе исследований *была впервые разработана методика экспериментальной работы над включениями маточных растворов.*

Массовый просмотр минералов, находящихся в самых различных геологических условиях, позволил выявить большое разнообразие включений *по их составу и состоянию.* Однако отсутствие в литературе какой-либо объединяющей идеи для осмысленного подхода к включениям всегда серьезно тормозило их изучение. Без знания того, что обозначают и характеризуют те или иные включения, нельзя было двигаться дальше. Разработанная впервые естественная классификация включений явилась тем необходимым звеном, которое связало разные типы и виды включений с закономерно развивающимися процессами природного минералообразования. В связи с созданием этой классификации были выдвинуты критерии для распознавания минералов, возникших из расплава, газового и водного растворов разных температур.

До работ автора в *генетической классификации* самих включений выделялись только *первичные* включения, своим расположением связанные с формами роста кристаллов, и включения *вторичные,* приуроченные к залеченным трещинкам в минералах. Только включения первого типа считались пригодными для получения сведений об усло-

виях образования включающих минералов. Это очень сужало возможности использования включений для указанной цели, так как большинство из них приурочено к трещинкам залечивания минералов. Автором был выявлен новый, очень распространенный генетический тип «первично-вторичных» включений. Такие включения оказались приуроченными к трещинкам, *секущим ранние внутренние зоны роста кристаллов и залеченным в разные моменты кристаллизацией вещества одной из последующих зон роста минерала.* Это означало, что далеко не все включения, кажущиеся по расположению вторичными образованиями, должны игнорироваться при выяснении условий кристаллизации. Это был необходимый шаг в понимании сущности образования включений и увязки их с процессом роста включающих минералов.

После установления непригодности вычислительного метода Сорби в использовании включений как саморегистрирующих термометров автором в 1943 г. был предложен *новый «визуальный» метод исследования*, названный позднее методом эмпирических кривых. Этот метод оказался пригодным лишь для приблизительного определения температур образования минералов под микроскопом без каких-либо дополнительных приборов. Он был основан на эмпирических кривых, получаемых для определенных минералов измерениями отношений фаз во включениях при комнатной температуре с последующим выяснением температур их гомогенизации. Математический анализ этих кривых, выведенных для главнейших жильных минералов — кварца и кальцита позволил предложить довольно простые эмпирические формулы для расчета вероятных температур образования некоторых гидротермальных минералов, кристаллизовавшихся при температуре ниже 200° С.

Метод гомогенизации включений нагреванием, изредка применявшийся некоторыми исследователями, не давал желаемых результатов, потому что отсутствовал определенный подход к исследованию включений в отдельных кристаллах, т. е. не было создано методики их изучения. Автором была разработана и впервые применена еще в 1943 г. специальная *методика термометрического анализа.* Она исходила из общего теоретического представления о том, что в связи с непрерывными изменениями в минералообразующих растворах не может быть абсолютно одинаковых включений в разных зонах растущего кристалла, поскольку процесс роста протекает во времени. Включения разных зон роста кристалла при их гомогенизации в общем случае *не могут показывать одной и той же температуры.* Допускавшиеся определения температуры образования минерала, рудной жилы или даже целого месторождения одной какой-либо цифрой никак не могут характеризовать изменчивый природный процесс.

Предложенная методика термометрического исследования температурных условий образования отдельных кристаллов и месторождений основана *на раздельном изучении включений в разных зонах роста и частях кристаллов* одной генерации или одного зарождения. Определенный по включениям в одном кристалле интервал изменений температурного режима растворов характеризует лишь сравнительно короткий промежуток процесса образования всего гипогенного месторождения. Общая картина его образования с помощью этой методики вырисовывается через изменения температур, выявленные исследованиями включений в разных минералах месторождения или в одном и том же минерале, но принадлежащем разным генерациям и зарождениям.

Как было установлено практическим применением этой методики, изменения *в температурах кристаллизующих растворов для минералов разных генераций могут происходить различно*: это или последовательное, обычно к концу убыстряющееся снижение температуры растворов; или резкий спад температуры после некоторого перерыва постепенности в росте кристалла, или временное повышение температуры обра-

зования наружной части кристалла, иногда сопровождающееся растворением граней внутренней его части, или же, наконец, для некоторых зонарных кристаллов скачкообразные изменения в температуре, с резкими подъемами и спадами для разных зон. Такое многообразие в изменениях температур *обусловлено пульсирующей подачей кристаллизующих растворов к месту образования минералов.*

*Определение последовательности кристаллизации минералов,* представляющее собой нелегкую и пока методологически далеко не разрешенную задачу [110], в предлагающемся методе минералотермометрического анализа находит важную точку опоры. Отнесение кристаллов к различным генерациям и зарождениям, а также синхронизация различных по внешнему виду, но одинаковых по составу минералов и минералов разного состава часто осуществимо с помощью разработанной методики исследования включений маточных растворов.

Рост отдельных кристаллов определенной минеральной генерации может иногда осуществляться в *настолько большом интервале падения температуры растворов,* что любая принятая в классификациях гидротермальных месторождений температурная граница (например, между эпи- и мезотермами — 200° С) лишена смысла и *механически* применяться не может. Если придерживаться подразделения месторождений на теле-, эпи-, мезо- и гипотермальные, придется также и многие отдельные кристаллы относить по данной классификации, например, к мезо-эпи-телетермальным образованиям, а это не имеет никакого смысла. Многие минералы, названные политемпературными, начинали кристаллизоваться при температурах выше 200° С, а заканчивали свой рост при температуре ниже 100° С. Температуры должны определяться в различных зонах роста отдельных минералов разных генераций, а только затем может быть восстановлен *разноизменчивый* температурный режим маточных растворов, формировавших то или иное месторождение в целом.

Кроме температурных исследований, автор значительное внимание уделял выяснению возможности использования включений в минералах для *определения агрегатного состояния кристаллизующих растворов.* Высказанное им ранее [31] положение о том, что «включения являются хорошими объективными критериями при различении холодноводных минералов от гидротермальных и последних от пневматолитических» в результате последующей работы над многочисленными минералами разного происхождения и различных условий залегания полностью подтвердилось фактическими данными.

В процессе параллельного развития метода гомогенизации включений и нового «визуального» метода автор перешел *от измерений стабильных отношений фаз во включениях при комнатной температуре к наблюдениям и измерениям фазовых изменений, происходящих в процессе нагревания включений до высоких температур.* Такая впервые примененная методика позволила выявить резкие различия в ходе гомогенизации включений в минералах, который был представлен на специальных диаграммах кривыми, характеризующими *различные типы и виды гомогенизации.* В минералах гидротермального происхождения включения гомогенизировались только заполнением всего пространства вмещающей вакуоли жидкой фазой (I тип гомогенизации). В то же время в кварцах, топазах, бериллах, турмалинах и других минералах пегматитовых жил и месторождений, расположенных вблизи от материнских интрузий, первичные и первично-вторичные включения гомогенизировались в газовой фазе (II тип гомогенизации), хотя ход их гомогенизации и не был единообразным для ранних и поздних генераций этих минералов. В поздних генерациях этих минералов чаще всего наблюдаются виды гомогенизации с точкой инверсии и критической точкой.

Существенно газовые и газово-жидкие включения, гомогенизирующиеся по II типу с двумя его разновидностями, оказались *совершенно не свойственными для минералов большой группы месторождений,* удаленных от материнской интрузии и считающихся гидротермальными. В то же время они очень характерны для минералов другой группы месторождений, которые по геологическим данным относились к пегматитовым или пневматолитовым образованиям. Таким образом, эксперименты по превращению гетерогенных (при комнатной температуре) систем включений в минералах в гомогенные системы, проведенные под микроскопом на основе новой техники и методики, впервые дают возможность *объективно судить о первичном агрегатном состоянии растворов,* из которых образовались включающие минералы. Второй тип гомогенизации *подтверждает существование в природных процессах минералообразования условий, характеризующих пневматолитовый этап деятельности магматических производных.* Кроме того, наблюдения при исследованиях включений (вид гомогенизации с критической точкой) *подтверждают существование в природе критических явлений.*

В месторождениях многостадийного образования исследования включений растворов в разновременных минералах *позволяют отделить продукты пневматолиза от продуктов, выделенных гидротермами.*

Одновременно с этим по многофазовым включениям в минералах было установлено, что гидротермальные растворы, иногда крайне пересыщенные хлоридами, карбонатами и частично сульфатами, фактически представляющие собой *«гидротермальную рапу», участвуют в процессе минералообразования при температурах, значительно превышающих критическую температуру чистой воды. С другой стороны, растворы могут кристаллизовать минералы в тепловодных и холодноводных условиях много ниже точки кипения воды при давлении в 1 атм.* Установлено, что такие минералы характеризуются однофазовыми существенно жидкими включениями водных растворов. Проведенные автором эксперименты по выращиванию кристаллов при разных температурах и опыты с включениями растворов в природных минералах показали, что гомогенными при комнатной температуре сохраняются лишь включения тех растворов, которые были захвачены минералом при температуре ниже 60—50° С.

Каждый исследователь, занимающийся затвердевшими, газовыми или существенно жидкими включениями в минералах, фактически имеет дело с остатками той среды (расплав, газовый раствор, водный раствор), из которой происходила кристаллизация включающих минералов.

Эта среда и геологическая обстановка (в первую очередь окружающие породы) находятся в теснейшем взаимодействии и в процессе минералообразования постоянно изменяются.

Происходившие во времени (и пространстве) изменения в среде, обусловливавшие и непрерывно сопровождавшие минералообразование, дойдя до определенных количественных отношений, не могли далее развиваться постепенно и вызывали резкие превращения этой среды из одного состояния в другое. *Эти постоянные изменения и превращения в физико-химическом процессе образования гипогенных месторождений впервые поддаются объективной оценке на основе изучения герметически замкнутых в минералах реликтов среды.*

*Благодаря этому процесс минералообразования может быть расчленен на ряд крупных, средних и мелких ступеней,* которые в схеме автора называются этапами, стадиями и ступенями развития магматических производных.

*Резкие превращения на границе пневматолитового и гидротермального этапов четко улавливаются по различиям в типах гомогенизации включений и по виду гомогенизации с критической точкой.*

*Эволюционные изменения в пределах этапа различаются по видам гомогенизации и температурам гомогенизации включений газовых и водных растворов.* На этом основании выделяются стадии и фазы минерализации.

Таким образом, на основании непосредственного исследования выделений магматического очага, сохраненных во включениях в минералах, удается распознавать процесс образования того или иного гипогенного месторождения по частям и устанавливать место минеральных генераций в общем ходе развития процесса.

Как известно, большинство американских рудных геологов уже давно исключило пневматолитовый этап из классификаций месторождений и пошло в своих, часто субъективных, представлениях по *линии обеднения природных процессов минералообразования, по линии выхолащивания в своих работах идеи развития.*

Советские геологи, пользуясь разными методами и методиками, с различных сторон успешно подходили к уяснению и детализации процессов минералообразования, однако в познании основных факторов, направляющих эти процессы, пути только еще намечались.

Большие достижения в физико-химических интерпретациях природного процесса минералообразования, основанные главным образом на экспериментах с искусственными системами, настоятельно нуждались в том, чтобы был перекинут мост от лабораторных данных к природным процессам и явлениям. В качестве необходимых опор для этого «моста» нами выдвигаются для использования в науке и практике включения маточных растворов. Эти герметически замкнутые в минералах гетерогенные *природные системы* поддаются восстановлению в исходном виде и точному количественному определению и измерению.

Отсутствие достаточного внимания к включениям минералообразующих расплавов и растворов в минералах приводило и приводит к ошибочным заключениям о химическом составе минералов, полученных спектральными и иными методами исследования. Потери при прокаливании многих безводных минералов объяснимы только взрыванием включений, содержащих значительные по отношению к объему минерала количества водных растворов. Термические анализы минералов также требуют учета субмикроскопических включений этих растворов в целом ряде гидроксильных минералов. Колебания в удельном весе одного и того же минерала чаще всего, по-видимому, зависят от количества содержащихся в нем включений.

Разработанные автором методы и методики исследования в значительной степени позволяют прочесть по включениям *детальную летопись истории образования минералов и гипогенных месторождений.*

Успешно развивающиеся в нашей стране *металлогенические исследования* при разностороннем использовании включений минералообразующей среды могут получить новое оружие для поисков и оценки гипогенных месторождений.

Уже начальный опыт применения методики термометрического исследования, освещенный в нашей докторской диссертации, открывает возможности для выяснения целого ряда *интимных особенностей образования* не только отдельных кристаллов, но и месторождений в целом. В частности, минералы гидротермальных месторождений могут быть распределены на парагенетических схемах в рамках абсолютных (или почти абсолютных) температур.

Для месторождений, формировавшихся в сложных тектонических условиях, может быть уловлен скачкообразно-прерывистый характер изменения температур минералообразующих растворов и других сопряженных с температурами факторов минералообразования. Разные температуры гомогенизации вторичных включений в минералах содей-

ствуют выявлению на месторождениях разновременных внутриминерализационных подвижек, вызывавших дробление и трещиноватость минералов.

Изменения в температурах, типах и видах гомогенизации включений в минералах жил, находящихся в области развития разных по составу и времени интрузий, могут содействовать выявлению родственной связи минерализации с тем или иным типом интрузий, что необходимо для правильной ориентировки поисковых работ.

В перспективе, по-видимому, имеются возможности путем термометрического исследования минералов одной генерации, развитых на площади месторождения или группы месторождений, намечать (с помощью и других методов) центры оруденения и уточнять существующие представления о зональной минерализации.

Этими многообещающими перспективами в области *минералогенетических исследований* не исчерпывается все разнообразие научно-практического применения включений.

Всестороннее изучение замкнутых природных систем включений в скором будущем даст возможность получить отсутствовавшие рецепты для кристаллизации ряда дефицитных минералов. Химические и микрохимические анализы включенных растворов в сочетании с экспериментами по гомогенизации включений позволят научиться переносить опыт гигантской природной лаборатории в лаборатории ученых, приспособленные для получения искусственных кристаллов.

Изучение включений в легкой фракции шлихов и в минералах осадочных толщ с целью выяснения их первичного происхождения (на основе предложенных критериев) несомненно позволит получить новые данные, необходимые для корреляции немых горизонтов и выяснения областей сноса *.

Наблюдающаяся сохранность существенно жидких включений в минералах пород, слагающих области, подвергшиеся интенсивным тектоническим, в частности, колебательным движениям, может дать геологу-тектонисту важные сведения о пределе погружения этих пород. Наоборот, взорванность существенно жидких включений в минералах пород и месторождений указывает на прогревание этих минералов, связанное или с большой глубиной, или же с позднейшим внедрением интрузии, находящейся где-то поблизости.

Ряд положений, высказанных в связи с необходимостью учета наличия включений для других методов исследования минералов и с практическим применением результатов исследования включений к проблемам металлогении, искусственной кристаллизации минералов, вопросам тектоники и минералогии осадочных пород, а также частично к осадочной петрографии, хотя в той или иной степени вытекали из содержания нашей докторской диссертации, но не выдвигались в качестве тезисов, так как они требуют еще большой, дополнительной, коллективной работы, уже начатой в ряде городов (Львов, Москва, Ташкент, Ленинград и др.).

Во всесторонних исследованиях включений материнской среды в минералах должны быть заинтересованы не только геологи, занимающиеся гипогенными месторождениями, минералоги, геохимики, петрографы и кристаллографы, но и ученые других геологических и негеологических (например, химических и физических) специальностей. Естественно, что только коллективными усилиями можно разрешить во всем объеме проблему разностороннего использования включений для науки и практики.

---

* В том числе для определения мест нахождения коренных пневматолитовых и гидротермальных месторождений, открытых для современной эрозии или перекрытых только молодыми отложениями.

Глава 9

## СХЕМА ГЛАВНЕЙШИХ ЭТАПОВ И СТАДИЙ РУДООБРАЗУЮЩЕГО ПРОЦЕССА И ПРИНЦИПЫ ВЫЯСНЕНИЯ СТАДИЙНОСТИ МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЯ

На основе работ наших ученых, пока лишь в первом приближении увязанных с исследованиями остатков минералообразующих растворов, сохраняющихся во включениях, автором была предложена для обсуждения и использования схема последовательных этапов и стадий развития минералообразующих магматических производных [33].

Ниже даются краткие пояснения, касающиеся в основном только развития пневматолитового и гидротермального процессов.

*Период магматической активности**, породившей минеральные сообщества тех или иных гипогенных месторождений, в приводимой схеме подразделяются нами на *этапы и стадии,* для которых были выявлены объективные критерии их распознавания.

Таким образом, весь процесс гипогенного минералообразования может быть охарактеризован по частям. Название «этап минерализации» употребляется взамен обычного названия «фаза минерализации», а термин «стадия» применяется для обозначения последовательно развивающихся выделений парагенетических ассоциаций минералов внутри этапа. «Ступень минерализации» охватывает в нашем понимании еще более узкий отрезок всего процесса, т. е. часть стадии.

*Этап* минерализации в этой предварительной схеме (табл. 5) ограничивается пределами действия изменяющейся во времени и пространстве минералообразующей среды, сохраняющей, однако, общее *агрегатное состояние* в пределах этапа. Этапы отграничиваются один от другого, соседнего, относительно быстрыми превращениями среды, следствием которых являются резкие качественные и количественные изменения в минеральных сообществах, их структурах и текстурах [33, 34].

*Стадия* охватывает некоторый промежуток эволюционного развития процесса в пределах того или иного этапа. Она характеризуется изменениями ряда физико-химических факторов, реализующихся не в превращениях агрегатного состояния среды, а в качественных и количественных ее особенностях на данном отрезке течения процесса. Например, в первой стадии пневматолитового процесса во включениях наблюдается все увеличивающееся (до 25%) количество водных паров, а в конце второй стадии перед превращением надкритических газообразных растворов в гидротермальные, судя по количеству жидкости во включениях (45—50%), вода начинает резко доминировать.

В дальнейшем, по-видимому, удастся подразделить отдельные стадии на более дробные единицы, которым можно дать название «ступеней». В частности, в начале развития процессов пневматолиза первой ранней стадии по включениям устанавливается ступень минерализации «сухих» газов, а в конце второй поздней стадии ступень относительно быстрых превращений критических растворов в жидкость. При этом уже образовавшаяся часть жидкости может находиться в состоянии кипения. В минералах, образующихся в эту переходную к гидротермам ступень, *одновременно образуются как газовые, так и жидкие включения.* Гомогенизация тех и других сопровождается рядом особенностей, характеризующих быстрые превращения гетерогенного раствора из одного состояния в другое.

Минералообразование в пределах одного этапа или даже стадии — отнюдь не равномерный, спокойный процесс. Он сопровождается непрерывными изменениями химизма среды, мягкими и резкими скачками

* Уточненные определения периода, этапа, стадии и ступени минерализации даны в позднейшей работе автора [86]. *(Прим. ред.).*

в температуре и давлении*. Будучи спроектированным на «генетический экран» каждого данного месторождения в суммарном виде, этот непрерывный процесс благодаря возникновению различных минеральных генераций и модификаций, иногда сопровождающихся растворением более ранних минералов, одновременно является и *прерывистым.* Даже отдельные, например зонарные, кристаллы выдают целый ряд мелких и мельчайших перерывов постепенности, наиболее ярко выражающихся в образовании зон, в изменениях кристаллической формы, в растворении и регенерации и т. п.

Таким образом, можно говорить лишь об *относительно* спокойном эволюционном развитии в пределах каждого этапа, противоположном относительно быстрым превращениям на его границах, сопровождающимся резкими нарушениями подвижного равновесия в соотношениях основных физико-химических параметров ($T$—$P$—$X$).

В табл. 5 (графа 10) в пределах каждого этапа можно видеть доминирующее значение главнейших минералов. Это, по-видимому, представляет собой результат *естественного отбора* среди них, отбора, 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. п.).

Проведенное в схеме (см. табл. 5) разделение на этапы и стадии показывает нам *слева направо* направление развития минералообразующей среды, происходящего в определенной хронологической последовательности. Таким образом, схема дает понятие и об относительном *возрастном положении* месторождений и их минеральных сообществ, *формировавшихся в период деятельности одного и того же магматического очага.*

Стрелки графы 3 схемы показывают пределы существования обогащенного надкритическими «сухими» газами расплава, сильно кислого газового раствора (эволюционирующего до кислого и, возможно, нейтрального газово-жидкого раствора) и водного щелочного раствора, в котором растворенные вещества позднее частично переходят от молекулярных к коллоидным.

Графы 4, 5, 6 и 7 представляют отсутствовавшие до сих пор объективные физико-химические данные, полученные из непосредственных наблюдений в природных минералах и частично подтвержденные экспериментами над искусственными кристаллами. Они являются главными для всей схемы и, как было показано, позволяют объективно различать выделенные этапы и стадии процесса образования минеральных месторождений.

С помощью исследования включений в минералах для каждого гипогенного месторождения и минеральных генераций в нем можно найти определенное место в общем процессе минералообразования.

Интервалы максимальной и минимальной температур пневматолитового и гидротермального этапов графы 8 представляют собой результат многих тысяч экспериментов по определению температур методом гомогенизации включений. При последующих дополнительных исследованиях они могут несколько измениться. Это касается главным образом минимальной цифры, полученной для пневматолитового минерала, и максимальной цифры, характеризующей температуру гидротермального минерала.

Не вызывает сомнений, что в фазовых превращениях минералообразующей среды весьма существенную роль играют *концентрация растворов и внешнее давление,* которые для разных месторождений варь-

* Эти колебания термодинамических параметров наиболее точно передаются латинским термином «флуктуация».

ируют в широких пределах. В частности, весьма вероятное наличие сильных кислот в газовых растворах, по-видимому, должно *понижать их критическую температуру.* В условиях малого внешнего давления последняя поэтому может оказаться меньше 200° С, а при высоких давлениях и концентрациях веществ в растворах гидротермальные минералы могут образоваться и при температуре выше, чем полученная нами цифра 500° С.

Как было показано, определение даже одного параметра — температуры — в природной физико-химической системе *T—P—X,* находящейся в подвижном равновесии с другими факторами, проливает определенный свет в отношении направления изменений всего процесса.

В графе 9 табл. 5 приводится общий характер жильного заполнения, различный для разных этапов.

Графа 10 схемы должна способствовать полевому определению места минеральных месторождений в общем процессе рудообразования. Однако, будучи правильной только в общих чертах, она нуждается еще в дополнениях и исправлениях путем проведения дальнейших исследований маточных растворов включений в минералах. Ряды минералов, фиксированные в табл. 5, 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 меняются их состав, форма, удельный вес, окраска, оптические свойства, которые находятся в тесной взаимосвязи друг с другом, так как факторы, обусловливающие эволюцию, являются для них общими.

В природе намечается *взаимозависимость физических свойств минералов,* например кристаллографической формы и окраски, выявление которых, к сожалению, еще не привлекло должного внимания исследователей. По-видимому, процесс изменения растворов и выделения минералов из них в течение каждого периода магматической активности был направлен в сторону возникновения все более сложных по строению и стереохимии, но более однородных кристаллических систем [110]. Однако в пределах разных этапов мы наблюдаем некоторую повторяемость свойств на новой основе, проявляющуюся наиболее наглядно, например, в порядке смены цветов минералов. Выявление этих закономерностей требует глубоких исследований минералов, которые должны быть связаны с изучением включений минералообразующих растворов.

В графе 11 табл. 5 представлена последовательность в процессах замещения продуктов отложения предшествующего этапа или стадии и минералов вмещающих пород, осуществляющихся при многостадийном минералообразовании. Выяснение хода процессов метаморфических изменений, столь распространенных в природе, существенно облегчается исследованиями вторичных включений растворов, участвующих в этих процессах. Совершенно обычно, что новообразования каждого этапа возникают на уже измененных продуктах предшествовавшего этапа.

Необходимо резюмировать некоторые данные по этапам, рассматривая схему (табл. 5) в вертикальном направлении. В нашей работе не затрагиваются вопросы внутримагматического минералообразования, поэтому в этой схеме почти не приведено относящихся к нему данных. Мы начинаем рассмотрение только с последней, по А. Е. Ферсману, «эпимагматической» стадии магматического этапа, являющейся начальной для внемагматических производных. По времени ей могли предшествовать только первые моменты очень сложного процесса образования контактовых месторождений, не рассматривающегося нами,— моменты, относящиеся к начальному периоду внедрения интрузии, когда

Таблица 5

**Схема этапов и стадий развития минералообразующих магматических производных и критерии их распознавания**
**(составил Н. П. Ермаков, 1948 г.)**

| Графа | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Этапы | | I. Магматический | | II. Пневматолитовый | | III. Гидротермальный | | |
| 2 | Стадии | | Внутримагматическая | 1. Аплит—пегматитовая (газорасплава) | 2. Пневматолитовая (газовая) | 3. Флюидная (газо-водная) | 4. Высоко- и среднетемпературная | 5. Низкотемпературная | 6. Холодноводная |
| 3 | Состояние минералообразующей среды и характерные реакции | | Газорасплав Расплав → (кремнеземистый) | | Флюид Газораствор → (сильно кислые до кислых и нейтральных) | | Водные растворы → (щелочные, истинные и коллоидные) | | |
| 4 | Критерии распознавания по включениям среды | Группы | Затвердевшие | | Газовые | | Жидкие | | |
| 5 | | Типы | Раскристаллизованные | «Письменные» | Собственно газовые (пневматолитовые) | Газо-водные | Водных растворов | | |
| 6 | | Виды | — | — | Двухфазовые (газа более 76% объема) | Двух- и многофазовые (газа от 50 до 76% объема) | Двух- и многофазовые (газа от 21 до 45—50%) | Двухфазовые (газа от 1 до 21% объема) | Однофазовые |
| 7 | | Типы гомогенизации | — | — | II тип (пневматолитический) | II тип (инверсионной гомогенизации) | I тип (гидротермальный) | | |
| 8 | Интервалы температур | | — | От 800 до 600° С | α—β кварц 640—573° С | От 600 до 250° С | От 460 до 200° С | От 200 до 50° С | <50° С |
| 9 | Характер жильного заполнения | | — | Аплиты, письменные граниты, силекситы и др. | Азонарное заполнение трещин минеральными агрегатами, часто одновременная кристаллизация | | Зонарное заполнение трещин минералами последовательной кристаллизации | «Сухие» трещины альпийских жил и метасоматиты | |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 10 | Главнейшие минеральные сообщества и их превращения (в предварительном виде) | Кварц (без призмы) | Морионы, раухтопазы | Розовые и зонарные кварцы | Призматический кварц, аметист, «диамант» халцедон, опал | |
| | | Плагиоклазы, ортоклаз микроклин | Микроклин, (амазонит) | Альбит | Адуляр, альбит | |
| | | Биотит, лепидомелан | Мусковит | Лепидолит | Жильбертит, кукеит, серицит | |
| | | | Циннвальдит, флогопит | | | |
| | | Турмалиновое «солнце» и игольчатые шерлы | Шерлы и синие турмалины | Полихромные турмалины | Игольчатые шерлы | |
| | | | Аквамарин и другие бериллы | Бериллы плоские и короткостолбчатые, воробьевит | Очень мелкие кристаллы бериллов | |
| | | | Топазы синие, винно-желтые, бесцветные, доматические | | Мелкие кристаллы топазов «Коневьи зубы» | |
| | | | | Флюорит Криолит | Фиолетовые и густозеленые окта—эдрические флюориты | Яблочно-зеленые и бесцветные кубы и столбчатые кристаллы / Розовые кристаллы кристаллы флюорита |
| | | | | Карбонаты? | Сидерит, анкерит, кальцит (эволюционные формы), родохрозит, доломит, арагонит, витерит, барит, цеолиты, гипс | |
| | Рудные минералы | | | | Накрит, галлуазит, динкит, монтмориллонит | |
| | | Ильменит альмандин | Брукит, анатаз, рутил, спессартин | | Базомелан, рутил игольчатый | |
| | | Ортит, монацит магнетит | Ниобо-танталаты, молибденит, вольфраматы гематит | | Касситерит, арсенопирит, сфалерит, вольфрамит, пирротин, халькопирит, гематит, пирит, галенит, антимонит, киноварь, висмутин, блеклые руды, реальгар | |
| 11 | Главнейшие процессы замещений | | Турмалинизация | Альбитизация | Разъедание пневматолитических минералов | |
| | | | Грейзенизация | Лепидолитизация | Серицитизация | |
| | | | Мусковитизация | Силификация | Жильбертитизация / Цеолитизация | |
| | | | | | Кукеитизация / Каолинизация | |

она, еще не успев начать своего нормального развития, вызвала пирометаморфизм вмещающих пород и выделила в них первые порции летучих.

Только с образованием замкнутой, *точнее периодически и относительно замкнутой* системы, чему содействовало возникновение твердой периферической магматогенной оболочки активного очага, началось нормальное развитие интрузии. С этого времени магматическое минералообразование может рассматриваться как последовательно развивающийся процесс, приводящий, в частности, к обогащению летучими верхней части интрузии с образованием здесь расплава, очень сильно обогащенного газами. Когда под влиянием усиливающегося внутреннего давления и внешних, например тектонических, причин нарушается замкнутость системы, а это повторяется многократно, магматические производные начинают длительное развитие на путях продвижения вверх, сопровождающееся процессами внемагматического минералообразования.

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 активной части магматического очага могло быть и обычно было несколько. Быстрое охлаждение и удаление из такого расплава летучих вызывает образование аплитов, характеризующихся, в отличие от письменных гранитов, образованием мелких кристаллов кварца с собственной огранкой. Для аплитов характерно также развитие плагиоклазов и иногда зональное образование 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 с вкраплениями кварца, обусловливающими характерную письменную структуру пегматитовых тел.

В случае резкого преобладания в расплаве кремнезема избыточные остатки последнего могут кристаллизоваться в средней части пегматитовой жилы в виде массы кварца, образующей так называемые *силекситы,* наблюдающиеся в пегматитах с блоковой структурой. На этом моменте, если он совмещен с прочным «запечатыванием» 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 замыкаться вследствие большого давления сверху и с боков, чему противодействует давление из магматического очага, передающееся через расплавы и растворы. В сложном процессе формирования жил мощность, минералогический состав и строение последних зависят частично от результатов борьбы указанных противоположных тенденций.

По нашим представлениям, первая аплит-пегматитовая стадия минералообразования является по времени самой непродолжительной, хотя «остаточный» расплав, сильно обогащенный газами, может выдавливаться за пределы интрузивного тела несколько раз в связи с повторными нарушениями замкнутости магматического очага. Относительная замкнутость системы последнего менее характерна для первого периода его истории. Именно в этот период и образуется главная масса внемагматических месторождений, начиная с момента, когда высокое напряжение, накопившееся внутри магматического очага, обусловливает рас-

колы в его коре и выдавливание магматических производных в виде своеобразного «остаточного», содержащего большие количества газовой фазы 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, пневматолитовую среду минералообразования. Это изменение среды не происходит 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 очень важному процессу минералообразования — пневматолизу.

Действие надкритических растворов осуществлялось в большом интервале температур и давлений. Длительность их действия обусловливалась 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 разных летучих компонентов неодинаковы. Состав газовой среды минералообразования последовательно изменяется *во времени и пространстве* (на пути ее передвижения).

Изменение минералообразующих растворов во времени зависит не только от изменения температуры и давления, но и от внешней различной *геологической обстановки,* которую не следует отождествлять *со средой.* Эти изменения обусловливают возникновение тех или иных продуктов *на различных по отношению к контакту интрузии горизонтах минералообразования,* сменяющих друг друга по мере отодвигания вглубь активной части магматического очага.

Большое содержание насыщенных паров воды и различных кислот в третьей стадии развития магматических производных существенно изменяет дальнейший ход процесса внемагматического минералообразования и в определенный момент снижения температуры приводит к образованию жидких водных растворов.

Многими исследователями принимается, с учетом упругости пара различных компонентов, что газовые растворы обладают 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 пневматолитового этапа и так обычны для гидротермального этапа развития магматических производных.

*В качестве доказательств правильности таких представлений теперь добавляются относительные определения кислотности и щелочности* минералообразующей среды во включениях.

Предстоящее развитие таких исследований включений в минералах дает несравнимо большую пользу науке, чем работы, подобные известной статье Л. Грейтона («Природа рудообразующего флюида»), вызвавшей обширную, но малоплодотворную дискуссию на страницах американских журналов.

Концентрация веществ в газовых растворах в общем значительно ниже, чем в гидротермальных. По включениям, однако, можно судить, что она по сравнению с «сухими» газами постепенно повышается, хотя пока мы еще не можем выразить этого цифрами.

Для гидротермальных растворов нами были ранее произведены некоторые подсчеты по трехфазовым и многофазовым включениям, которые показывают иногда очень высокие содержания солей*, преимущественно хлоридов**, достигающие 60 вес.%.

---

* Компонент «С» В. А. Николаева.

** Кроме петрогенных элементов в виде хлоридов (и фторидов) выносятся и многие металлы [33, 34].

Таким образом, высокотемпературные гидротермы, находящиеся под большим давлением, для одной из ранних ступеней гидротермального этапа вырисовываются в виде *рассолов с концентрациями растворенных веществ, еще не известными в условиях поверхности земли* («*гидротермальная рапа*»).

Такая неспособность рассолов, очевидно находящихся в области ликвидуса, к выделению солей натрия и калия на широком интервале температур и давлений делает их *идеальными переносчиками различных веществ, участвующих в образовании гидротермальных месторождений.*

Может быть только для того, чтобы резко не нарушить традиции, в будущем придется оставить трехчленное деление гидротермальных месторождений на высокотемпературные (500—350° С), среднетемпературные (350—200° С) и низкотемпературные (200—50° С). В случае надобности, иногда возникающей при сопоставлении месторождений, можно подразделять каждую из этих стадий на две ступени или фазы, как это мы сделали для флюоритовых месторождений Забайкалья [34].

В будущей генетической классификации месторождений, кроме главнейшего признака — *агрегатного состояния минералообразующей среды,* должны 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*», «*среднеглубинные*» и «*неглубокие*» месторождения, так же как и месторождения «*приближенные*» (к магматическому очагу), «*удаленные*» и «*дальние*». Комбинация этих терминов с главным классификационным признаком даст довольно точное положение того или иного месторождения не только в ходе развития процессов минералообразования, но и отчасти в геологической обстановке.

Естественно, что мы не ставили себе задачи и не имеем возможности охватить здесь все многообразие факторов, определяющих облик разнообразных месторождений. Достижения советских геологов в различных разделах учения о рудных полезных ископаемых снимают здесь эту необходимость. Для создания теории гипогенного рудообразования нашими геологами сделано уже многое.

Необходимо коллективными усилиями в ближайшие годы увязать имеющиеся огромные материалы по геолого-минералогическому изучению месторождений 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 новых резких сдвигов в понимании исключительно сложного процесса рудообразования.

Критически оценивая положение в современной теории рудообразования, академик С. С. Смирнов в 1947 г. писал, что «при современном состоянии наших знаний геолог, занимающийся изучением рудных месторождений, должен держать свой ум свободным в отношении существующих теорий рудообразования: теории эти еще слишком не совершенны. Ключи к проблеме еще не найдены» [95].

В нашей работе мы старались показать, что именно эти, одни из главнейших, недостающие «ключи» сохранены природой в виде остатков материнской среды в минералах и *методы их исследования нужно ввести в качестве обычного вооружения геологов.*

Раздел второй

# КЛАССИФИКАЦИЯ ВКЛЮЧЕНИЙ И СОДЕРЖАЩАЯСЯ В НИХ ГЕНЕТИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

---

Некоторые геологи, привыкшие изучать лишь крупные массы в поле, может быть склонны усомниться в ценности описанных мною фактов и считать включения такими крошечными, что на них не стоит обращать внимание... Но какая же наука процветала, приняв такое кредо. Какой физиолог подумал бы пренебречь всеми бесценными открытиями, сделанными в его науке при помощи микроскопа, только потому, что предметы малы... Должны ли мы, представители физической геологии, поддерживать то, что только несовершенные методы исследования применимы к нашей науке. Против такого мнения я несомненно протестую, и я утверждаю, что не имеется обязательной связи между размером предмета и ценностью факта и что хотя предметы мною описанные малы, заключения, которые нужно вывести из них — велики.

*Г. Сорби,* 1858

Необходимость тщательного изучения с этой точки зрения горных пород и минералов становится перед нами с особой ясностью, когда мы обратим внимание, насколько слабо представлена в списке вод, в о д а в к л ю ч е н и й (в главной части микроскопических) горных пород и минералов. В сущности после работ Г. Сорби (1858—1869) наши знания о химизме процесса остановились; получены лишь отдельные поправки и частности. В общей форме значение этих водных растворов не осознано минералогами и геологами...

*В. И. Вернадский,* 1933

Часть IV

# РАЗНООБРАЗИЕ ВЕЩЕСТВА ВКЛЮЧЕНИЙ В МИНЕРАЛАХ И ЕГО ПРОИСХОЖДЕНИЕ

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,* 1880

## Глава 10

## ГРУППЫ ВКЛЮЧЕНИЙ И ГЛАВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

После покойного президента нашей Академии А. П. Карпинского, занимавшего этот пост около 30 лет и внесшего очень большой вклад в познание диалектики минеральной природы Земли через исследования газово-жидких включений в минералах, большое понимание в их использовании, в качестве важного источника генетической информации, было проявлено со стороны академиков АН СССР В. А. Обручева, А. Е. Ферсмана, А. Н. Заварицкого, С. С. Смирнова, Д. С. Белянкина, Д. И. Щербакова, членов-корреспондентов АН СССР Ю. А. Билибина, В. А. Николаева и др. После их смерти оказалось очень трудным удержать понимание значения третьего канала генетической информации в геолого-минералогических науках.

Некоторые ученые, начиная с энциклопедиста раннего средневековья ал-Бируни (973—1048 гг.) и кончая выдающимся советским естествоиспытателем нашего века В. И. Вернадским (1863—1945 гг.), не упускали из поля своего острого научного зрения микрообъекты, известные под названием «газово-жидкие включения».

Вполне однородные минералы в виде бездефектных идеальных кристаллов представляют собой очень большую редкость в земной коре. Наиболее обычными очень широко распространенными нарушениями архитектурного стиля кристаллических образований и их однородности являются разнообразные включения. Ранее [22] мы представили краткое их определение, которое теперь должно быть дополнено.

*Под включением вообще следует понимать всякий участок, в процессе кристаллизации герметически изолированный в теле минерала и имеющий с ним фазовую границу. Включение представляет собой или стороннее, или материнское вещество. Последнее является представительной пробой или образцом подвижной системы минералообразующей физико-химической среды, допускающей после консервации в вакуоли кристалла свое возрождение до исходного состояния при нагревании включающего эндогенного минерала до термодинамического уровня его былой кристаллизации.*

Уже из этого определения следует, что включения в минералах далеко не одинаковы. Одни из них не имеют прямого отношения к образованию включающего минерала, а другие, наоборот, имеют непо-

средственное отношение к его генезису и очень разнообразны по агрегатному состоянию, химическому составу и происхождению.

Каждый кристалл, обычно содержащий включения материнской среды, мы будем в дальнейшем называть *минералом-хозяином,* как это было принято еще в XIX веке.

В прошлом наиболее широкое внимание ученых привлекали включения акцессорных минералов или разнообразных по составу минеральных обломков, «засоряющих» природные кристаллы любого происхождения. Эти компоненты в виде твердых *включений* не представляют такой значительной генетической информации, какую мы получаем из совершенно другой, наиболее важной группы включений материнских геохимических сред.

Эти последние включения в широком геологическом обиходе называются газово-жидкими, что не точно отражает их существо, так как часто они могут представлять собой и плененные капли *затвердевших расплавов,* заполнявших микрополости в минералах магматического происхождения.

Вслед за А. П. Карпинским [34] такие включения материнских расплавов, газообразных и жидких растворов мы с 1949 г. называем *включениями минералообразующей среды,* образцы или порции которой были герметизированы в микровакуолях (порах) кристаллов, возникших в связи с теми или иными особенностями роста или регенерации минералов.

Г. Дейша не без оснований использует для обозначения этой группы включений латинский термин «лакуна», обозначающий в зоологии промежуток в живом теле, заполненный лимфатической жидкостью. *Лакуны кристаллизации* в его представлении — это пропуски (полости) в теле минералов, в которых оказались законсервированы капли маточных растворов или расплавов.

Как видно, и тот и другой термины отражают существо включений, представляющих собой консерваты порций материнской среды, из которой зародился и в окружении которой вырос каждый включающий их минерал.

Как будет показано далее, эти особые, но совершенно обычные в минеральной природе включения вне зависимости от их размеров являются действительно «живыми» эталонами герметизированных минералообразующих и преобразующих минералы сред. Они сохранились до наших дней, за редким исключением, в виде *целостных образцов физико-химических систем, допускающих свое возрождение* при искусственном изменении параметра температуры выше обычных условий изучения минералов в образцах, шлифах или других препаратах.

В процессе роста минералов они в подавляющем большинстве случаев надежно консервировались в своих вакуолях (лакунах) в том самом физико-химическом состоянии среды, которое отвечало данному моменту роста или регенерации каждого включающего кристалла-хозяина.

Как будет показано ниже, материальное заполнение таких вакуолей разнообразно, но оно генетически пропорционально и закономерно отвечает фазовому состоянию, термодинамическим параметрам и химическому составу былой минералообразующей среды, из которой и в окружении которой зарождались и росли минералы.

Посторонние, чаще твердые вещества могли попадать на грани роста лишь в случаях, если они присутствовали в этой подвижной среде. Они составляли уже относительно инертную компоненту этой среды, прямо не влияющую на ход кристалло-рудо-породообразования, но существенно отражающуюся на химическом составе включающих минералов при их изучении в статическом состоянии любыми современными точными методами.

Эти включения иногда являются причиной захвата порций минералообразующих сред и в этом случае можно выделять также *комбинированные* включения сторонних и материнских веществ.

Внимание исследователей и геологов-поисковиков эндогенных месторождений привлекали и будут привлекать изменения минералов рудовмещающих пород, которые несомненно связаны с воздействием на них растворов разного агрегатного состояния. Последние поступили к месту существования этих минеральных образований и выполнили в них свою преобразующую работу.

Если это воздействие не было очень радикальным, таким что прежние минеральные вещества превратились в совсем новые минеральные агрегаты, в минералах пород можно отчетливо различать лишь залечивание трещинок, при котором обязательно происходила самоконсервация включений преобразующих растворов.

Такие постгенетические для минералов измененных пород включения преобразующих растворов по всей своей сущности отвечают включениям рудообразующих сред, действовавших по соседству в благоприятных структурах локализации оруденения, например в трещинах.

Мы не можем не видеть синхронности в действии растворов для того и другого места минерализации и не должны отрывать друг от друга также минералообразующие и минералопреобразующие среды.

Включения тех и других аутентичны, хотя по отношению к включающим минералам руды и породы они разновозрастны.

Здесь нам представляется необходимым для классификации и точного понимания природы разнообразных включений в минералах остановиться на ряде терминов, встречающихся в литературе и затрудняющих или облегчающих понимание предмета.

Каждая наука интернациональна и поэтому в публикациях на разных языках при введении новых терминов для взаимопонимания были избраны латинский и отчасти древнегреческий языки. По существу это было единственным правильным приемом для формирования терминологии бурно развивающихся естественных наук XIX и XX веков.

Однако введение и применение греко-латинских элементов в международной научной терминологии требует известной осмотрительности. При этом совершенно обязательно для каждого ученого, заинтересованного в развитии данной отрасли науки, следить за этимологическим соответствием нового термина фактическому содержанию явления, которое он должен отразить. Кроме того, необходимо учитывать и иное значение введенного термина, если он был использован ранее другими учеными.

Новые термины, которые по необходимости приходится рано или поздно вводить в каждой отрасли науки, очень внимательно должны быть изучены, с тем чтобы они содействовали, а не затрудняли понимание ее существа.

Новое и без того входит в научную жизнь часто с большим трудом и, между прочим, легче всего препятствовать пониманию этого нового со стороны сложившихся ученых и для входящих в науку путем не точной, слишком расплывчатой или противоречивой терминологии, очень затрудняющей понимание предмета.

Именно поэтому ранее и в этой работе мы оказались перед необходимостью каждый раз уточнять научную терминологию, касающуюся исследований в области эндогенного рудообразования и в особенности применительно к изучению включений в минералах, даже если эти термины закреплены в специальных словарях.

Например, в «Геологическом словаре», т. 1, представлена правильная характеристика значения включений в минералах, но подразделение их только на «первичные» и «вторичные», как будет показано ниже,

является совершенно недостаточным (см. V часть книги), а подразделение на «ксеногенные» и «автогенные» просто неправильным.

К ксеногенным с 1929 г. относились все твердые включения минералов и обломков пород, а также жидкие капельки нефти, а к аутигенным — включения маточного раствора или расплава. Ни тот ни другой термины при углубленном понимании природы разнообразных включений не могут быть использованы в терминологии предмета, а тем более в классификации включений.

Ксеногенные в переводе означает чужеродные включения («ксен»— с греческого «чужой»), но многие твердые включения родственны минералу-хозяину потому, что кристаллизовались до него или даже вместе с ним, росли из одной и той же среды. Ниже описываются случаи включения битуминозных веществ, захваченных пирогенными минералами интрузивов, которые скорее всего возникли в результате синтеза углеводородов в остаточной магматической среде. Именно поэтому мы вместо термина «ксеногенные» используем для первой группы этих минералообразований термин *сторонние включения,* столь категорически не предопределяющий степень их родственных связей с включающими минералами.

В минералогии* и учении о полезных ископаемых термин «аутигенный» («автогенный») применяется в разном понимании, например в определении процесса термодинамометаморфического изменения горных пород, руд и минералов, происходящего без существенного участия растворов и метасоматоза. Таким образом, этот термин скорее подошел бы к метаморфизованным включениям, но они еще очень слабо изучены и в нашей классификации не могут быть рассмотрены детально.

Сами вариации этого термина, такие как «аутигенный» и «автогенный», затрудняют его понимание и использование из-за отсутствия должной строгости в значении первого элемента этих эпитетов («аут»— с английского «вне» или «вон», а «авто» — с греческого «сам»), что тоже ни с какой стороны не может содействовать четкому раскрытию природы включений расплавов и растворов в минералах.

Все включения в минералах подразделяются нами по их заполнению на следующие три большие группы (часть IV):

1) *твердые включения сторонних веществ;*

2) *углеводородные включения и битумы;*

3) *включения минералообразующих сред* (материнских растворов и расплавов) — затвердевшие, газовые и жидкие.

По генезису** (часть V) включения делятся на обычные — *нормальные* и не обычные — *аномальные.*

Дальнейшее подразделение включений на классы, виды и разновидности обосновывается в тексте и приводится в графиках и таблицах.

## Глава 11

## ТВЕРДЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ СТОРОННИХ ВЕЩЕСТВ

Эти включения индивидуальных кристаллов или их обломков, сферолитов и мельчайших частиц аморфных и пелитоморфных веществ позволяют видеть, что включающие их минералы консервировали не капли кристаллизующей среды, а механически захватывали твердые ча-

---

* См., например, «Курс минералогии» группы авторов под редакцией А. К. Болдырева.

** Нормальные включения минералообразующих сред представляют собой консерваты растворов и расплавов в виде цельных образцов их систем, а аномальные — включения или отдельные фазы систем или же остатки от этих позднее нарушенных систем.

стицы того, что уже в ней было или возникало одновременно с изучающимся кристаллом.

Такие включения представляют относительно ограниченные возможности для суждения о генезисе кристалла-хозяина, потому что сами они нуждаются в расшифровке физико-химических условий своего возникновения.

Однако твердые включения в минералах очень важны для целей изучения внутренней морфологии кристаллов, выяснения тонких парагенетических отношений в рудах и при изучении химического состава так называемых «мономинеральных» фракций.

В своих книгах [20, 22] мы подразделяли твердые включения на минералы-*«предшественники»* и *«присыпки»*, *«спутники»* и *«вростки»**. Обстоятельное рассмотрение генетического значения некоторых из них сделано Е. М. Лазько [41].

Характеристика твердых микровключений оказывается необходимой еще и потому, что они создают контраст для понимания включений расплавов, затвердевших после изоляции в вакуолях кристаллов и существенно способствуют уяснению образования последних (см. ниже «раскристаллизованные» и «аморфные» включения).

### *Включения минералов-«предшественников» и присыпок*

Явления поглощения мелких кристаллов очень часто наблюдаются в минералах, образовавшихся из расплавов. Эти очень обычные и давно описанные (Ф. Циркель и др.) акцессорные минералы магматических пород обычно захватываются более крупными по размеру кристаллами. Включения микрокристаллов в макрокристаллах в виде мельчайших зернышек, микролитов, иголочек, пластинок, тончайшей «пыли» иногда настолько многочисленны, что сильно влияют на состав минерала-хозяина, определяют его окраску, обусловливают астеризм и переливание цветов, вызывают различные другие оптические особенности включающего минерала.

В свою очередь эти акцессории, имеющие размеры в десятые и сотые доли миллиметра, как отмечает В. В. Ляхович [50], содержат в себе ультрамикрокристаллические включения и включения среды, что представлено им в тонких зарисовках К. И. Розанова (рис. 14). При увеличении микроскопа до 1000 раз во включениях циркона были обнаружены его «предшественники» в виде апатита, торита, рутила и рудного минерала, а в сфене — ультрамикровключения циркона, апатита и магнетита.

Определить такие мельчайшие акцессории бывает очень трудно, но при современной электронной и рентгеноспектральной технике иногда оказывается возможным. В лейцитах эффузивных пород уже давно известны твердые кристаллические включения зеленых авгитов, бурых гранатов, черного магнитного железняка, которые располагаются чаще всего параллельно бывшим граням роста кристалла-хозяина, выявляя его зонарное строение.

Характернейшая черта включений минералов-«предшественников» — *идиоморфизм*, являющийся для них важнейшим диагностическим признаком. Наиболее обстоятельно они изучены в прозрачных минералах пьезооптического, технического и ювелирного кристаллосырья, для которого все твердые и газово-жидкие включения являются очень большим дефектом.

---

* Выделенные тогда же «микроминералы-узники» представляют собой твердые фазы герметизированных систем минералообразующих сред, кристаллизовавшиеся из капель материнских растворов, плененных минералами.

В промышленных кристаллах мусковита из мамско-чуйских пегматитов Б. Е. Карским и Г. П. Луговским [35] были выявлены следующие включения-«предшественники», которые они называют реликтовыми: апатит, циркон, гранат, турмалин, ортит, биотит, полевые шпаты и кварц. Эти твердые включения существенно отражаются на электрической прочности конденсаторной слюды, обусловливая 20% всех пробоев.

Е. М. Лазько [41] очень обстоятельно описал твердые минеральные включения в горном хрустале с Алдана и Полярного Урала, резонно подразделяя их на «протогенетические», возникшие до образования кристаллов кварца, и «сингенетические», выросшие одновременно с ними. Как он отмечает, первые соответствуют нашим минералам-предшественникам, а вторые — спутникам. Эта его терминология не была использована нами по отношению к твердым микровключениям только потому, что она была использована нами ранее [22] и оказалась необходимой теперь при рассмотрении способов образования и генетической классификации включений минералообразующих сред.

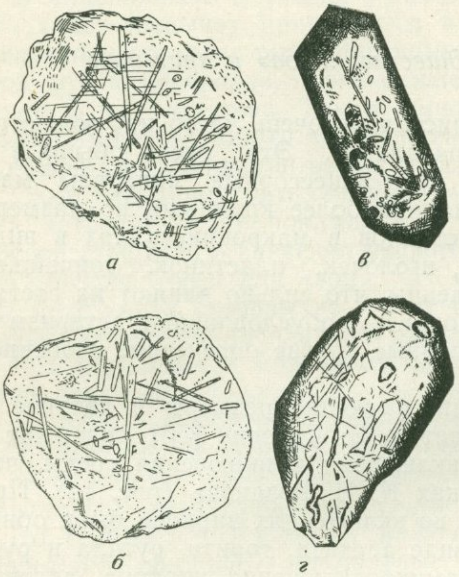



Рис. 14. Твердые и газово-жидкие включения в акцессорных минералах

*а, б* — многочисленные включения игольчатых кристаллов апатита, пластинок светлой слюды, кристаллов циркона и зерен эпидота в крупных зернах апатита. Гранит, Воронежский кристаллический массив; *в* — кристалл циркона с метамиктной периферией и многочисленными включениями кристалликов циркона и апатита. Коростышевский гранит, Украина; *г* — корродированный кристалл циркона, содержащий каплеобразные выделения циркона и неправильной формы газово-жидкие полости. Чудново-Бердичевские граниты, Украина

К протогенетическим включениям Е. М. Лазько в первую очередь относит игольчатые включения рутила, актинолита, тремолита и турмалина, которые концентрируются в параллельные или сноповидные пучки или создают внутри кристаллов-«волосатиков» сложные переплетения.

Уникальнейший пример «художественного ансамбля» твердых макровключений представлен в крупном прозрачном кристалле горного хрусталя с Полярного Урала на стенде 27 этажа Музея землеведения МГУ. На неровной стенке трещины кристаллизовался вначале серицит и выросли ориентированные внутри нее кристаллы турмалина и биссолита, «припорошенные» хлоритом. Выросший затем параллельно этой стенке кристалл горного хрусталя спокойно законсервировал внутри себя все эти минералы, создав полную иллюзию замерзшей реки, ее побережья в сугробах снега и таежного леса (рис. 15).

Ю. Л. Орловым [55] были определены и тщательно описаны твердые включения-предшественники в виде оливина, гранатов и хромшпи-

нелида в алмазах, которые он, несмотря на их идиоморфизм, почему-то относит к сингенетическим минералам. Судя по его зарисовкам, это типичные «протогенетические» минералы, за исключением хромшпинелида, о котором речь пойдет ниже.

Приведенные случаи консервации ограненных микроминералов в макрокристаллах очень обычны в минеральном мире и характеризуют



Рис. 15. Уникальный кристалл горного хрусталя с Полярного Урала с твердыми включениями, создающими эффект зимнего пейзажа тайги (из коллекции Музея землеведения МГУ)

образование тех и других из одной и той же минералообразующей среды, но в разное время.

В природных условиях включающие кристаллы могут образоваться значительно позднее и *не иметь даже отдаленной родственной связи* с включенными минералами, их осколками или обломками пород. Именно такие чужеродные включения относятся нами к типу *присыпок,* образующих иногда зоны в приютившем их кристалле свободного роста или неравномерно распределенную засоренность в его теле.

Такие включения минеральных обломков могут быть захвачены кристаллом даже принудительно, как это имеет, например, место при образовании насыщенного песком кальцита фонтенблоских песчаников, очень детально изученных Е. И. Лазаренко и О. И. Матковским [40]. На зарисовках включенных зерен кварца, полевого шпата, рутила, анатаза, циркона, граната, дистена, силлиманита, ставролита, эпидота и турмалина они показали и содержащиеся в этих зернах включения микроминералов-предшественников и минералообразующих сред. Такого рода детальнейшие исследования заслуживают подражания.

По составу, форме и размерам присыпки могут быть самыми разнообразными и чаще всего образуются путем оседания на грани роста минералов и их обломков, возникающих при тектонических подвижках и сотрясениях стенок резервуаров-кристаллизаторов.

Иногда на месторождениях горного хрусталя такие присыпки настолько обильны, что наружные зоны кристаллов имеют тонкослоистую осадочную текстуру эндогенной гидротермальной седиментации.

По мнению Д. С. Коржинского [38], присыпки на кристаллах могут возникать и путем высвобождения труднорастворимых минералов в результате выщелачивания растворами боковых пород. Именно таким образом чаще всего возникают скопления глинистых частиц, загрязняющих кристаллизующие растворы и медленно осаждающихся из них на гранях роста кристаллов.

Часто оседающие на поверхность обращенных кверху граней растущих кристаллов кристаллические частицы, находившиеся в растворе во взвешенном состоянии и возникшие несколько ранее или одновременно с кристаллом-хозяином (хлорит, гематит, сульфиды и др.), проявляют активность совместного роста с приютившим их минералом.

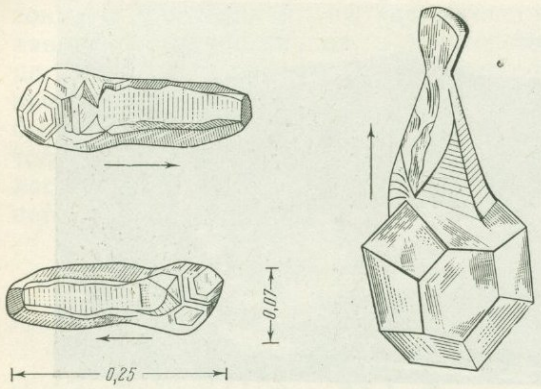



Рис. 16. Субсингенетические твердые включения в алмазах (по Ю. А. Орлову)

Такие случаи были установлены и описаны автором [16] на примерах с включениями пирита в кварцевых кристаллах месторождений Памира, пирита и халькопирита во флюорите Казнока (Гиссарский хребет), гематита на месторождениях Алдана.

Судя по скульптуре индивидуальных граней, они некоторое время продолжали свой рост уже после «посадки» на кристалл-хозяин и только потом были полностью изолированы им от питающей среды и законсервированы. Подобные включения минералов-спутников выявляют не только зонарное строение кристаллов, но и *внутренний микропарагенезис минералов*. Очень наглядные случаи взаимоотношений подобных минералов были позднее описаны и изображены Г. Г. Грушкиным для кварца и пирита месторождения Аурахмат [12, рис. 13]. В этих случаях внутреннее расположение субгедральных кристаллических включений находилось в закономерных отношениях как к самой форме кристалла-хозяина, так и к процессу его роста.

В таких случаях совместного роста двух кристаллических фаз, как это было доказано И. И. Шафрановским, В. А. Мокиевским и Г. И. Дементьевой [72], происходит закономерное взаимодействие элементов симметрии обоих, определяющее конечную внешнюю симметрию вросшего минерала-спутника.

Именно такой случай дорастания включенного в алмазе кристалла хромшпинелида наглядно изображен Ю. Л. Орловым [55]. Следует отметить, что направление вытянутости таких кристаллов-спутников и сложная форма их окончаний *фиксируют направление совместного роста* обоих кристаллов, обозначенное стрелками на рис. 16.

Включения-вростки наиболее наглядно характеризуют механизм длительного совместного роста пары минералов, который можно проследить при рассмотрении классических графических структур в пегматитах. Такие пегматитовые включения выделялись нами ранее [20] под названием «письменных» включений или «активных ихтиоглиптов», имеющих всегда индукционные грани с вмещающим их полевым шпатом.

Зародыши кварца, возникающие с началом роста кристалла полевого шпата или в другой, более поздний момент его образования, поскольку в среде остаточного расплава имелось значительное количество кремнезема, обнаруживали активный рост, стесненный включающим минералом-хозяином. Этот рост прекращался только в тот момент, когда продвигающийся фронт кристаллообразования полевого шпата изо-

лировал вершины кристаллов-ихтиоглиптов от питающей среды. Иногда это осуществлялось одновременно для многих ихтиоглиптов и тогда они оказывались как бы «обрезанными» гранью полевого шпата. Такой случай можно видеть на зарисовке А. Е. Ферсмана (1940) образца пегматита из Южной Норвегии (рис. 17).

В других случаях происходит индивидуальная консервация включений-вростков на разных уровнях роста минерала-хозяина или же полное замыкание их не достигается вплоть до завершения образования кристалла полевого шпата. Иногда при замедлении роста последнего происходит относительное, временное опережение в росте кварца и тогда в жидкой магматической среде «концы» ихтиоглиптов могут оформиться в виде хорошо ограненных головок пирогенного кварца и только потом законсервироваться полевым шпатом, возобновлявшем свою кристаллизацию. Такие случаи мы наблюдали, например, в пегматитах Кентского гранитного массива.

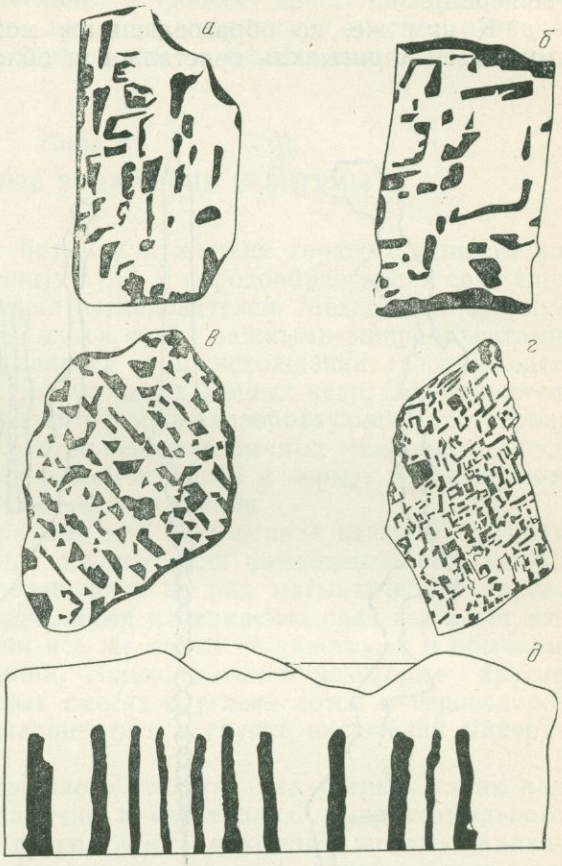



Рис. 17. Пегматитовые включения-вростки ихтиоглиптов кварца в полевом шпате (по А. Е. Ферсману)

*а* — ортоклаз-пертит (Средний Урал); *б* — розовый ортоклаз-пертит (Средний Урал); *в* — амазонит из Ильменских гор; *г* — ортоклаз-пертит (Средний Урал); *д* — микроклин-пертит из Титтере (Южная Норвегия)

Твердые включения-вростки могут кристаллизоваться не только из пегматитообразующей магматической среды, но и при кристаллизации пар минералов из гидротермальных растворов. Очень наглядные случаи этого были детально описаны В. А. Калюжным и Ю. В. Ляховым [33] для кварца-хозяина и касситерита и для топаза-хозяина и флюорита, росших совместно (но неравномерно) на поздних стадиях кристаллообразования в камерах пегматитов Волыни (рис. 18). Четкообразные, членистоидиоморфные или с индукционной штриховкой твердые включения-вростки аналогичны ихтиоглиптам кварца и с предельной наглядностью показывают направление и различия в скорости совместного роста их с вмещающим кристаллом.

Следует отметить, что твердые включения сторонних кристаллов в кристаллах вследствие разницы в их физических свойствах с минералом-хозяином (расширение и сжатие при изменениях температуры) вызывают напряжения и оптические аномалии вокруг себя в виде «гало» или даже образование мелких трещин.

Следует отметить, что твердые микро- и макровключения, так же как и включения материнских сред, требуют обязательного учета при интерпретациях спектральных и химических анализов и при расшифровке внутренних микропарагенезисов кристаллов.

Наблюдающиеся игловидные включения рутила, биссолита, гётита и других минералов в кварце-«волосатике» говорят о том, что они выросли в очень спокойных условиях действия застойных гидротермальных растворов, а затем были законсервированы внутри тела кристалла-хозяина. Это *минералы-«предшественники»* по отношению к включающему минералу.

К ним же, но образовавшимся может быть значительно ранее, относятся *«присыпки»* кристаллов и обломков чуждых минералов или

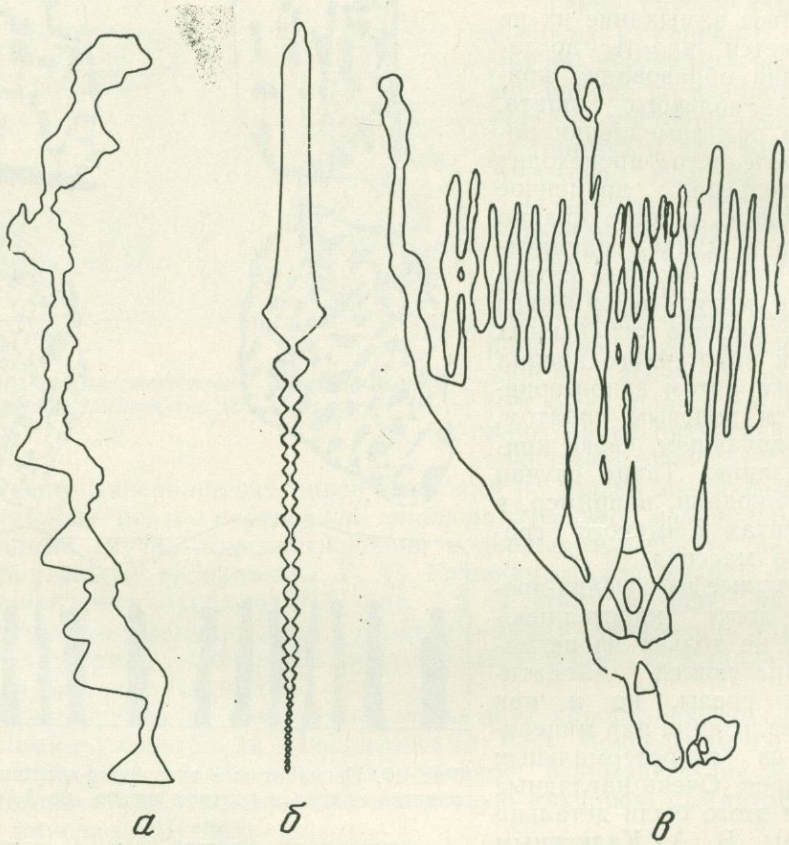



Рис. 18. Гидротермальные твердые включения-ихтиоглипты в кварце и флюорите Волыни (по В. А. Калюжному)

*а* — с индукционной штриховкой; *б* — частично идиоморфные; *в* — включения флюорита в топазе, ув. 60.

даже горных пород, попавшие на грани былого роста кристалла-хозяина. Эти включения — результат *эндогенной кластической седиментации,* подчиняющейся силе тяжести и поэтому они, как и приютивший их минерал, могут играть роль «отвеса», фиксирующего положение граней последнего в период его роста.

Во многих случаях грани включений кристаллов в кристаллах несут в себе признаки совместного, одновременного или частично одновременного (субсинхронного) роста, при котором значение возникновения индукционных граней является диагностическим для координаты времени. В этом случае мы такие твердые включения объединяем под названием включений *минералов-«спутников»,* а их разновидности — под названием *минералов-вростков и сростков.*

Во всех этих случаях твердые включения сохраняют *свою индивидуальность*, в частности внутреннюю структуру и форму, полученную ими ранее или одновременно с вмещающим минералом-хозяином. Таким образом, в классе твердых включений представляется обоснованным выделять два вида: «субгедральные» *минералы-предшественники и присыпки*, не ориентированные, пассивные к процессу кристаллизации минерала-хозяина, и «эвгедральные» *минералы-спутники и вростки*, активно развивавшиеся параллельно с угнетавшим их включающим минералом.

## Глава 12

## УГЛЕВОДОРОДНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ И БИТУМЫ

Включения затвердевших битумов и жидких горючих веществ во включениях минералов эндогенных рудо- и породообразующих сред еще не привлекли должного внимания исследователей. Между тем в будущем именно эти включения окажутся очень важными микрообъектами для окончательного решения вопроса о происхождении газообразных и жидких каустогенных веществ в условиях земных недр. Эти вещества не являются активными компонентами минералообразующих растворов, участвовавших в переносе и кристаллизации обычных минералов и руд (по-видимому, только за исключением графита и серы), но скопления их самих создавали нефтегазовые месторождения.

Они захватывались минералами как посторонние вещества водных растворов (вытяжки из пород), а также как компоненты остаточных щелочных расплавов и образовавшихся из них магматических пород. Рассмотрение их вместе с включениями материнских сред вызывает известные трудности, так как они все же почти не участвуют в обычном эндогенном минералообразовании. Только метан и некоторые другие углеводороды, обычно в газовых смесях с углекислотой и сероводородом, могут обоснованно рассматриваться в группе включений минералообразующих сред.

Еще в первой четверти прошлого столетия ряд ученых, таких как Брейслак, Дэви*, отмечали наличие в кристаллах гидротермального кварца из Дофине, Квебека и других мест включения желтых жидкостей, похожих на нефть, которые назывались ими «минеральным маслом». Сходная жидкость из бразильского топаза была описана Брюстером как углеводород.

Во второй половине XX века включения битуминозных веществ были установлены и в минералах пегматитов (массивы Хейвс, Норденшельд). Позднее наличие включений горючих веществ в гидротермальных кварцах и флюоритах отмечалось в нефтеносных районах (Рец и Бейер), в железорудных и полиметаллических месторождениях Швеции и США, в ртутных месторождениях Калифорнии и Испании, в кальцитах минерализованных пустот базальтов Монголии [54].

Включения жидких углеводородов желтого цвета раздельно и совместно с водными растворами нам довелось установить в 1951 г. в мелких ограненных кристаллах гидротермального кварца из района Майкопа. При вскрытии этих включений их содержимое вследствие удаления легкой фракции углеводородов быстро трансформировалось в аморфную массу загустевшего битума.

Первое описание включений битумов в минералах было осуществлено в нашей стране К. К. Матвеевым [52]. Они были установлены

---

* Названия работ зарубежных ученых XIX и первой половины XX века, упоминающихся здесь и ниже без обозначения года, см. по обзору Ф. Г. Смита. Изд-во иностр. лит., 1956.

в серовато-бурых шеелитах Гумбейского гидротермального кварцево-жильного месторождения на Южном Урале. Эти посторонние вещества наблюдались им в изобилии в виде округлых буроватых включений, имеющих размеры от 0,3 до 0,01 *мм* и много меньше. При сухой перегонке до температуры 525° С из растертой в порошок пробы шеелита получался буровато-желтый горючий и пахучий флюоресцирующий конденсат, обладающий всеми свойствами битума, в том числе и растворимостью в органической бензольно-спиртовой жидкости. Аналогичными исследованиями в морионах Мурзинки им были установлены в экстракте сходные с битумами смолоподобные вещества примерно в тех же количествах, что и в шеелите месторождения Гумбейка (0,1—0,12% от навески минерала).

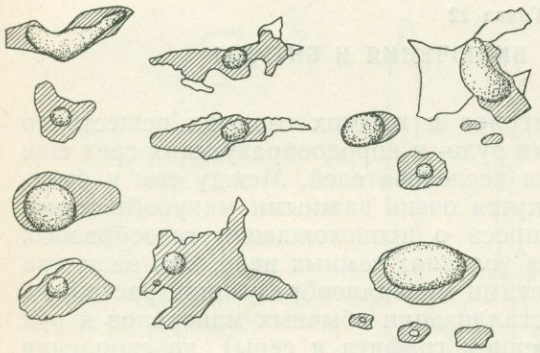


Рис. 19. Нефтегазовые включения в целестинах и кальцитах Таджикистана (по В. В. Магаровскому)

Жидкие включения углеводородов — бурых и желтых керосиноподобных веществ — встречаются в гидротермальных минералах и особенно в самых распространенных среди них — кварце и кальците. Эмульсионные капли этих жидких углеводородов, попадавшие в водные растворы главным образом *путем вытяжки* из нефтематеринских битуминозных осадочных пород, оставшихся на глубине, прилипали к граням кристаллов и капсулировались в процессе их роста. При этом вместе с каплями нефти иногда консервировался и материнский водный раствор с образованием трехфазовых комбинированных водно-углеводородных включений. В связи с тем, что эмульсионный гидротермальный или вадозногидротермальный раствор имел иногда относительно высокую температуру, в герметизированном включении при охлаждении кристалла после его образования происходило сокращение объема водно-углеводородного заполнения вакуолей с образованием пузырька, сформированного газами того и другого вещества.

Если при относительно высокой температуре капсулировался только жидкий углеводород, то и он претерпевал сжатие, а вакуум заполнялся горючим газом легкой фракции. Именно поэтому жидкие нефтеподобные включения в гидротермальных минералах обычно бывают двухфазовыми, т. е. *нефтегазовыми* и реже жидкими, однофазовыми.

В. В. Магаровский [53], задокументировавший в целестине и кальците такие включения — вытяжки углеводородов (рис. 19), обеспечил их бутиминологический анализ (табл. 6).

При среднем содержании бутимов 50 *г/т* он оценивает содержание нефтяного вещества, находящегося на месторождении во включениях в целестине, в несколько десятков тонн и убедительно показывает, что оно было извлечено в процессе циркуляции вадозных гидротерм из битуминозных осадочных пород.

Менее понятны по происхождению битуминозные вещества нефтяного ряда в газовых включениях из минералов хибинитов и их пегматитов, изученные С. В. Икорским [27, 29] и И. А. Петерсилье [56].

Авторы рассматривают их как продукты щелочного расплава заключительной стадии магматического минералообразования, когда мог быть возможен химический синтез сложных углеводородных соединений. Последние в качестве поздних образований были капсюлированы в вакуолях вторичных включений в виде газов, жидкостей и твердых, чаще

Таблица 6

**Содержание и типы битумов в целестине и кальците Таджикистана**

| Цвет минерала | Содержание битума, % | | | Отношение хлороформа к спирто-бензолу | Тип битумов | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | в хлороформе | в спирто-бензоле | общее количество | | хлороформ | спирто-бензол |
| Целестины | | | | | | |
| Густо-голубой | 0,0025 | 0,0025 | 0,0050 | 1:1 | ОБ | ОБ |
| Голубой | 0,0050 | 0,0037 | 0,0087 | 1,4:1 | ОБ | СБ |
| Голубовато-белый | 0,0037 | 0,0037 | 0,0074 | 1:1 | ОБ | ОБ |
| Голубоватый | 0,0025 | 0,0025 | 0,0050 | 1:1 | ОБ | СБ |
| Белый | 0,0018 | 0,0025 | 0,0047 | 1:1,4 | ЛМБ | ПБ-ЛМБ |
| Голубоватый | 0,0012 | 0,0018 | 0,0030 | 1:1,5 | ЛМБ | МБ |
| Кальцит | | | | | | |
| Светло-коричневый | 0,0025 | 0,0037 | 0,0062 | 1:1,5 | ЛМБ | СБ |

Примечание. ЛМБ—легкий маслянистый битум; МБ—маслянистый битум; ОБ—осмоленный битум; СБ—средний битум; ПБ—«почвенный» битум.

аморфных и реже кристаллических фаз сероуглеводородного состава, требующих точной диагностики.

В Хибинском и Ловозерском интрузивных массивах вместе с газообразными углеводородами, по данным И. А. Петерсилье [56], установлены включения аморфных нафтидов, в составе которых доминируют парафиновые углеводороды, в меньшей мере нафтеновые и ароматические. В битумах нефелинов из уртита содержится: С — 84,9%, Н — 13,3%, и N+O+S—1,8%. Эти битумы при нагревании до 50—60° С становятся жидкими, при 220—240° С вскипают, а при 600—640° С, по его данным, переходят в газообразное состояние.

С. В. Икорский изучал включения углеводородов в сине- и ультрафиолетовых лучах и исследовал их с применением метода микротермометрии и анализов элементарного состава. Результаты анализов хлороформенного экстракта битума в магматических минералах (вес. %) приведены в табл. 7.

Таблица 7

**Содержание углеводородов в магматических минералах Хибин**

| Породы и минерал | Содержание битума, вес. % | Элементарный состав, вес. % | | | Отношение C:H |
|---|---|---|---|---|---|
| | | C | H | N+O+S | |
| Пегматиты | | | | | |
| Нефелин | 0,0021 | 74,43 | 7,12 | 18,45 | 10,4 |
| Эвдиалит | 0,0024 | 71,74 | 7,99 | 20,27 | 9,0 |
| Трахитоидные хибиниты | | | | | |
| Нефелин | 0,0037 | 88,16 | 11,19 | 0,65 | 7,8 |
| Калинатровый полевой шпат | 0,0048 | 75,80 | 4,97 | 19,23 | 15,2 |
| » » » | 0,0037 | 72,24 | 4,60 | 23,16 | 15,7 |
| Щелочные метасиликаты | 0,0023 | 62,38 | 7,12 | 30,50 | 8,7 |

В газово-углеводородных включениях в эвдиалите выделения аморфных и кристаллических битумов люминесцируют в голубоватых и желтых тонах. При нагревании до 330—370° С они частично переходят

в газообразное состояние с выделением коричневатой жидкости, при температуре 450—480° С целиком переходящей в газ. При последующем охлаждении, начиная с температур 250—270° С, происходит конденсация паров битума в бесцветную жидкость, люминесцирующую в сине- и ультрафиолетовых лучах (фототабл. I, *б*).

Следует отметить, что установленные внутри этих включений С. В. Икорским [65] кристаллики виллиамита (NaF) в столь широком температурном диапазоне их испытания не подвергались растворению или каким-либо другим изменениям, что прямо свидетельствует об относительно инертном поведении углеводородов в системах подвижных минералообразующих сред.

Из приведенных примеров можно также сделать заключение о рациональности подразделения класса углеводородных (каустогенных) включений на два вида: *нефтегазовые* (латераль-секреционные) вытяжки из окружающих пород, осуществленные ювенильными или (см. фототабл. I, в) реже вадозными водными растворами, и *синтетические* углеводороды и битумы, субсингенетические включающим их минералам щелочных интрузивно-магматических пород и возникшие в восстановительных условиях реакций распада и синтеза $H_2O$ и $CO_2$ до $CH_4$*.

Однако следует прямо признаться, что несмотря на большой теоретический и практический интерес, который имеют разнообразные включения углеводородов и окисленных битумов в магматических, пегматитовых, гидротермальных и других минералах, их учет и изучение остаются в геолого-минералогических науках еще на незаслуженно низком уровне.

Это положение, вероятно, связано с тем, что минералоги и геологи считают их чуждыми для себя, а геологи-нефтяники еще не обращают должного внимания на природные микроконсерваты включений в минералах.

## Глава 13

## КЛАССИФИКАЦИЯ ВКЛЮЧЕНИЙ КОНСЕРВАТОВ ОБЫЧНЫХ МИНЕРАЛООБРАЗУЮЩИХ СРЕД ПО ИХ СОСТАВУ И ФАЗОВОМУ СОСТОЯНИЮ

В настоящей работе мы рассматриваем возможности изучения процессов и явлений рудообразования, происходивших в недоступных для непосредственного обозрения глубинах земной коры и относящихся к далекому геологическому прошлому, измеряющемуся десятками и сотнями миллионов лет. Такая задача сейчас не представляется фантастической только потому, что природа сохранила для нашего внимания прямых свидетелей процессов и явлений эндогенного минералообразования в виде *консерватов* очень разнообразных минералообразующих расплавов и растворов, герметизированных в минералах — продуктах данных процессов.

Эти включения позволяют нам визуально и с помощью экспериментов и анализов восстанавливать былые физико-химические параметры действия минералообразующих сред в каждой данной геологической обстановке формирования почти любого эндогенного месторождения.

Как будет показано ниже, поле нашего зрения на происхождение

---

* По-видимому, именно такие синтетические углеводородные газы выделяются в очень больших количествах (около 500 млн. *м*$^3$/*год*) из их глубинного источника в докембрийских породах, вмещающих знаменитое золоторудное месторождение Витватерсранд в ЮАР (ежегодная добыча золота около 500 *т*). Вентиляционная струя только одного из газообильных участков этого огромного рудника выносит в среднем 36 700 *м*$^3$/*сутки* углеводородного газа эндогенного происхождения.

глубинного минерального мира весьма расширяется при рациональном использовании ансамблей включений, характеризующих определенные геохимические условия минералообразования.

Даже в далеком будущем геолого-минералогических наук вряд ли будут найдены более точные показатели для познания древних глубинных процессов рудообразования, чем герметически замкнутые в кристаллах физико-химические системы включений — образцы минералообразующих и преобразующих активных сред, которые были носителями энергии и вещества, обеспечивших процессы кристаллизации минералов пород и руд.

В дальнейшем можно будет только достигнуть новых возможностей более полного и точного их использования для развития теории эндогенного рудообразования, практики поисково-разведочных работ и выращивания дефицитных минералов. На этом пути, по нашему мнению, не будет встречено тупика в познании закономерностей развития глубинного минерального мира, начиная с его отдельных представителей (онтогения минералов)* и кончая сложными сочетаниями их в постмагматических месторождениях глубинного образования (филогения минералов).

В абсолютно закономерных «сооружениях» природных кристаллов, состоящих из «кирпичей» — ионов, атомов и радикалов, очень редко молекул, как правило, обнаруживаются дефекты их упаковки в виде пор (вакуолей), в которых законсервировались микропорции окружающей среды, обеспечивавшей кристаллизацию. Эта среда является той жидкостью или газом (расплав, раствор, флюид), в которых относительно свободно, но по-разному происходило перемещение элементарных частиц материи (ионов, атомов, молекул), организующихся при изменениях физико-химических параметров в кристаллы того или иного минерального вещества и в закономерные ассоциации кристаллов в виде руд или магматических пород. Являясь результатом действия минералообразующих растворов и расплавов, руды или породы сами по себе дают лишь ограниченные или только самые общие возможности для суждения о физико-химических условиях образования.

Именно в этом вопросе для глубокого минералогенетического познания по аналогии с белковыми клетками, атомами и молекулами — главными объектами изучения биологов, физиков и химиков — у нас выступают законсервированные в кристаллах микропорции включений минералообразующих сред, редко достигающие макроскопических размеров.

Включения минералообразующих сред по мере непрерывного развития новых методов и техники их изучения, в сочетании с данными геологии, минералогии и геохимии дают в руки исследователей минерального мира земной коры все более полные и очень важные *объективные показания в области генетического познания глубинных процессов и явлений минералообразования,* продукты которых надолго оказались зафиксированы в виде минералов и их агрегатов.

Выдающиеся ученые прошлого — Г. Сорби, А. П. Карпинский, Я. В. Самойлов и др. — высоко оценивали генетическое значение включений, что можно видеть хотя бы из эпиграфов, приведенных к этому разделу книги.

Однако, несмотря на это, *систематическое изучение* включений и использование полученных по ним фактов началось в нашей стране

---

* Под онтогенией минеральных индивидов мы подразумеваем их рост в материнской среде того или иного состава и агрегатного состояния, происходящий в условиях изменений термодинамических параметров и реакций минералообразующих растворов, но не онтогению минералов в понимании Д. П. Григорьева [10], которая оторвана от физико-химической среды рождения минералов, т. е. является *онтографией,* а не *онтогенией,* так же как петрология не является петрографией.

лишь около четверти века назад (40-е годы XX столетия), а в США, Франции, Канаде и в других странах еще позднее.

Длительная, но очень неравномерная и прерывистая история изучения газово-жидких включений с первой половины XIX века характеризовалась большими застоями, кризисами и даже тупиками. Между тем включения образцов минералообразующих сред являются самыми обычными «микрокомпонентами» всех эндогенных минералов, они столь

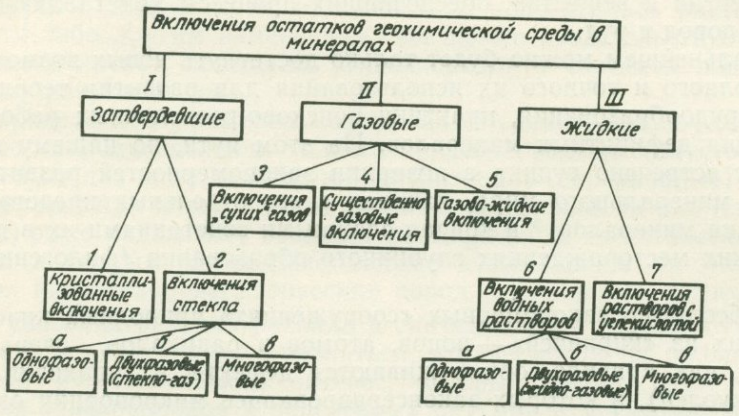



Рис. 20. Включения остатков геохимической среды в минералах (по Н. П. Ермакову)

же важны для генетического познания минеральной природы, как геологические обнажения и парагенезисы руд и пород. В зависимости от состава и физического состояния подвижных минералообразующих сред и от существовавших на глубине условий, температуры и давления, мы в таких включениях при обычных условиях наблюдаем уже не гомогенные капли расплавов и растворов, а гетерогенные *эталонные природные системы* с тем или иным, иногда очень большим количеством «внутренних» фазовых границ, измеряющихся и вполне доступных для точного изучения под микроскопом при нагревании и охлаждении.

В различных геологических ситуациях нахождения эндогенных образований слагающие их минералы обнаруживают очень разные по составу и состоянию включения материнских сред.

Например, в вакуолях кварца гранитоидов еще Г. Сорби было найдено кристаллическое заполнение («каменные полости»), в фенокристаллах эффузивных пород обнаружены «стеклянные полости», минералы кварцевых жил заключали в себе «много жидкостных пор с водой, содержащей в растворе хлористый калий и натрий, сернокислый поташ, сернокислую соду, известь и свободную соляную кислоту».

Однако в прошлом веке многое еще оставалось неясным, в первую очередь из-за слабого развития начал теории минералообразования, отсутствия четких представлений о механизме возникновения включений, из-за невозможности создания тонких методов и техники их экспериментального исследования.

После систематического семилетнего изучения включений в минералах, отобранных из разнообразных генетических типов эндогенных месторождений и магматических пород, нам представилось возможным в 1948 и 1949 гг. дать первую классификацию этих включений по их составу и состоянию, а в 1950 г. установить соотношения между современным содержимым включений и былой природной средой зарождения и роста минералов, определяющей их генезис (рис. 20).

Наблюдающиеся в минералах включения материнских сред оказа-

лись очень разнообразными и поэтому возникла необходимость их дальнейшей детальной классификации в увязке с геологическими условиями нахождения включающих минералов. В первом приближении эта задача была достигнута в 1957 г., а во втором в 1968 г. [23].

### *Принципы, номенклатура и классификация включений по их составу и состоянию*

Известно, как велико для развития каждого естественно-научного направления значение генетической классификации природных процессов и явлений, их прямых свидетелей и производных. Через генетическую классификацию обнаруживается место частного в общем и выявляется на каждой стадии развития науки уровень понимания причинных связей. В то же время классификация и номенклатура явлений и предметов обеспечивают взаимопонимание для всех ученых, работающих в узкой или широкой области знаний.

После ряда лет систематических наблюдений и экспериментов над включениями минералов из генетически различных месторождений нам пришлось заняться вопросами классификации этих микрообъектов [18]. Необходимость в этом год от года назревала уже в работах таких крупных ученых прошлого века, как Г. Сорби (1858 г.), А. П. Карпинский [34], Ф. Циркель (1893 г.), Г. Розенбуш и Е. Вюльфинг (1904 г.) и др. Однако их попытки систематики включений были фрагментарными и носили формальный характер, в большой мере отражающий описательное направление в науках прошлого века.

Отсутствие необходимой техники для возрождения активности и первичного состояния заключенных образцов минералообразующих сред в кристаллах вполне оправдывает недостатки и пробелы в их представлениях о природе включений.

Здесь следует отметить, что вплоть до сороковых годов нашего века нагревание включений под микроскопом было ограничено пределом 200—220° С. После того как нам удалось изменить принцип испытания препаратов в жидкой (водной или парафиновой) среде и перейти на воздушную среду [16], стало возможным исследование включений в очень широком интервале температур и восстановление их первичного состояния в вакуолях минералов.

Для подразделения включений минералообразующих сред на *классы* в 1948 г. было избрано *физическое состояние и состав первоначального заполнения* пространства в вакуолях включений при былых термодинамических условиях минералообразующей среды. Оказалось, что консервация вещества включений минералообразующих сред могла происходить в виде ранее *жидких,* а теперь затвердевших *расплавов,* в виде гидротермальных *водных и водно-углекислых жидких истинных и коллоидных растворов,* в виде *минералообразующих* и *инертных газов и газообразных соединений* и парообразных туманов.

Для большинства случаев удается правильно диагностировать первичное физическое состояние заполнения вакуолей в минералах, изменившееся при снижении температуры до комнатной, путем простых визуально-оптических наблюдений и измерений фаз под микроскопом.

Однако в ряде сложных случаев точная диагностика становится доступной только с помощью искусственного нагревания препаратов, приводящего к восстановлению первичного гомогенного состояния включений (метод гомогенизации). При этом каждый исследователь может, например, убедиться в том, что кристаллическое или аморфное заполнение вакуоли *затвердевшего* включения превращается в каплю первичного магматического расплава, заполнение двух- и многофазово-

го при комнатной температуре жидкого включения — в гомогенную каплю гидротермального водного, реже водноуглекислого раствора и т. п.

Часто встречающиеся в пегматитах, грейзенах и скарнах *газовые* включения, даже те, в которых кроме жидкости при охлаждении выделились и твердые фазы, при положительной температуре в первые сотни градусов приобретают исходное, целиком газовое заполнение своих вакуолей.

Обратное охлаждение минералов с включениями этих классов до комнатной температуры приводит к восстановлению их систем, иногда сопровождающемуся очень наглядными процессами кристаллизации минералов-узников из герметизированных проб жидких и газовых растворов.

Трудно представить себе более наглядные доказательства глубинного пневматолиза, чем минералообразование из природных образцов газовых сред, законсервированных в вакуолях включений и фиксированное с помощью фото- и кинодокументации их в кристаллах, выросших в камерах пегматитов или в ранних минералах грейзеновых и скарновых месторождений.

Никак невозможно отрывать общие геолого-минералогические данные от изучения (тем более от экспериментальных исследований) систем рудообразующих сред, герметизированных в минералах, принадлежащих к определенному геолого-генетическому типу месторождений.

В дальнейшем все это будет показано с подробностями, достаточными для современного уровня познания глубинных процессов и явлений. Однако и здесь, особенно в связи с вопросами классификации микрообъектов включений, мы оказались вынуждены забегать несколько вперед, чтобы затем снова возвратиться к этим вопросам на конкретных примерах минеральных ассоциаций и месторождений.

К сожалению, в литературе предмета мы до последнего времени все еще встречаемся с недооценкой установленных многими исследователями связей между особенностями состава и состояния самих микрообразцов минералообразующих сред и генетическими типами месторождений, к рудам которых принадлежат включающие минералы.

Против такого отрыва от геолого-минералогических данных мы были вынуждены протестовать ранее и протестуем сейчас, потому что весьма условное или формальное отношение к любым нашим объектам исследования, без проникновения в их сущность, противоречит элементарной методологии познания минеральной природы.

Один из важнейших вопросов, радикально содействующий развитию науки, связан с установлением взаимосвязей процессов и явлений, представленных в виде объективной классификации порожденных ими объектов природы.

Эти классификации и номенклатура классифицируемых объектов далеко не всегда создаются с должной степенью ответственности перед геологами, специально не занимающимися той или иной узкой областью геолого-минералогических знаний.

Иногда даже «узкие» специалисты могут лишь с очень большими трудностями установить смысл или отсутствие смысла в той или иной классификации, хотя дезориентирующее влияние некоторых из них почти очевидно.

От одной из этих классификаций мы оказались вынуждены отмежеваться в самом конкретном виде. Ее автор позволил себе необоснованно утверждать, что она опирается на известные наши представления и построения [20, 22] (рис. 21).

Мы имеем в виду классификацию В. А. Калюжного [31, 32], представленную на рис. 22. Автор этой классификации писал, что она составлена «на основании известных ранее построений Г. Г. Леммлейна

[45], Н. П. Ермакова [20, 22], Ф. Г. Смита [63] и других. В отличие от них, однако, мы (т. е. В. А. Калюжный. — *Прим. ред.*) положили в основу схем следующие принципы: 1) четкое разграничение систематики по составу и генезису; 2) при делении на группы и подгруппы преиму-

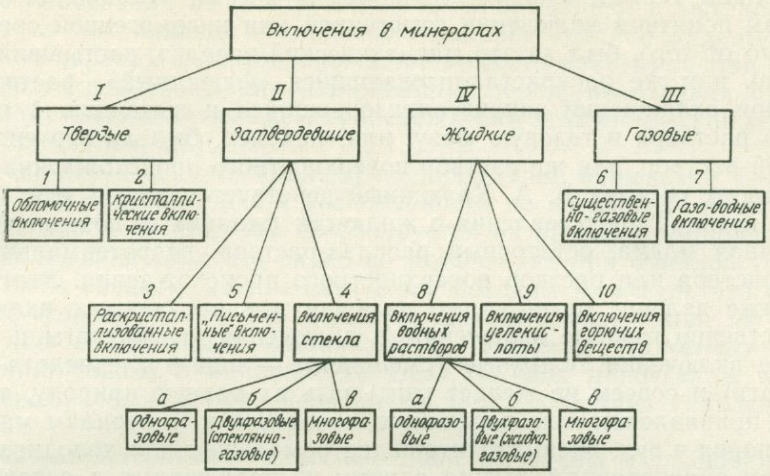



Рис. 21. Классификация минеральных включений по их составу и состоянию (составил Н. П. Ермаков, 1949 г.)

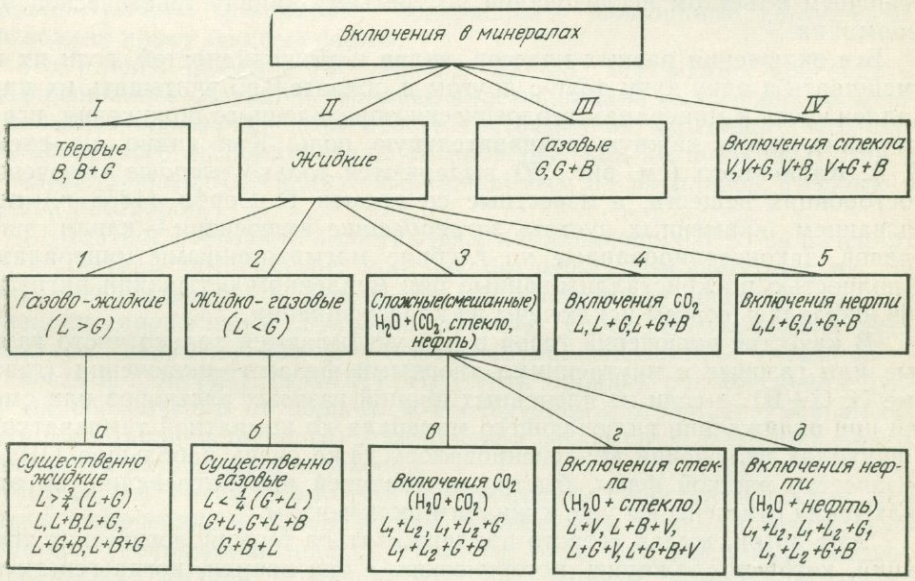



Рис. 22. Классификация включений в минералах по их составу и агрегатному состоянию (по В. А. Калюжному [32])

щества отдавались жидким включениям — основному объекту исследований; 3) граница раздела в подгруппах и типах включений производилась по количественному соотношению фаз, а не по температурам гомогенизации; количественная оценка фаз нашла свое отражение и в буквенных обозначениях типов включений; 4) систематика по составу и состоянию отражает первый начальный этап визуального микроскопи-

ческого исследования включений с последующим уточнением по данным главным образом химических исследований содержимого включения» [32].

Мы не беремся судить о мнении других авторов «известных ранее построений», в частности Г. Г. Леммлейна [45], который писал:... «Мы употребляем термин «жидкие включения» весьма условно, объединяя под этим понятием включения гомогенной или ингомогенной среды независимо от того, был ли это магматический расплав, застывший затем в стекло, или же раскристаллизовавшийся «флюидный» раствор-расплав, при охлаждении закристаллизовавшийся и выделивший остатки водного раствора и газовую фазу, или, наконец, был ли это гидротермальный раствор, или же раствор поверхностного происхождения».

В своих работах В. А. Калюжный действует также с этих безразличных позиций представления о жидкости (жидких включениях), будь-то обычная магма, остаточный расплав-раствор, гидротермальный горячий раствор или раствор поверхностного происхождения. Этот автор идет даже дальше, недопустимо включая в класс жидких включений и существенно газовые включения, и включения углекислоты и нефти, а также включения сложные (смешанные — вода+углекислота+стекло+нефть) и совсем не желает учитывать их разную природу, определенную принадлежностью различных включений к минералам магматических пород и руд, пневматолито-гидротермальным или холодноводным вадозным образованиям. Ни по одному из положенных в основу этой классификации нескольких принципов ее автор не достигает «четкого разграничения» микрообъектов. По произвольному усмотрению он отдает «преимущества жидким включениям», которые отнюдь не являются основным объектом исследований по третьему каналу генетической информации.

Все включения разных классов, видов и разновидностей, если их не смешивать в одну кучу друг с другом и обязательно учитывать их принадлежность к минералам геологически определенного положения, играют свою, очень важную познавательную роль. Как видно, на схеме В. А. Калюжного (см. рис. 22) выделяются только *твердые* включения посторонних веществ, а известные со времен Г. Сорби (1858 г.) под названием «каменных пустот» *затвердевшие* включения — капли расплавов, законсервированные на глубине магматогенными минералами и полностью раскристаллизованные при медленном остывании интрузивов, оказались совсем исключены из классификации.

В качестве включений газов в ней учитываются только чисто газовые или газовые с внутренними твердыми фазами включения (газовые G, G+B), а если из плененных порций газовых растворов или смесей при охлаждении включающего минерала до комнатной температуры в вакуолях включений конденсировалось даже очень небольшое (10%) количество жидкой фазы, быстро исчезающей при нагревании, то эти включения отнесены им уже к жидким включениям.

Этот автор, желая «строго придерживаться терминологических традиций, которые сложились исторически», с тех времен, когда генетическая природа заполнения разных включений была еще не выяснена, придает термину «жидкие включения» очень широкое понимание, совсем тушующее их значение как свидетелей соответствующей генетической области гидротермального минералообразования.

К жидким сложным включениям в классификации отнесены не только существенно газовые включения, всегда гомогенизирующиеся в газовой фазе при восстановлении параметра температуры, но даже первичные включения вулканического стекла, характерные для фенокристаллов эффузивных пород, в которых чрезвычайно редко (в одном-двух случаях) исследователями прошлого века без точной диагностики было отмечено наличие воды, попавшей внутрь в процессе наложенного

гидротермального метаморфизма эффузивных пород (Г. Сорби, 1858 г. и др.).

Забегая вперед, отметим, что ученые того времени, за очень редкими исключениями, еще не различали сингенетических и эпигенетических по отношению к минералу-хозяину включений и не применяли метода гомогенизации из-за отсутствия нужной техники и методики. Некоторые из них широко использовали наличие «водяно-жидких» включений в минералах гранитов в качестве прямого доказательства осадочно-морского происхождения изверженных пород, не отдавая отчета о вторичном, постмагматическом происхождении этих включений (А. Брайсон, Д. Филлипс и др.).

Предложенный нами принцип подразделения включений минералообразующих сред на *виды и разновидности* по их составу и состоянию наиболее прост. В основном он базируется на визуально-микроскопическом наблюдении того, что видно во включениях при обычной температуре. Таким образом, в этом случае мы исходим из результата окончательного формирования фаз вещества каждого включения, *из наблюдений над современным состоянием и деталями «строения» систем включений*, только в наиболее трудных случаях прибегая к экспериментальному выявлению первоначального состояния заключенного вещества.

Усовершенствование классификации по видам и разновидностям включений стало возможным только после накопления дополнительного коллективного опыта в их изучении. В первую очередь должны быть отмечены наблюдения таких исследователей, как Ю. А. Долгов [14], В. А. Калюжный [30] и др., которые по жидким и газообразным минералообразующим растворам, содержащим коллоидные компоненты, установили новые важные факты.

По нашим работам [18, 20, 21, 22, 23, 24] можно проследить, как развивалось совершенствование классификации включений на основе *главного принципа* — агрегатного состояния их первичного заполнения, доступного экспериментальной проверке как на природных, так и на искусственных минералах, выращиваемых из расплавов, газовых и жидких растворов.

Агрегатное состояние и состав фаз, наблюдающихся во включениях при комнатной температуре, при рассмотрении разнообразных их видов и разновидностей в свое время мы предложили фиксировать начальными прописными буквами русских слов: К — кристалл, А — аморфное вещество или С — стекло (вулканическое), Г — газ, Ж — жидкость и т. п. [22], стр. 121). При этом порядок расположения буквенных обозначений от первого к последующим отражает уменьшение объемного (количественного) соотношения фаз в двух- и многофазовых включениях расплавов и растворов.

Когда мы имеем возможности определять свойства и состав фаз внутри включений, к обозначениям прописными буквами необходимо добавлять уточняющие индексы строчных букв, как, например: жидкое водное — $Ж_в$, жидкой углекислоты — $Ж_у$, жидкой нефти — $Ж_н$, газа (пара) водного раствора — $Г_п$, углекислого газа — $Г_у$, легкорастворимые кристаллы-узники — $К_л$, труднорастворимые (обычно силикаты) — $К_т$, а рудные — $К_р$, аморфного вулканического стекла — $А_с$, геля — $А_г$, раскристаллизованного геля — $К_г$, коллоидной жидкости (золя) — $Ж_з$, смесь газов — $Г_х$ и жидкость неизвестного состава — $Ж_х$.

Эта буквенная номенклатура оказалась очень удобной для компактного обозначения состава и состояния видов и разновидностей включений, отражающих очень тонкие генетические различия в образовании кристаллов, их отдельных зон или же физико-химических условий преобразования минеральных индивидов и их агрегатов.

В самом деле даже такие формулы, характеризующие в общем

виде сложный состав и фазовое состояние включений, могут быть легко расшифрованы: $Ж_в+Ж_у+Г+К_л$ — водно-углекислые растворы, находящиеся в равновесии со своим газом и выделившие легкорастворимую твердую фазу. Если имеется два разных легкорастворимых минерала-узника, эта формула должна быть записана так: $Ж_в+Ж_у+Г+2К_л$, что будет обозначать пятифазовое включение смешанного раствора воды и углекислоты.

Используя указанные принципы и номенклатуру, мы представляем для использования усовершенствованную классификацию включений (рис. 23 и 24). Включения трех классов — затвердевших расплавов, газовых и жидких растворов — оказались очень важны для расшифровки магматического, пневматолитового и гидротермального минералообразования.

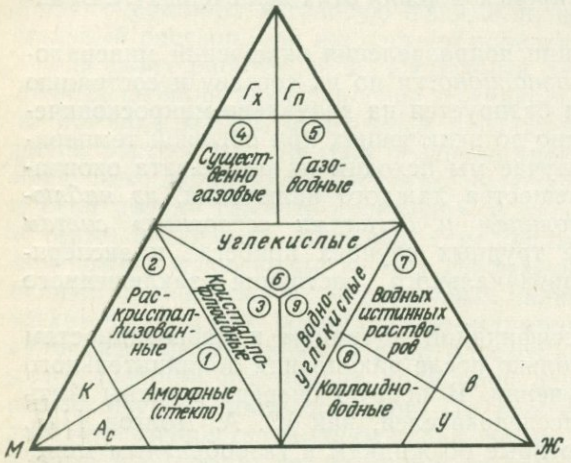



Рис. 23. Диаграмма классификации видов включений минералообразующих сред (по Н. П. Ермакову)

*М* — магматические расплавы; *Г* — газы; *Ж* — жидкие растворы; *А* — аморфные; *К* — кристаллические фазы; *В* — водные; *У* — углекислые; *П* — пар; *С* — стекло; *Х* — смеси газов

По современному состоянию доминирующего вещества в вакуолях включений, подчиняющихся по форме минералу-хозяину, в классе *магматических* (затвердевших) включений выделяется три вида: аморфные, раскристаллизованные и кристалло-флюидные (кристаллогазовые).

*Аморфные* включения вулканического стекла повсеместно развиты во вкрапленниках эффузивных пород. Они представляют собой плененные фенокристаллами при их росте микроскопически малые капли материнской магмы, испытавшей переохлаждение. Среди них очень редко встречаются разновидности однофазовых включений ($А_с$) и вследствие содержания газов в магме обычны аморфногазовые включения вулканического стекла с шарообразными пузырьками газов ($А_с \gg Г$), среди которых иногда встречается углекислота, ожиженная при комнатной температуре — $А_с > (Г+Ж_у)$. При замедленном застывании лав из законсервированных капель расплава иногда успевают выкристаллизоваться минералы-узники с образованием разновидностей включений $А_с+К$ и $А_с > (Г+К)$ (рис. 25).

*Раскристаллизованные* включения, представленные полнокристаллическим веществом с небольшими по объему газовыми обособлениями, развиты в минералах интрузивов. Такие включения в кварце и полевых шпатах гранитов, обычно очень мелкие, представлены в виде тонкозернистых агрегатов кристаллов полевошпатового, кварцевого и галоидного вещества, а также непрозрачных «пылинок» темноцветных минералов. Родственное включающему кристаллу вещество выделяется часто и по стенкам пор включений, лишая последние четких ограничений. Газовая фаза, если она различается, оказывается отжатой к периферии включения ($К \gg Г$), а когда она распределяется в интерстициях между минералами раскристаллизованных включений, то становится почти не различимой. Разновидность включений $К_т \gg К_л+Г$ особенно трудна для распознавания и обычно петрографами принимается за агрегаты акцессориев.

Описанные два вида включений характеризуют эффузивные и интрузивные условия обычного магматического минералообразования. При расшифровке таких условий следует иметь в виду, что наличие между ними промежуточных разновидностей со стеклом характеризует, с одной стороны, замедленное остывание лав в нижних потоках, а с другой — ускоренное охлаждение коры гипабиссальных интрузивов, особенно в зоне их закалки.

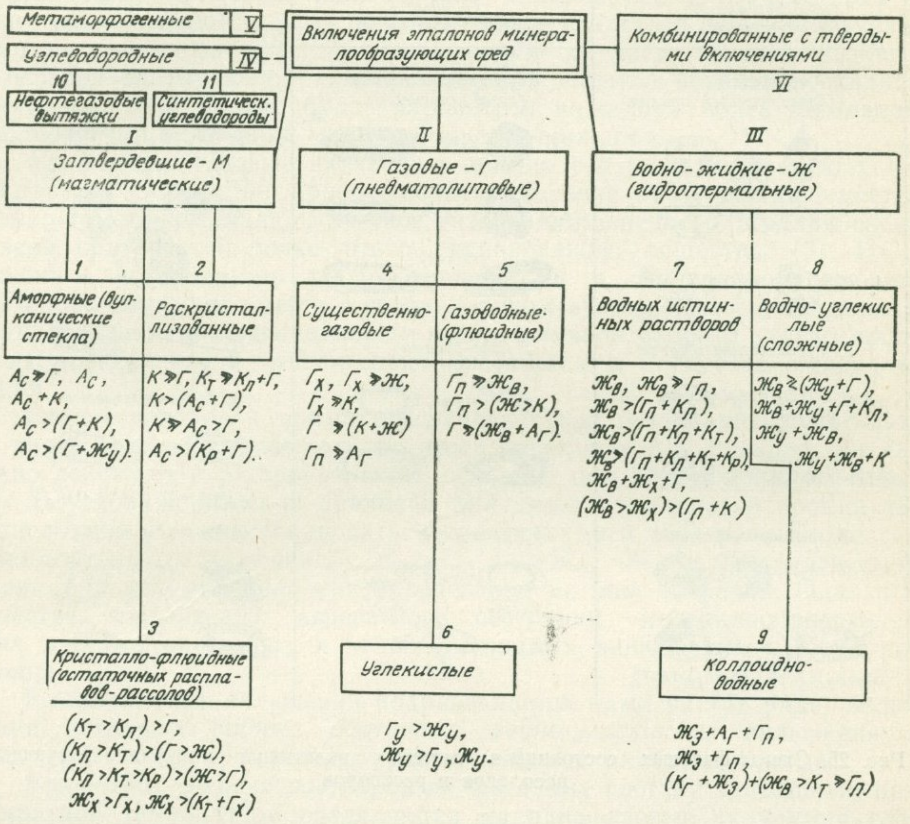



Рис. 24. Схема классификации включений образцов минералообразующих сред (по составу и состоянию)

*I—VI* — классы (типы) включений; *1—11* — виды включений; *М* — магматических расплавов и рассолов; *А* — аморфные; *К* — кристаллические; *Г* — газовые; *Ж* — жидких растворов; *в* — водные; *у* — углекислые; *п* — пар; *с* — стекло; *г* — гель; *з* — золь; *л* — легкорастворимый галоид; *т* — труднорастворимый силикат; *р* — рудный минерал; *х* — смесь газов или жидкость неопределенного состава

*Кристалло-флюидные* включения остаточных расплавов-рассолов имеют кристаллическое выполнение с *большим обособлением газов,* а иногда и с остаточной жидкой фазой в промежутках между кристаллами. Такие включения встречаются только в первичных минералах гранитных пегматитов. Кроме силикатов в заполнении вакуолей находятся кристаллы хлоридов и других галоидов, занимающие существенный объем. Этот установленный нами в 1957 г. вид кристаллогазовых включений с его двумя крайними разновидностями $(К_т > К_л) > Г$ и $(К_л > К_т) > (Г > Ж)$, так же как и включения $(К_л > К_т) \geqslant (Ж > Г)$, представляет собой эталоны остаточных пегматитообразующих расплавов-рассолов.

Представители первых двух видов класса затвердевших включений превращаются при нагревании в капли магмы в интервале температур 1100—1400° С, а гомогенизация включений третьего вида обычно происходит при температурах 600—800° С. Следует отметить, что затвер-

девшие включения вместе с вмещающими минералами и породами могут подвергаться пирогенному и гидротермальному метаморфизму с очень любопытными изменениями в веществе включений. Описание таких метаморфогенных включений мы здесь опускаем.

В классе *газовых* включений выделяются также три вида: *существенно газовые, газо-водные* и *углекислые включения* (см. рис. 25).

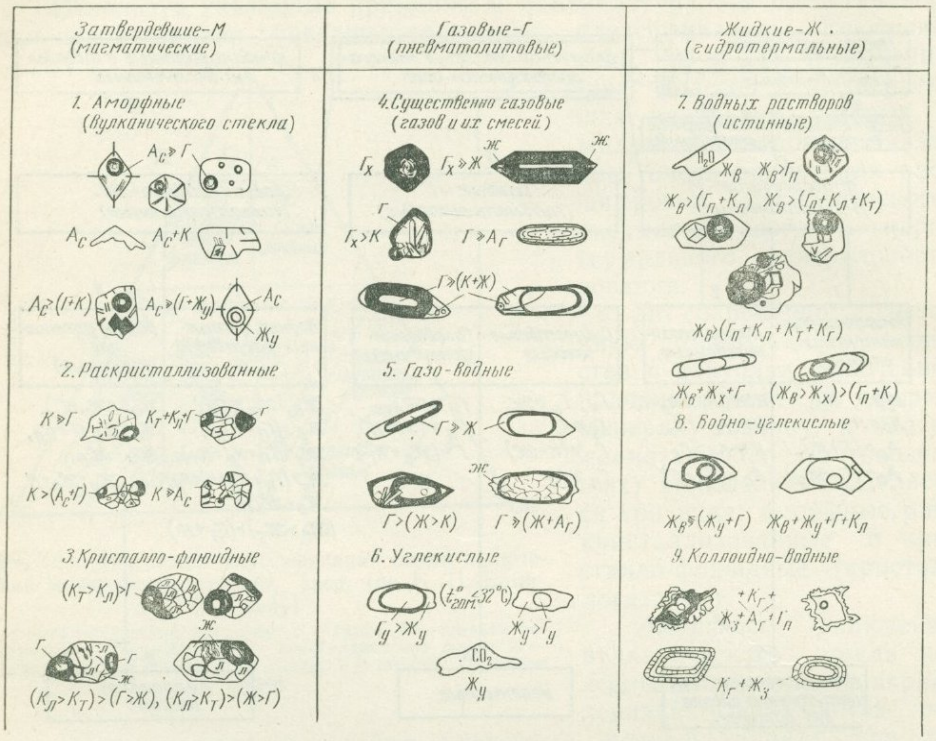



Рис. 25. Схемы фазовых состояний в системах включений минералообразующих расплавов и растворов

В существенно газовых включениях при комнатной температуре наблюдается заполнение вакуолей газом более чем на $^3/_4$ их объема — $Г \gg (К+Ж)$. Среди них различаются включения сухих газов, иногда с очень небольшим количеством жидкого конденсата или без него — $Г_х$, $Г_х \gg Ж$, иногда с кристаллами ($Г_х \gg К$), редко с пленкой или точечной рябью аморфного вещества на стенках вакуолей, исчезающих при нагревании ($Г_п \geqslant А_г$). Конденсат жидкости (чаще слабые и сильные кислоты) при нагревании включений этого вида равномерно переходит в газовую фазу. Разнообразие фаз, их объемных соотношений и поведения при изменениях температур служат основанием для распознавания выделенных разновидностей в классе газовых включений.

В *газо-водных* (флюидных) включениях газа несколько больше по объему, чем жидкости ($Г_п \geqslant Ж_в$), а последняя представляет собой водный конденсат разных растворенных веществ, часто содержащий их твердые фазы — $Г_п > (Ж > К)$. При нагревании заполнение таких вакуолей становится газовым (плотный флюид), но ход гомогенизации при этом различный: с точками инверсии, критическими явлениями и кипением раствора [22].

Очень интересной, впервые наблюдавшейся В. А. Калюжным [30], еще мало изученной разновидностью газовых включений является система $Г \gg (Ж_в + А_г)$. В заполнении таких вакуолей присутствует до

10% конденсата, но главной их особенностью является замутненность стенок из-за покрытия их тонкой пленкой аморфного вещества с характерным для синерезиса гелей узором ветвистой и «такырной» трещиноватости. При нагревании таких включений эта пленка и жидкость переходят в газовое заполнение вакуолей, вероятно, в виде аэрозолей, таких какие отмечаются в фумарольных газах (парах).

Эти два главных вида существенно газовых и газо-водных включений иногда насыщают включающий минерал как губку и с 1944 г. они истолковываются нами как надежные свидетели явлений глубинного пневматолиза [17], за исключением случаев захвата газовых пузырьков застывающей вязкой магмой и случаев вскипания жидких растворов. Этот вопрос будет рассмотрен ниже при более детальном рассмотрении включений минералообразующих сред.

*Углекислые* газовые включения обычно содержат и жидкую углекислоту ($Г_у > Ж_у$), но при температурах выше 32° С всегда имеется только гомогенное надкритическое газовое заполнение благодаря очень низкой критической точке этого экспансивного вещества (31,14° С). Двуокись углерода по распространенности в минералообразующих растворах занимает вместе с сероводородом второе место после воды и промежуточное положение между очень активной водой и углеводородными соединениями, относительно инертными в процессах минерализации.

Если сероводород прямо обеспечивает кристаллизацию сульфидов из растворов, то углекислота не несет таких важных функций, но активно действует в растворах воды, особенно при образовании карбонатов. В условиях высоких давлений или низких температур порции углекислоты могут консервироваться кристаллами в трех разновидностях самостоятельных включений: $Ж_у > Г_у$, $Г_у > Ж_у$, $Ж_у$ и, как известно, имеют большое значение при определении по ним давления. Однако в качестве показателей агрегатного состояния минералообразующих сред в самостоятельных и углекисло-водных включениях $CO_2$ не надежна.

Класс *жидких* включений подразделяется нами на три вида: включения истинных *водных растворов, водно-углекислые* включения и включения *коллоидно-водных растворов*, еще слабо изученные.

*Включения водных растворов* по фазовому составу заполнения при комнатной температуре разделяются на однофазовые включения слабых тепловодных и холодноводных растворов ($Ж_в$), наиболее распространенные в низкотемпературных гидротермальных образованиях двухфазовые включения — $Ж_в \gg Г_п$ и среднетемпературные солевые растворы — $Ж_в > (Г_п + К_л)$. В сфере высокотемпературного гидротермального рудообразования в минералах консервируются микропорции весьма крепких рассолов, вплоть до предельно насыщенной гидротермальной рапы, эталоны которых отвечают разновидностям включений $Ж_в > (Г_п + К_л + К_т)$ и $Ж_в > (Г_п + К_л + К_т + К_р)$. В каплях таких растворов во флюорите из пегматитов Казахстана мы насчитали до 30 фаз, из которых были определены только 12, и они относились к галоидам, силикатам и гидроокислам металлов [24]. При температурах выше 410° С наступала гомогенизация таких включений по I типу (в жидкой фазе).

Сложная разновидность включений $(Ж_в > Ж_х) > (Г_п + К)$ с двухступенчатой гомогенизацией при высоких температурах (300—400° С) изредка встречается в морионах и топазах Волыни. Вторая высокопреломляющая, по-видимому, силикатная жидкость при нагревании увеличивается в объеме, показывая ограниченную смесимость водных и неводных жидких фаз даже на высоком термодинамическом уровне. Такие включения иногда не содержат твердых фаз ($Ж_в + Ж_х + Г$).

*Водно-углекислые* включения жидких растворов при обычной тем-

пературе представляют собой сложные системы двух не смешивающихся жидкостей, одна из которых превращается в газ при температуре 32° С и ниже. В прошлом веке такие включения называли «кокардовыми» из-за того, что они имеют две концентрические фазовые границы вокруг газового пузырька — $Ж_в \geqslant (Ж_у + Г)$. Это явление связано с отделением при охлаждении жидкой углекислоты, ранее находившейся в водном, гомогенном жидком растворе. Такие включения, если доминирует водный раствор, имеют двухступенчатую гомогенизацию в жидкую фазу, а если жидкой углекислоты больше — $Ж_у > (Ж_в + Г)$, то в газовую фазу. Поэтому они мало пригодны как показатели агрегатного состояния минералообразующих растворов, так как иногда сам механизм их захвата (прилипание к граням роста кристаллов порций обособившейся в растворах углекислоты) нарушает нормальные соотношения фаз, что не учитывалось противниками пневматолиза.

В некоторых случаях (кварц с Памира) мы наблюдали разновидность водно-углекислых включений $Ж_в + Ж_у + Г + К$, причем твердая фаза (хлорид) обособляется в пределах сектора, занятого во включении водным раствором [22].

Водно-углекислые включения не пригодны для термометрических определений, но могут быть использованы для барометрических исследований глубинного рудообразования.

Вид *коллоидно-водных растворов* был выявлен Ю. А. Долговым [14] в кварце колчеданных месторождений Урала. Для выяснения их образования этот крупный исследователь включений в течение трех лет проводил эксперименты с гидрогелем силиката натрия и воспроизвел три разновидности включений, связанные со старанием и синерезисом последнего: бахромчатые $Ж_з + А_г + Г_п$ и $Ж_з + К_г + Г_п$ и двухскорлупные $К_г + Ж_в$, обнаружившие полное подобие природным включениям. Таким образом, они были представлены как прямые показатели коллоидного гидротермального минералообразования. Схема современной классификации включений минералообразующих сред (см. рис. 24, 25) представлена тремя главными классами, девятью видами и 40 разновидностями, которые ниже получат более детальное освещение. Здесь же нам приходится в обоснование номенклатуры включений материнских расплавов и растворов сделать несколько дополнительных замечаний.

Видовые особенности разнообразных включений в минералах выявляются через возникающие в них при охлаждении соотношения фаз. Для установления специальной терминологии, связанной с этой областью познания природы, представляется необходимым остановиться на вопросе, касающемся учета самого *вместилища* этих включений как дополнительной твердой фазы. По этому вопросу ранее мы писали, что «твердые стенки вмещающих любые включения пор при гомогенизации не являются инертными и представляют собой *дополнительную фазу*, которую, однако, неудобно учитывать в терминологии, но ее наличие для всех включений должно подразумеваться» [22 стр. 115].

Таким образом, при разработке классификации включений по составу и состоянию нами предлагалось учитывать *лишь вещество первородного заполнения их вакуолей*. Этот принцип, с указанной оговоркой, был принят во всей отечественной и зарубежной литературе.

Однако приходится снова возвратиться к этому вопросу потому, что В. А. Калюжный, положительно зарекомендовавший себя в развитии некоторых методов качественного изучения содержимого включений, выступил с предложением, нарушающим установившуюся четкость в понятии о включениях и их номенклатуре по видам и разновидностям.

По его мнению, включения «могут быть только многофазовыми образованиями», поскольку все они «имеют контакт с минералом, кото-

рый их включает» [31, стр. 6]. Гомогенные включения, сохранившиеся в минералах без фазовых изменений, например жидкие включения холодноводного раствора или углекислоты, нефти или твердых частиц, значит не могут считаться однофазовыми. Таким образом, четкое разграничение понятий «включение» и «кристалл» и границы между веществом того и другого будут утрачены.

Если признать необходимость номенклатурного учета герметизирующей включения твердой фазы минерала-хозяина, то упомянутые их виды придется называть двухфазовыми, а к обозначениям всех других потребуется добавлять также одну твердую фазу.

Легко можно видеть, какие осложнения не только по существу, но и в номенклатуре разновидностей включений внесло бы повсеместное добавление дополнительной твердой фазы самого включающего минерала.

Впрочем В. А. Калюжный, по-видимому, и сам начал понимать нерациональность этого и даже в своей классификации (см. рис. 22) не решается использовать дополнительные литеры для учета твердого вещества стенок вакуолей («К» или «В»).

По неясной причине он заменил в этой маркировке фаз включений начальные русские буквы латинскими: твердая фаза В, жидкость L, газ G, стекло U и т. п. Это абсолютно нерационально даже с точки зрения обыкновенной перепечатки и особенно полиграфии, так как отечественные линотипы не имеют латинских букв. Кроме того, применяя такие литеры, он оказывается вынужденным пользоваться только цифровыми обозначениями для фаз разного состава, но одинакового агрегатного состояния, например $L_1+L_2+G$, что означает лишь наличие двух жидких не смешивающихся фаз без диагностики их во включении и равновесного с ними газового пузырька. Такое одинаковое обозначение, например, применяется им и для жидких включений водного раствора с углекислотой и для нефтесодержащих включений. Если формулы этих включений написать по-русски, все будет ясно: $Ж_в+Ж_у+Г$ и $Ж_в+Ж_н+Г$.

Придерживаясь того, что последовательность буквенных обозначений, например Г+Ж или Ж+Г, отражает количественное преобладание первых фаз над вторыми, при наименовании *видов включений* мы читали эти простые формулы как газово-жидкие и жидко-газовые [22]. В. А. Калюжный [31], признавая смысловое значение этого порядка буквенных обозначений (G+L и L+G), при выражении их словами пишет наоборот, т. е. жидко-газовые для первого случая и газово-жидкие для второго, вызывая дезорганизацию в терминологии.

В связи со случившимся разноречивым использованием указанных терминов может быть придется в специальных работах по включениям отказаться от них совсем, заменив буквенными обозначениями. Широко распространившееся название *«газово-жидкие включения»* придется сохранить в литературе только для общего обозначения включений образцов газовых и жидких растворов, но не расплавов. В качестве общего названия для всех включений следует закрепить термин «включения минералообразующей среды».

Сейчас намечается период становления новой отрасли науки — *термобарогеохимии* глубинных процессов, когда к изменению обоснованных терминов, отражающих важные понятия, следует подходить с очень большой осторожностью. В противном случае даже опытные исследователи включений перестанут понимать друг друга в своих докладах и публикациях. Именно поэтому так необходимо было остановиться на вопросах классификации и номенклатуры наших микрообъектов.

Автору совместно с аспирантами и помощниками по работе удалось за последние два десятилетия изучить включения в минералах почти всех генетических типов эндогенных месторождений и по мере

этого изучения последовательно расширить и совершенствовать классификацию включений по их составу и состоянию на основе рассмотренных принципов.

По мере дальнейшего накопления фактических материалов предложенный вариант (см. рис. 24) несомненно должен будет совершенствоваться, но и в современном виде он может содействовать не только единообразному пониманию существа этих разнообразных включений, но и их использованию в науке и практике.

Перейдем к более детальной характеристике включений минералообразующих сред, необходимой для углубленного понимания последующих глав работы.

### *Включения затвердевших расплавов*

Включения в минералах внутримагматического этапа минералообразования должны в будущем явиться очень важным объектом исследований петрологов и петрографов, так как они представляют собой герметизированные порции «живой» породообразующей магмы.

Д. С. Белянкин, оценивая значение силикатных анализов магматических горных пород, справедливо считал, что эти анализы дают нам только «обескровленный» состав магмы, а истинный ее состав остается в точности неизвестным. Можно утверждать, что только состав включений алюмосиликатных расплавов, надежно законсервированных в магматических минералах, даст нам ответ об истинном составе магм, несравнимо более близкий к действительному, чем анализы самих пород, особенно эффузивных, быстро потерявших летучие компоненты. Более того, затвердевшие включения в магматических минералах с помощью экспериментов по высокотемпературной их гомогенизации (расплавлению) уже дают реальные представления о температурах расплавов, действовавших в далеком геологическом прошлом и на Луне.

В классе магматических включений ранее нами [20] были выделены три их вида: *аморфные включения вулканического стекла, раскристаллизованные включения и включения кристалло-газовые.* Сопоставление первых двух видов не отражает естественной эволюции магмы, а указывает только на различные условия ее затвердевания. Между ними существуют переходы, связанные с тем, что минералы фенокристов интрузивных пород и вкрапленники эффузивных пород образуются иногда в сходных термодинамических условиях. В большинстве случаев минералы-вкрапленники эффузивных пород кристаллизуются еще на глубине по пути продвижения магмы к поверхности. Включения в таких аллолитовых минералах иногда оказываются частично кристаллическими, что характерно также для вкрапленников интрузивных пород краевых формаций и малой глубины становления интрузивов с закалочными явлениями в эндоконтакте. Чем меньше эта глубина и чем быстрее происходил процесс застывания и кристаллизации магмы, например при образовании даек, тем больше в затвердевших включениях минералов интрузивных пород возникало аморфных компонентов (стекла). Удивительно сходные результаты получены по образцам нашей «Луны-16», а также «Аполлона-15».

Наоборот, если при интенсивных излияниях магмы происходило быстрое перекрытие нижних потоков лав верхними, заключенные в фенокристаллах нижних потоков лав включения-эталоны материнских расплавов частично успевали кристаллизовать в своем лоне некоторые минералы-узники. Несмотря на такие промежуточные возможности преобразований магматического заполнения вакуолей в минералах, все же с большой степенью надежности удается обособлять друг от друга (путем эмпирически выявленных видовых разграничений) включения в кристаллах эффузивных и интрузивных пород.

Кристалло-флюидные включения остаточных расплавов весьма отчетливо отделяются от первых двух типов включений магм по относительно большому объему газа в вакуолях и относительно «крупнокристаллическому» выделению в них твердых фаз, иногда с небольшими обособлениями межкристальной жидкости. Кроме того, среди фаз твердого выполнения таких включений весьма существенную роль играют микроминералы изотропных галоидов, главным образом хлоридов и фторидов натрия и калия.

Подчеркнув эти главные различия между тремя видами класса затвердевших включений, мы начнем их рассмотрение с аморфных включений вулканического стекла как относительно более полно изученных.

### *Аморфные включения*

Включения стекла были давно известны во вкрапленниках эффузивных пород. Например, в работах Сорби, К. Д. Хрущева, Циркеля, Розенбуша, Фогельзанга можно видеть изображения этих включений в кварце, полевых шпатах, пироксенах, оливине, лейците и других минералах. Однако плененные при росте финокристаллов микроскопически малые порции материнской магмы, испытавшей переохлаждение, в XX веке еще не привлекают должного внимания петрографов. Эти включения, несомненно, представляющие собой законсервированные капли магматической среды, в которой происходил рост фенокристаллов, вследствие быстрого остывания лавы и породы оказались или в состоянии задержанной кристаллизации или же вследствие переохлаждения сохранились совсем нераскристаллизованными, стекловатыми. По составу они отвечают ближе всего основной массе тех эффузивных пород любого типа, которые содержат фенокристаллы. Материнская среда внутри таких включений представлена более полно, нежели в основной массе породы, из которой вследствие резкого падения температуры и давления удалялась бóльшая часть минерализаторов.

Включения такого силикатного стекла распределяются во вкрапленниках параллельно граням их роста или по концентрическим зонам оплавления фенокристаллов.

Как показано в схеме классификации (см. рис. 24), среди аморфных включений по фазовому заполнению выделяется несколько разновидностей, из которых наиболее обычны двухфазовые, стекловато-газовые в эффузивах Земли, в то время как для Луны характерны многофазовые включения с такими минералами-узниками, как ильменит, плагиоклаз, пироксен, оливин, реже троилит, при нагревании и ожижении стекла растворяющиеся в интервале температур 1105—1210° С.

*Двухфазовые включения* — $А_с > Г$ имеют один или же несколько неподвижных газовых пузырьков (часто с $CO_2$), возникших не столько в результате сокращения объема при застывании алюмосиликатного вещества включений (см. рис. 26), сколько по причине обособления газов, ранее растворенных в плененной порции магматического расплава.

В кристаллах основного силиката закиси железа, наблюдавшихся в шлаках, были давно известны включения стекла с шаровидными газовыми пузырьками, очень похожие на включения стекла во вкрапленниках эффузивных пород основного состава. Искусственно включения стекла были получены еще в 1879 г. Фуке и Мишель-Леви в лейците, нефелине, анортите и лабрадоре. Они отмечают полное подобие этих включений стекла с пузырьками газа включениям в минералах свежих вулканических пород. В позднейшей литературе по искусственным (шлаковым) минералам можно найти много указаний на образование подобных включений.

Включения стекла в кислых эффузивах бывают бесцветны, а в основных обычно слабо окрашены в желтый, красноватый, зеленоватый и бурый цвет. Такая окраска заполнения стекловидных включений в общем совпадает с окраской основной массы застывших лав, в минералах-вкрапленниках которой они законсервированы.

Форма включений стекла очень разнообразна и, если она в миниатюре не передает негативной формы вмещающего кристалла, бывает каплевидной, угловатой или лоскутообразной, с клиновидными заострениями, или не имеющей каких-либо геометрически правильных очертаний. Очень часто у негативных «дигексаэдров» включений стекла в пирогенных кварцах наблюдаются характерные трещинки разрывов, связанные со сжатием включающего кристалла при переходе им точки инверсии (фототаблица II,*а*).

Включения со многими неподвижными газовыми пузырьками под микроскопом представляются ситовидными, так как вследствие вязкости расплава и быстроты его охлаждения обособившиеся газовые пузырьки не могли соединиться друг с другом. Пузырьки имеют чаще всего шарообразную и реже яйцевидную и мешкообразную форму и вследствие рассеяния в них света выглядят темными. Ввиду бóльшей близости показателей преломления стекла и вмещающего минерала по сравнению с включениями жидкости и тем более газа краевые границы аморфных включений выглядят несколько расплывчатыми.

Объединение газовых пузырьков можно осуществить искусственно путем высокотемпературного нагревания и расплавления включений стекла с несколькими пузырьками газа при последующем очень медленном охлаждении, образующими иногда один общий пузырек. При быстром переохлаждении, наоборот, можно вместо имевшегося одного газового пузырька получить несколько.

Температура гомогенизации включений стекла, т. е. превращение его в каплю расплава, дает близкую к истинной температуру магмы, в которой кристаллизовались вкрапленники. Это еще подлежит уточнению на искусственных пирогенных минералах, например в шлаках, где температура доменного расплава, из которого они образовались, известна *.

Изредка встречающиеся однофазовые включения стекла ($А_с$) возникли, вероятно, или в результате очень быстрого переохлаждения, при котором минерализаторы магмы остались рассредоточенными во всем объеме магматической капли в ультрамелких невидимых обособлениях, или же вследствие повышенной вязкости магмы, находящейся под большим давлением. Еще более редко наблюдавшиеся в таких включениях (разновидность $А_с+К$) одиночные микрокристаллические фазы могли быть замурованы растущим минералом-хозяином вместе с каплей расплава, в которой они возникли ранее.

Очень интересны *многофазовые включения стекла* (разновидности $А_с > (Г+К)$), в которых из плененной капли магмы выросли кристаллы-«узники» одного или нескольких минеральных веществ, ставших твердыми конституентами внутреннего заполнения этих включений. Такие внутренние кристаллы вырастали на стенках вакуолей или же возникли, росли и сохранялись во взвешенном состоянии в вязком расплаве включения, вплоть до его превращения в стекло. Часто они не успевали приобрести полной огранки и в таком недоразвитом виде получили названия трихитов, глобулитов, кристаллитов и маргаритов.

В изотропной массе стекла многофазовых включений, в жидком виде являвшейся растворителем для ряда веществ магматического расплава, наблюдались ультрамелкие анизотропные кристаллики полевых

* Осуществленные В. С. Соболевым и др. опыты по кристаллизации из искусственных расплавов показали расхождения в температурах ±10° С. (*Прим. ред.*).

шпатов (с неправильными ограничениями), зеленоватые призматические кристаллики пироксенов, зернышки магнетита и минералы ромбического габитуса. Заполнение пор в таких многофазовых включениях стекла представляет собой имитацию содержащей фенокристаллы порфировой породы и для одного и того же образца является очень сходным (см. рис. 25).

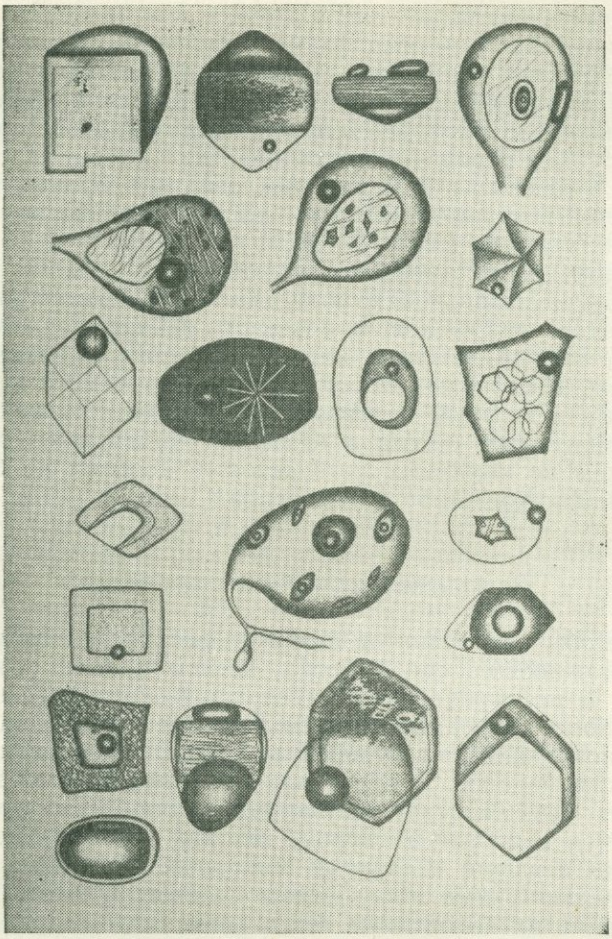


Рис. 26. Метаморфизованные включения стекла (по К. Д. Хрущеву)

Родственное минералу-хозяину вещество, содержавшееся в капле расплава, обычно не образует самостоятельных внутренних кристаллов-узников (см. фототаблицу II, *б*), кристаллизуется по стенкам пор включений с попыткой сохранения родственной формы и при гомогенизации включений стекла также подвергается расплавлению. При этом в вакуолях-дигексаэдрах кварцевых фенокристаллов липаритов и порфиров наблюдаются нарушения прямолинейности в очертаниях граней (см. фототаблицу II,*а*).

При высокотемпературном нагревании многофазовых стекловатых включений уничтожаются не только газовые пузырьки, но в расплавляющемся стекле целиком растворяются и твердые фазы минералов-узников. Восстановить последние в прежнем виде можно только при очень и очень медленном охлаждении, что невозможно в лабораторных условиях.

Иногда эффузивные породы с фенокристаллами, содержащими включения, подвергались естественным процессам пирометаморфизма. Как показал К. Д. Хрущев, это в первую очередь сказывается на существенных преобразованиях содержимого включений, проиллюстрированных им многочисленными зарисовками (рис. 26), точность которых вряд ли может быть подвергнута сомнению. Однако объяснение такого экстравагантного заполнения еще невозможно из-за отсутствия у нас аналогичного материала.

При региональном метаморфизме включения стекла также оказываются частично или полностью перекристаллизованы и такое расстеклование требует сопоставления их с основной массой эффузивной породы, во вкрапленниках которой они наблюдались. Последняя обычно и на себе несет следы перекристаллизации.

Изредка в газовых пузырьках стекловидных включений достоверно устанавливается внутреннее «кольцо» жидкой углекислоты, исчезающей при малом нагревании ($А_с > (Г + Ж_у)$).

Все разновидности аморфных включений $А_с$, $А_с + К$, $А_с \gg Г$, $А_с > (Г + Ж_у)$ были неоднократно описаны в фенокристаллах кварца, полевых шпатов, амфиболов, пироксенов, лейците, санидине, нефелине, содалите, гаюине, нозеане, цирконе, оливине и апатите из самых разнообразных эффузивных пород. Любопытно отметить, что в конце прошлого века некоторые исследователи (Коэн, Лапейр и Кайзер) установили включения стекла с газовыми пузырьками также в *оливине и цирконе из каменных метеоритов*, в которых не было обнаружено включений какого-либо другого типа.

### *Раскристаллизованные включения*

В кварце обычных гранитов первично раскристаллизованные включения, представляющие собой пробы кислой магмы, обычно чрезвычайно мелки и по огранке мало совершенны, это агрегаты мельчайших кристаллов с деформированным газовым пузырьком. В них различаются участки полевошпатового вещества, кварца и «пылинок» темноцветных минералов. В кристаллах полевых шпатов гранитов при существующих возможностях поляризационного микроскопа включения выявляются с большим трудом, так как часто размеры их измеряются только первыми десятками микронов. Их форма бывает связана с кристаллическими плоскостями полевых шпатов. В минералогическом составе их заполнения легко различимы кварц и темноцветные минералы.

Родственное минералу-хозяину полевошпатовое или кварцевое вещество из капли расплава кристаллизовалось частично на стенках поры включений. Следы этого явления микродифференциации мегматической массы включений иногда возможно установить по первичной наружной границе включающей вакуоли благодаря различию в показателях преломления вещества минерала-хозяина и новообразованного вещества. Такие включения наблюдались нами в полевом шпате из гипабиссальных эльджуртинских гранитов района Тырны-Ауз и были детально изучены В. Ф. Лесняком [47].

Темные вследствие полного внутреннего отражения газовые пузырьки включений своим относительно большим размером фиксируют то обстоятельство, что объем захваченной капли магматического расплава и объем позднее кристаллизовавшихся из нее твердых фаз существенно различны. Круглая форма пузырька объяснима только тем, что сокращение объема сопровождалось обособлением газовой фазы капсюлированных расплавов до начала кристаллизации. Газовый пузырек в таких включениях оказался окружен кристаллическим кремне-

земом, имеющим неровные, но четкие границы с ортоклазом, выделившимся в заданном объеме по периферии вакуоли. Благодаря некоторой разнице в показателях преломления между новообразовавшимся и включающим полевым шпатом исходная граница вакуоли включения относительно хорошо различима. Эльджуртинские порфировидные биотитовые граниты, особенно в эндоконтактовой части, примечательны тем, что затвердевшие включения в них оказались не полнокристаллическими, а содержащими стекло, т. е. полукристаллическими образованиями.

В зернах светло-серого кварца неправильно лапчатой и округлой формы, кроме твердых включений минералов (циркон, апатит, рутил), иногда встречаются изолированные полуограненные и округлые вакуоли, заполненные микрокристаллами и серовато-белым стекловидным веществом с крупным (до 25% объема) темным газовым пузырьком. Соотношение кристаллических фаз и стекловатой фазы по мере приближения к контакту интрузива изменяется в пользу последней.

Таким образом, в этом гранитном массиве можно было наблюдать три разновидности затвердевших включений: $К \gg Г$, $К > (А_с + Г)$ и $А_с > (К + Г)$. Эти различия в степени раскристаллизации капель расплавов, плененных в минералах интрузива, кажутся связанными с различным темпом охлаждения разных его частей. В приконтактовой зоне закалочный режим быстрого охлаждения породы благоприятствовал неполной раскристаллизации плененных минералами капель материнских расплавов.

Типичные затвердевшие раскристаллизованные включения неправильной или полуограненной формы размером до 0,03 *мм* в нефелине из уртитов и фойяитов Хибинского и Ловозерского интрузивов щелочных пород были недавно описаны С. В. Икорским [27], применявшим увеличение микроскопа до 1200 раз. В заполнении этих сингенетичных нефелину включений доминирует твердое оптически изотропное вещество, в которое погружены очень мелкие анизотропные минералы в виде ромбиков, гексагональных табличек и удлиненных призмочек, бесцветные или обладающие слабозеленоватой окраской, представляющие собой кристаллы эгирина, содалита, виллиомита (фототабл. III, *а*, *б*).

В массе кристаллического заполнения вакуолей газовая фаза расплава обособилась в виде газовых пузырьков, иногда сдавленных твердыми фазами. Средний объем этих пузырьков был оценен им около 20% от всего объема вещества раскристаллизованных включений-консерватов щелочной магмы. Нагревание аналогичных включений в апатитах Хибин, содержащих в твердых фазах содалит, виллиамит, калишпат и, возможно, нефелин, выполненное В. М. Валяшко, потребовало для их расплавления (гомогенизации) температуру 740—890° С.

Часто такие затвердевшие раскристаллизованные включения наблюдаются в пространственном сочетании с твердыми включениями (комбинированные включения).

Выявление раскристаллизованных включений минералов интрузивных щелочных, основных и кислых пород и эксперименты с ними только недавно начаты.

Эти включения, правильно диагностировавшиеся в прошлом веке, никак не использовались петрографами и петрологами нашего столетия. Между тем генетическая информация, которую дают эти включения, представляется очень и очень важной. Это можно видеть даже из первых фрагментарных попыток изучения таких включений, осуществленных в последнее время.

Подобные исследования ведутся, в частности, в нашей микротермометрической лаборатории (МГУ) А. В. Громовым с включениями расплавов в оливинах рудоносных габбро-долеритов Норильского место-

рождения и в кварцах и полевых шпатах Кентского гранитного массива в Центральном Казахстане.

В призматических фенокристах плагиоклаза I ($An_{80-92}$) устанавливаются округлые и негативной формы раскристаллизованные очень мелкие включения расплавов размером до 0,1 *мм*, представленные оливином, пироксеном и сульфидно-рудными минералами, причем последние занимают от 10 до 40% объема вакуолей. Газовые пузырьки в таких вакуолях составляют 5—10% объема. Эти ранние плагиоклазы вместе с оливином I ($Fa_{14-23}$) образуют в породах плагиооливиновые участки. В оливинах, образующих идиоморфные шестигранники, во внутренних частях зерен также наблюдаются единичные включения раскристаллизованных расплавов, а по периферии — стекловатые с кристаллами рудных минералов.

Раскристаллизованные включения имеют негативную или округлую яйцевидную форму размером до 0,03—0,05 *мм* в диаметре. В их заполнении различаются плагиоклазы, пироксены, оливин и сульфиды. Последние иногда занимают до 50% общего объема включений, а газовые обособления в них имеют интерстиционную неправильную форму, занимая до 10% объема (см. фототабл. III, *в*).

В оливине габброидного вулканокластического обломка из лунного реголита, доставленного на Землю советской автоматической станцией «Луна-16», наблюдаются кристаллически-зернистые включения с газовым пузырьком, ильменитом, плагиоклазом, пироксеном и другими силикатами, что говорит о его первично интрузивном происхождении.

Не менее показательными являются затвердевшие раскристаллизованные включения кислых расплавов в минералах гранитов. Однако такие включения все еще не «улавливаются» большинством исследователей. По-видимому, это связано с нечеткостью их границ, так как родственное вещество, кристаллизуясь на стенках и внутри вакуолей включений, как мы указывали ранее [22], наследует оптическую ориентировку вещества минерала-хозяина. Внешние ограничения раскристаллизованных включений расплавов проявляются четко в скрещенных николях лишь при полиминеральном их составе, отвечающем составу гранитов, но с минерализаторами в интерстициях. Это можно видеть на примере включений «ранних» расплавов, захваченных фенокристаллами кварца гранит-порфиров Кента (см. фототабл. III, *г*).

В более кислых микропорциях расплавов, капсюлированных зернами кварца в поздний период формирования интрузивов, границы включений менее четкие, но вполне различимые благодаря множеству обособившихся в кристаллическом заполнении вакуолей очень мелких газовых пузырьков, в том числе и по краям вакуолей (см. фототабл. III, *д*).

Ограничения раскристаллизованных включений в полевых шпатах улавливаются с еще большим трудом, да и сами эти полиминеральные включения в них более легко разрушаются под воздействием позднейших растворов и даже при изготовлении шлифов обычной толщины.

Ультрамикроминералогия многофазовых включений расплавов и растворов освещается ниже. Здесь лишь отметим еще раз, что некоторые из так называемых акцессорных, особенно идиоморфных минералов являются компонентами раскристаллизованных включений, обособившимися из уже законсервированных капель расплавов (минералы-узники в виде сфена, циркона, флюорита и др.). В затвердевших включениях минералов эндоконтактовых фаций интрузивных пород встречается также и стекло.

Таким образом, вакуоли раскристаллизованных включений заполнены в основном микрокристаллическими фазами, имеющими размеры в один или несколько микрон. Каждые из таких включений (вакуоль и ее заполнение) имели историю формирования во времени и про-

странстве. Генезис вакуолей (пор в кристалле) рассматривается в V части монографии в обязательном их взаимодействии со своим заполнением (порции магматической среды). Здесь отметим только главные тенденции — ступени формирования включений до их современного облика (при обычной температуре): 1) завершение герметизации капли магмы в вакуоли пирогенного минерала; 2) охлаждение кристалла-хозяина и уменьшение объема ($V_1$) включающей вакуоли; 3) кристаллизация алюмосиликатного вещества капли расплава и сокращение объема ($V_2$) заполняющей массы; 4) обособление минерализаторов в порции расплава в пространство, связанное с изменением объемов ($V_2$—$V_1$), т. е. в интерстации между микрокристаллами или в объединенный газовый пузырек; 5) выделение вещества, родственного включающему кристаллу, на стенках вакуоли с изменением ее первоначальной морфологии и видимым (но мнимым) уменьшением ее объема.

При нормальном изменении условий существования — охлаждении интрузивной породы, слагающих ее минералов, а следовательно, и раскристаллизованных включений — свидетелей глубинно-магматического их образования, сформированные, таким образом, микромодели былых расплавов имеют значение очень важных *петрологических документов.* Однако при повышении температур от дополнительных интрузий они могут претерпевать пирометаморфические преобразования, которые устанавливаются визуально при бóльших разрешающих способностях микроскопа, чем те, которыми обычно пользуются петрографы. Такие возможные изменения систем раскристаллизованных включений могут быть ретроспективно прослежены путем искусственного их расплавления вплоть до полной гомогенизации.

### *Кристалло-флюидные (кристалло-газовые) включения остаточных расплавов-рассолов*

Под этим названием нами были выделены [23, 24] затвердевшие включения в минералах пегматитов, в отличие от предыдущих двух типов включений, имеющих относительно большой объем газовой фазы, обособляющейся в законсервированной капле остаточного водно-солевого расплава-рассола (фототабл. IV). Встречается «боковое» положение газового пузырька внутри вакуоли многих таких включений. Иногда он как бы вдается («врастает») в первичное вещество включившего минерала, но это только так кажется. В действительности это обусловлено тем, что участок обособившейся шаровидной газовой фазы, «прижавшейся» к стенке вакуоли, блокирует ее в этом месте от последующего выделения родственного минералу вещества, находившегося в капле расплава. По мере постепенной кристаллизации, последнее частично «обволакивало» газовый пузырек, деликатно сохраняя при этом его шарообразную форму.

В центральной части полости включений кристаллизовались другие относительно хорошо ограненные минералы-узники, часто сдавливающие газовые обособления (см. фототабл. IV, *а, б*). Во включениях ранних кварцев гранитных пегматитов Волыни при больших увеличениях хорошо различаются многочисленные (до 14) кристаллики силикатов $K_т$ (полевые шпаты, мусковит, темноцветные минералы), галоидов $K_л$ (галит, сильвин, криолит и др.), а иногда рудные минералы $K_р$ (магнетит, гематит, пеннин и др.). В просветах между зернами кристаллического выполнения всех таких вакуолей включений можно различать то или иное, но небольшое количество водно-солевой жидкости (см. фототабл. IV, *в*).

По фазовому составу и состоянию кристалло-газовые включения в гранитных пегматитах могут быть охарактеризованы тремя главными

разновидностями, среди которых, как и всегда, имеются переходные вариации: $(К_т > К_л) > Г$, $(К_л > К_т) > (Г > Ж)$ и $(К_л > К_т > К_р) > (Г + Ж)$. Видовое название этих включений в известной мере условное. Оно дано потому, что газовая фаза в них больше по объему, чем какая-либо другая из отдельно взятых фаз. Кроме того, это название подчеркивает повышенное содержание минерализаторов в пегматитообразующих остаточных расплавах-рассолах. Две разновидности кристаллогазово-жидких включений (см. фототабл. IV, *г* и *д*) фиксируют начало перехода этих расплавов к гидротермальной рапе (наблюдается в интерстициях), в которой легколетучие компоненты уже доминируют над силикатными веществами.

В случаях, когда остаточные расплавы становятся однородными по вещественному составу (кремнезем силекситов, расплавы карбонатитов), захват минералами их капель и последующая раскристаллизация в вакуолях включений дают кристаллическое вещество, практически почти не отличимое от вещества минерала-хозяина, и только округлый пузырек фиксирует место возникновения в последнем кристалло-флюидного включения. Как видно, такой газовый пузырек имеет специфическое происхождение. Он является только одной фазой системы затвердевшего включения, описываемого формулой $К \gg Г$, но не самостоятельным включением порции газовой среды ($Г_х$), что нужно учитывать при определении границ действия остаточных расплавов-рассолов, гидротермальной рапы и пневматолитовых растворов.

### *Включения газовых растворов и их смесей*

Класс газовых включений, встречающихся во многих минералах пегматитов, карбонатитов, грейзенов, скарнов и некоторых других типов глубинных и субвулканических месторождений, показывает достаточно широкое действие растворов очень малой, средней и относительно большой плотности, но не отвечающей жидкому состоянию вещества.

В случае большой плотности этих растворов было увеличенное давление на газы, что обеспечило сближение частиц с образованием пар, триплетов и других ассоциаций связанных вместе частиц, вплоть до возникновения жидкоподобного состояния (флюида). С увеличением плотности и температуры газовые растворы и смеси все более приобретают свойства интенсивных растворителей для разных минеральных веществ, и таким образом, усиливается их роль в минералообразовании.

Как показывают специальные исследования, при высвобождении газового содержимого вакуолей в минералах одни включения, обычно с очень малой степенью наполнения жидкостью, конденсировавшейся при охлаждении до комнатной температуры, дают только возгоны на стенках пробирок, а другие обнаруживают содержание паров воды.

Первый вид включений газов мы назвали *существенно газовыми* ($Г > 3/4 + Ж < 1/4$), а второй — *газо-водными*, содержащими при комнатной температуре газовой фазы немного более половины объема вакуолей, а водной жидкости несколько менее половины объема ($Г \geqslant 1/2 + Ж \leqslant 1/2$). Ранее эти газо-водные включения мы разделяли на газово-жидкие (Г от 1/2 до 3/4 + Ж от 1/2 до 1/4) и жидко-газовые ($Г > 1/2 + Ж < 1/2$), что не оправдало себя в первую очередь с терминологической стороны, и это отмечалось ранее. Различия в плотности и составе газовых включений можно точнее характеризовать формулами разновидностей включений (см. рис. 24).

Поскольку вслед за водой в надкритическом и парообразном состоянии в газообразных минералообразующих средах на втором месте

стоит углекислота, которая легко даже без химических анализов выявляется во включениях благодаря очень низкой критической температуре, рационально выделить ее включения в особый вид *углекислых включений.*

Газообразные углеводородные в основном метановые включения, устанавливающиеся в смеси с разными другими газами, входят в нашу схему систематики по IV классу и в разновидностях $Г_х$ и $Г_х \ll Ж$.

Ф. Циркель отмечал, что наполненные газом микроскопически малые поры минералов являются в природе широко распространенным явлением и по некоторым вычислениям в 1 $см^3$ кристаллического вещества их насчитывается до 360 *млн.* Действительно, в некоторых случаях пневматолитовый кварц оказывается как губка насыщен газовыми включениями и имеет существенно меньший, против среднего, удельный вес (фототабл. V, *а*).

Характерной внешней особенностью всех этих включений является то, что газовый пузырек в них очень велик и занимает при комнатной температуре всегда более 50% их объема, а при нагревании заполняет все пространство вмещающей вакуоли. Это отнюдь не простые газовые пузырьки сжатия жидких включений (см. ниже), а полости, первоначально заполненные минералообразующей гомогенной средой малой плотности. Это хорошо выявляется оптически, так как такое заполнение обладает всегда резко меньшим показателем преломления по сравнению с жидким и тем более твердым состоянием вещества. Именно поэтому вследствие рассеяния проходящего света они в объемных вакуолях включений всегда выглядят темными, почти черными, со светлым бликом по центру.

Форма газовых включений очень разнообразна и часто зависит от того, в каком минерале находятся включения. Для бериллов, например, наиболее характерны первичные включения округло-трубчатой формы. В топазах они также распространены. Для кварцев в пегматитах наиболее обычны округло-объемные, часто дигексаэдрические полости включений. Количество таких включений в так называемых «вонючих» кварцах, обнаруживающих при ударе резкий запах, огромно и они занимают иногда не менее 10% от объема образца, а размеры их обычно колеблются от тысячных до десятых долей миллиметра (см. фототабл. V, *а*, *б*).

Состав заполнения вакуолей *существенно газовых включений* в настоящее время наиболее хорошо изучен для кристаллов пегматитов по сравнению с минералами других генетических типов месторождений (см. фототабл. V).

В этом виде включений герметизировались порции газов из минералообразующих гомогенно-газовых сред. При обычной температуре они обнаруживают одинаковые или очень близкие коэффициенты заполнения в системах $Г_х$, $Г_х \gg Ж$, $Г_х, \gg К$, $Г \gg (К+Ж)$, характеризующих состояние и состав среды в каждый данный момент ее минералообразующего действия, фиксированного образованием семейств газовых включений.

Газовый состав флюидов, действовавших в пегматитовых телах Волыни, впервые начал изучать под нашим руководством С. А. Чайковский. В этом вопросе не было еще никакого опыта и пришлось создавать новую установку для извлечения газов в вакууме и их анализа.

По девяти анализам тогда было установлено большое количество азота и инертных газов, колеблющееся в разных зонах кварцевых кристаллов от 41,3 до 84%. Содержание углекислого газа для разных образцов изменялось от 3 до 40%, кислорода от 5,03 до 15,16%, водорода от 0 до 14,4%, метана от 1 до 11,62%, сероводорода от 0 до 2,5%. Один анализ выявил содержание гелия и аргона до 1%.

В этих самых первых в СССР анализах газовых включений из-за несовершенства созданной тогда для этих целей вакуумной установки нам представляется завышенным содержание азота и кислорода и соответственно заниженным количество углекислоты и сероводорода.

К настоящему времени техника валового извлечения и методика исследования газов в индивидуальных включениях благодаря работам М. М. Элинсон и Н. А. Шугуровой существенно улучшены, но они все еще недостаточно совершенны главным образом потому, что ряд минералообразующих конституентов газов до сих пор не определяется.

По пегматитам Волыни З. И. Ковалишин [36] для кварца и топаза соответственно установил следующие составляющие заполнения существенно газовых включений (в %): $CO_2+H_2S$—57,78 и 27,8; $O_2$ — 4,5 и 1,33; CO — 0,63 и 0,00; $H_2$+редкие газы — 13,23 и 47,08; $CH_4$ — 12,6 и 7,75; при этом окись углерода, углерод и метан были встречены не во всех образцах.

Сероводород и метан в наибольших количествах присутствуют в «вонючих» кварцах.

Для морионов Волыни И. Н. Маслова [51] методом индивидуального ультрамикроанализа включений установила существенные вариации в относительном количестве кислых газов для включений разных зон одного кристалла. Оказалось, что $CO_2$ испытывает колебания от 2 до 73,5 об. %, а $H_2S$ в тех же включениях от 10,1 до 94,5 об. %.

Конечно все эти и другие анализы газов еще нуждаются в серьезном повышении точности и не отвечают полному, более сложному составу газовой атмосферы камерных пегматитов, законсервированной, в частности, во включениях видов $Г_х \gg Ж$, $Г_х \gg К$, $Г_п \gg А_г$ и $Г \gg (К+Ж)$.

Газы таких включений необходимо извлекать только после перехода конденсированной жидкости и выделившихся твердых веществ в газовую среду включений, т. е. после их полной гомогенизации. Тогда в них могут обнаружиться многие другие легколетучие вещества в виде хлористых, фтористых, сернистых, азотистых и других соединений металлов, а также сильных кислот (HCl, HF). Об этом, в частности, свидетельствует состав легкорастворимых минералов-узников, подвергшихся сублимации внутри вакуолей включений при их нагревании.

В минералах возгона, например в кристаллической сере газовых фумарол, наблюдаются вакуоли, заполненные смесью вулканических газов и воздуха, т. е. той внешней среды, в окружении которой происходила кристаллизация этого минерала. В газово-воздушных включениях янтарей фиксированы порции (образцы) древней атмосферы Земли, аналитически еще не сопоставленные с составом современной тропосферы. В таких включениях нами не было установлено никаких жидких конденсатов.

В пегматитовом минералообразовании сразу же после α—β-трансформации кварца, приводящего к превращению его в «сотовый» кварц, в полиэдрических трещинах консервируются газовые включения, почти целиком заполненные газовой фазой. Такие включения, содержащие при комнатной температуре менее 10% жидкости (обычно 1—2%), ранее мы [22] условно назвали включениями «сухих» газов (см. фототабл. V, *а*, *б* и VI, *а*, *б*). Природа полигональной трещиноватости таких «сотовых» кварцев впервые была правильно расшифрована Ю. А. Долговым [13], но позднее [15] он впал в ошибку, отнеся эти газовые включения ко времени образования гранул трансформации высокотемпературного кварца.

При внутриминерализационных тектонических подвижках происходят резкие увеличения объемов систем минералообразующих сред, вызывающие кратковременные трансформации жидких гидротермальных растворов в газообразные (парообразные). С этими моментами мине-

ралообразования также был связан захват подвижных геохимических субстанций малой плотности. Однако здесь во включениях мы встречаемся обычно не с первично гомогенными порциями газов, а с газоводными включениями разновидности $Г_п \geqslant Ж_в$ (кипящие растворы) или $Г_п > (Ж_в > К)$. Кроме того, если в водных средах была растворена углекислота, при спаде давлений и температур происходило ее обособление и консервация во включениях, часто вместе с парами воды.

В газовых углекислых и водно-углекислых жидких включениях фаза обособившейся жидкой двуокиси углерода устанавливается относительно просто благодаря тому, что при нагревании до температуры 31° С ее граница с пузырьком газа внутри включения исчезает. При охлаждении газовых смесей до отрицательных температур углекислый газ первым обособляется в виде жидкой фазы.

Углекислый газ объединяется с пузырьком газа (пара) при незначительном подогреве (до 25—31° С).

Многообразие природных случаев, выявляющихся при экспериментах с включениями, значительно шире, чем это представлено в видовых подразделениях нашей систематики (см. рис. 24). Вопросу выявления агрегатных состояний геохимических сред минералообразования в следующей нашей книге «Термобарогеохимия» мы посвящаем отдельную главу. Здесь, в описательной части, мы остановимся только на некоторых вполне специфических разновидностях эндогенных газовых сред, фиксированных во включениях.

Включения разнообразных предельных и не предельных углеводородов (прежде всего метана) характерны для минералов высокотемпературного образования щелочных интрузивных пород и пегматитов.

По исследованиям И. А. Петерсилье [56], горные породы Хибинского и Ловозерского щелочных массивов содержат большое количество углеводородных газов и высокомолекулярных «органических» веществ. Газы, по его данным, на 70—90% состоят из углеводородов и на 3—10% из водорода. Негорючие газы — азот и редкие газы — присутствуют в количестве 0,5—8%. В составе углеводородных газов существенно преобладает метан над его гомологами этаном, пропаном, бутаном и встречающимся редко пентаном. Максимальное содержание углеводородных газов, находящихся в закрытых порах включений, приходится на нефелин и калиевый полевой шпат интрузивных щелочных пород. Для ийолит-уртитов среднее содержание и относительные количества газов представлены в табл. 8.

Таблица 8

**Содержание газов в интрузивных породах Хибин**

| Минералы и магматические породы | Содержание газов в минералах, *см³/кг* | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $H_2$ | CO | $CH_4$ | $C_2H_6$ | $C_3H_8$ | $C_4H_{10}$ | $CO_2$ |
| Нефелин | 0,96 | 0,93 | 49,10 | 1,61 | 0,24 | 0,04 | 0,06 |
| Калиевый полевой шпат | 0,67 | 0,92 | 28,04 | 0,44 | 0,03 | 0,06 | 0,002 |
| Среднее для Хибинских пород | 5,14 | 3,74 | 88,31 | 0,77 | 1,05 | 0,06 | 0,93 |

Включения углеводородных газов в минералах Хибин, по исследованиям С. В. Икорского и Н. Г. Закржевской, приурочены к мельчайшим вакуолям в магматических минералах, имеющих размеры от тысячных до сотых долей миллиметра в диаметре. В нефелине уртитов они имеют округло-ограненную, угловатую или трубчатую форму, располагаются или в виде неориентированных друг по отношению к другу скоплений, или же в микротрещинах, пересекающих кристаллы (фототабл. VII, *а* и *б*).

Максимальное выделение метана при взрывании таких включений путем нагревания происходит при температурах 450—550° С. По-видимому, часть из них, более поздних, относится к типу двухфазных нефтегазовых включений синтетических углеводородов.

Наличие газовых включений с примесью горючих газов было установлено З. И. Ковалишиным в кварцах камерных пегматитов и гранитов Коростеньского плутона протерозойского возраста. Содержание $C_nH_{2n}$ в минералах пегматитов колеблется от 2 до 6,5%, а в минералах гранитов от 1,08 до 8,71% по отношению к сумме других газов, главным образом $CO_2+H_2S$ для первых и $N_2$+редкие газы для вторых.

В кристаллах ограненного кварца из пегматитов Волыни нами были встречены включения разновидности $Г_x \gg К$ практически без жидкой фазы (см. фототабл. VII, *в*). Друза вытянутых по призме ультрамикрокристаллов (скорее всего турмалина и некоторых других минералов, пока оставшихся неизвестными) почти не растворяется при нагревании, но несомненно кристаллизовалась в газовой среде, однако не из видимой изолированной ее порции, а вероятно, тогда, когда еще вакуоль не была замкнутой и сохранила свободный доступ окружающим растущий кристалл кварца пневматолитовым агентам. Замыкание включения произошло позднее и рост внутренней миниатюрной друзы минералов-спутников после этого вскоре прекратился.

В другой разновидности включений в топазе Г>(Ж>К) из того же месторождения видно, как минералы-узники (галит, сильвин, рутил, эльпасолит и др.) располагаются в пределах сконденсировавшейся из микропорции газа жидкости, в процессе охлаждения которой происходил рост этих твердых фаз (см. фототабл. VII, *г*).

Нагревание этой многофазовой системы флюида с относительно высокой удельной плотностью приводит к заполнению всего пространства вакуоли газовой фазой, в которой растворяются все или почти все минералы-узники. Таким образом, здесь мы можем видеть и демонстрировать сколько угодно раз большую способность относительно плотного пневматолитового раствора к растворению, переносу и кристаллизации минеральных веществ в пределах герметизирующей вакуоли (а следовательно, и за ее пределами).

Очень любопытной и еще до конца непонятой является разновидность газовых включений $Г \gg (Ж_в+А_г)$. Такие газоводные включения аэрозолей содержат от 1 до 10% водного раствора, а в газовой фазе имеется небольшое количество углекислоты, устанавливающейся посредством ее конденсации путем охлаждения. Однако главной особенностью таких включений является покрытие стенок тонкой пленкой аморфного вещества — силикогеля и углеводородов с очень характерным узором «такырной» трещиноватости (см. фототабл. VII, *г* и VIII). При нагревании до 100—150° С эта пленка переходит в газовую фазу заполнения вакуоли, после чего стенки последней становятся прозрачными. При снижении температуры до обычной эта пленка снова покрывает внутреннюю поверхность вакуоли газового включения и через некоторое время в ней опять возникает сетчатая трещиноватость. Такой узор мы воспроизвели искусственно на стенках стеклянного сосуда, покрытых тонкой пленкой геля. Оказалось несомненным очень близкое сходство ее с природным узором трещиноватости, возникающей при синерезисе.

Нам кажется вероятным объяснить явления, наблюдающиеся в газо-водных включениях разновидности $Г \gg (Ж_в+А_г)$, возникновением аэрозолей (тумана) в пневматолитовой среде при быстром спаде давления и температуры и отложением пленки аэрогеля, претерпевающей затем синерезис. На возможность существования коллоидных растворов в процессах глубинного пневматолитового минералообразования, как известно, указывал Ф. В. Чухров [70], однако доказательство их

существования оказалось возможным получить лишь по третьему каналу генетической информации. Кроме того, существование аэрозолей, например, таких веществ, как $CaCl_2$, $CaSO_4$ и $Al_2(SO_4)_3$, подтверждается составом и состоянием фумарольных газов, в которых резкий спад давлений и температур вызывал формирование газообразных коллоидных сред.

Для нас остается еще не достаточно ясной их роль в глубинном минералообразовании, но фиксация их возникновения и результаты действия внутри систем включений мы приводим в фототабл. VIII. На микрофотографии VIII, *а* представлен «просвет» верхней стенки крупного (1 *мм*) газо-водного (флюидного) включения и ее документация при увеличении разрешающей способности микроскопа МБИ-6 от «а» к «б» и «в».

На микрофотографии VIII, *а* можно видеть «такырную» пентагональную трещиноватость, указывающую на влияние кристаллографической гексагональной структуры включающего минерала-хозяина (кварц из камерных пегматитов Волыни) при синерезисе геля, отложившегося на стенках. Разрывы пленки этого геля при охлаждении до обычной температуры были связаны с сокращением ее объема. Такая «шагреневая кожа» при больших увеличениях оказывается имеет свой характерный рельеф сжатия геля (см. фототабл. VIII, *г* и *в*). В трещинах разрыва, не всегда подчиняющихся пентагональной ориентировке, оставались полоски геля при охлаждении (сжатии), давшие складчатый узор («змейки»), особенно хорошо видимые на микрофотографии VIII, *з*. Если учесть количество геля, отложившегося из микропорций аэрозолей во включениях морионов камерных пегматитов Волыни, становится очевидной заметная роль пневматолитового коллоидного минералообразования. По-видимому, халцедон, кварцин и опал во внутренних полостях этих пегматитов могли образоваться не только в заключительную стадию гидротермального процесса, но и частично в предыдущем пневматолитовом этапе.

Двуокись углерода иногда образует чисто углекислые включения, однако чаще всего ее наличие фиксируется в минералах совместно с водными растворами в виде водно-углекислых включений. Наличие эндогенной углекислоты в земной коре фиксируется не только во включениях минералов. В Новосибирской области в одной из скважин (Межевская площадь) из кристаллических пород фундамента был получен фонтан сухой (чистой) углекислоты с дебитом 200 000 *м³/сутки*. В другом месте Западной Сибири (Самутнильская площадь) при разведке на нефть в основании осадочного чехла была вскрыта газовая залежь, состоящая на 70% из $CO_2$ и на 30% из углеводородов, с дебитом 30 000 *м³/сутки*. В Соединенных Штатах Америки и Чехословакии еще в 30-х годах нашего века несколькими скважинами были вскрыты залежи углекислого газа, который на выходе, резко расширяясь, выпадал в виде снега.

Это очень экспансивное соединение герметизируется во включениях минералов из пород и руд самого различного происхождения: от магматических до пневматолитовых и гидротермальных.

Э. Роддер [86], например, очень тщательно изучил включения углекислоты в оливиновых нодулях и фенокристах из базальтов и других пород 64 разнообразных районов мира и установил, что ее содержание в оливине иногда достигает 0,5 вес. %. В гидротермальных минералах такие включения были известны еще в первой половине прошлого века под названием включений «брюстолина», а А. П. Карпинский [34] доказал, что они являются включениями углекислоты.

Такие включения характеризуются низким показателем преломления и действуют как сильная отрицательная линза. В видимой части спектра включения жидкой и газообразной углекислоты бесцветны и

прозрачны, но отличаются сильной абсорбцией в инфракрасной области.

Они обычно содержат газовый пузырек, часто находящийся в броуновском движении. Самым примечательным диагностическим признаком для них является исчезновение этого пузырька при очень слабом нагреве препарата (до 31° С). Даже в сходящемся свете конденсора микроскопа можно регулировать объем пузырька, изменяя отверстие нижней диафрагмы.

Термическое объемное расширение углекислоты очень велико и, по данным Э. Роддера, при изменении температуры от +4 до +18,2° С оно составляет более 9%. Высвобождение жидкой углекислоты из включений при давлении 1 *атм,* например путем раздавливания их в глицерине или касторовом масле, с подогреванием приводит к ее переходу в углекислый газ с увеличением объема примерно в 350 раз.

Критическая плотность углекислоты составляет 0,468 *г/см*$^3$. При меньшем ее значении включения при нагреве до критической температуры (31,14° С) переходят в газ, а при большем значении — в жидкообразный надкритический флюид. Э. Роддером включения углекислоты, сочетающиеся с затвердевшими, исследованы в минералах базальтов, перидотитов, пироксенитов, дунитов, габбро, кимберлитов и эклогитов. Плотность углекислого заполнения вакуолей включений по окулярмикрометрическим измерениям и расчетам была высокой и колебалась от 0,7 до 0,89 *г/см*$^3$. Включения с плотностью 0,77 *г/см*$^3$ гомогенизировались в жидкую фазу уже при температуре 20° С.

А. А. Ясинской [79] были изучены включения в каменных метеоритах «Саратов», «Охансех», «Белополье», «Червонный кут» и «Юртук». Б этих хондритах и ахондритах в кристаллах вместе с затвердевшими включениями расплавов были обнаружены включения плотной, большей частью сжиженной углекислоты, неравномерно рассеянные по всему объему зерен указанных минералов. Такие плотные включения $CO_2$, по ее данным, гомогенизировались при нагревании от 29 до 31° С в жидкую фазу с мгновенным исчезновением газового пузырька. Появление последнего достигалось только путем охлаждения до температуры —5° С.

Сопоставление описаний включений, сделанных Э. Роддером, в оливинах, титан-авгитах и базальтической роговой обманке магматических горных пород показывает удивительные совпадения их с метеоритами не только в отношении минерального состава, но и включений минералообразующих сред, изученных А. А. Ясинской [79]. Это еще раз подчеркивает единство материи Вселенной и общность проявления основной минеральной формы движения материи. Это же подчеркивается и на примере включений, изученных в стекловатых аэролитах из разных мест. Такие своеобразные «вакуумные» включения довольно обычны в зеленоватых шариках стекла — тектитах (молдавитах), собранных в юго-западной части Чехословакии в галечниках и песках древних террас плейстоцена, в делювии и аллювии голоцена, где они имеют, по-видимому, уже вторичное залегание. По этим включениям нам представляется наиболее вероятным космическое происхождение таких тектитов из кометного вещества.

Впервые включения в чешских тектитах привлекли внимание Р. Роста. Чаще всего это были твердые включения лешательерита и шарообразные газовые пузырьки. Последние не могут быть интерпретированы иначе как включения среды, в окружении которой образовались эти шарики стекла. В относительно крупном пузырьке Р. Рост установил, что давление в нем составляет 35 *мм рт. ст.*

Более подробно такие вакуумные включения в чешских тектитах были изучены Ю. А. Долговым и Н. А. Шугуровой. Путем волюмометрического анализа последняя установила, что в их газовом запол-

нении до 50% водорода, а глубина вакуума составляла всего 0,2 *мм рт. ст.* Другие исследователи состава газов в молдавитах (Деринг и Штутц, 1966) [64] установили в них также водород (41%), окись углерода (33,1%), углекислоту (12,6%) и кислород (0,6%).

В аэролитах Австралии (австралитах) был обнаружен иной состав разреженных газов (Фридман, [64]): вода (86%), окись углерода (7%), углекислота (6,6%) и водород (0,5%).

Все указанные конституенты включений в тектитах встречаются и в газовых включениях земных пневматолитовых минералов, а существенные различия между ними связаны обычно только со значительно большими давлениями глубинной пневматолитовой атмосферы Земли, фиксированной во включениях.

Таким образом, даже космические проблемы могут быть увязаны с третьим каналом генетической информации через физические испытания и анализы включений в метеоритах и тектитах с использованием методов и методик, разработанных для расплавных и газовых включений в земных минералах. Космохимия здесь найдет важный дополнительный источник объективной информации.

На рассмотрении разнообразных явлений, происходящих в газовых включениях при изменении их термодинамических параметров в процессе экспериментов, нам придется детально остановиться в четвертом разделе работы. Здесь же мы должны подчеркнуть необходимость внимательного исследования природы газообразных включений применительно к процессам глубинного пневматолиза, так как формальный подход в учете их наличия может приводить к неправильным заключениям.

Прежде всего в вязких магматических средах (до 6—10 *пуаз* и выше) диффузия содержащихся в них легколетучих компонентов является затруднительной, особенно если они успевают объединиться в виде газовых пузырьков. Примеры консервации таких порций газов в обсидианах, мандельштейнах, перлитах и других эффузивных породах очень многочисленны. Характерна шаровидная форма газовых пузырьков, но если потоки лав были очень подвижны, пузырьки приобретали вытянутую форму, показывающую направление течения магмы от центра извержения.

При кристаллизации магмы на глубине, т. е. при образовании интрузивов на месте интрузий, также могут возникать газовые включения, как это впервые показали Ф. К. Шипулин [74] и Ф. Г. Смит [63], а в уртитах и щелочных пегматитах С. В. Икорский [28] (см. фототабл. VII, *а* и *б*).

Ни в том, ни в другом случае нельзя рассматривать включения газов в качестве свидетелей самостоятельного развития пневматолиза. Однако эти случаи наиболее просто подвергаются научному дешифрированию.

Значительно труднее это делать для описанного случая, когда газовые пузырьки представляют собой только части (фазы) затвердевших кристаллогазовых включений. Если они принимаются за самостоятельные включения газообразных пневматолитовых сред, то по отношению к пегматитовым зонам такие неправильные интерпретации приводят к существенному расширению границ пневматолиза. Учет этих *псевдогазовых* (хотя конечно и состоящих из газа) включений-пузырьков представляется нам полезным лишь для определения состава минерализаторов в остаточных и обычных магмах.

Как будет показано в следующей главе и отмечалось нами ранее [22], при спаде давлений в гидротермальном процессе, вызывающем вскипание и гетерогенизацию жидких водных растворов, обособившиеся газовые пузырьки прилипают к поверхностям граней растущих

кристаллов и консервируются ими в гетерогенной минералообразующей среде.

Этот действительно существующий механизм образования *аномально-газовых* включений (см. главу 16) особенно подчеркивается В. Ф. Барабановым, который, используя его, дошел до нерезонного отрицания глубинного пневматолиза вообще.

Как видно у каждого, даже очень тонкого исследователя минерального мира при использовании острейшего генетического оружия — микрообразцов геохимических минералообразующих сред — имеются возможности ошибочных заключений, если им не учитывается великое многообразие природных процессов и явлений, подходить к которым нельзя неосмотрительно или с какой-либо одной меркой.

Классы существенно газовых и газо-водных включений в их истинном, объективно различающемся виде характеризуют гомогенные газовые среды пневматолиза и отличаются от псевдогазовых и аномально-газовых включений исключительной выдержанностью в коэффициентах наполнения при обычной температуре и одинаковой температуре гомогенизации в газовую фазу для семейств, принадлежащих к одной зоне роста или трещине залечивания.

Иногда включения жидких растворов вследствие дегерметизации и удаления из них жидкости по трещинкам оказываются заполнены паром очень малой плотности и выглядят так же, как газовые включения.

Однако здесь мы имеем дело с аномальным явлением, которое освещается ниже. Аномальные включения легко различаются среди семейства других нормальных включений растворов минералообразующих гидротермальных и пневматолитовых сред (см. главу 16).

### *Включения жидких гидротермальных растворов*

Жидкие водные включения вследствие того, что в них очень часто наблюдается газовый пузырек, называют газово-жидкими включениями. Такие включения были известны в прозрачных минералах очень давно и самые первые сведения о них связаны с именем отечественного ученого — энциклопедиста раннего средневековья ал-Бируни (972—1050 гг.), проживавшего на территории Хорезма (Узбекская ССР). В книге «Собрание сведений для познания драгоценностей», опубликованной АН СССР в серии «Классики науки», говорится: «Все прозрачные минералы в основе своей — текучие жидкости, которые окаменели. На это тебе указывает наличие в них инородных примесей вроде пузырьков воздуха, капель воды...» (стр. 39). Это было первое использование включений для выводов о происхождении включающего минерала.

При современном изучении систем жидких включений выявляется их большое разнообразие. Широкое развитие гидротермальных процессов в глубинах земной коры обусловило и широкое распространение таких включений, являющихся подлинными образцами жидких гомогенных минералообразующих растворов.

Однако по этой причине никак нельзя включения жидких минералообразующих растворов рассматривать как нечто самое главное, а охарактеризованные два класса других включений минералообразующих сред отодвигать на задний план или совсем не учитывать. Впрочем, это делается совсем немногими исследователями, отрывающими изучение включений от месторождений и геологической среды.

Наблюдения включений при комнатной температуре только в одной их разновидности ($Ж_в$) показывают отсутствие заметных изменений после герметизации микропорций холодной или тепловодной жидкости.

Во всех других случаях, когда происходила консервация достаточно нагретых (выше 60° С) жидких водных растворов, во включениях по

мере остывания их до комнатной температуры происходило сжатие включенной жидкости, и в освободившееся пространство включений выделялась равновесная с жидкостью газовая фаза (пузырек пара), а при значительной концентрации растворов, кроме того, кристаллизовались одна или несколько твердых фаз дочерних минералов-узников.

При обычной температуре во включениях вида истинных водных растворов отчетливо различаются разновидности одно-, двух-, трех- и многофазовых включений, описывающиеся формулами $Ж_в$, $Ж_в \gg \gg Г_п$, $Ж_в > (Г_п + К_л)$, $Ж_в > (Г_п + К_л + К_т)$, $Ж_в \geqslant (Г_п + К_л + К_т + К_р)$. За исключением первой разновидности, все они при нагревании до разных, иногда высоких температур превращаются из гетерогенных систем в исходные однофазовые включения жидких истинных, водных, гомогенных растворов, при медленном охлаждении восстанавливающих снова прежние объемные соотношения фаз.

С точки зрения выяснения температурных условий образования минералов основное значение имеют включения истинных жидких водных растворов. Эти включения абсолютно характерны для гидротермальных и холодноводных минералов. Когда они встречаются в минералах, кристаллизовавшихся из магматического расплава или в пневматолитовых минералах, то обычно легко улавливаются признаки их вторичного образования, связанного с позднейшим воздействием гидротермальных и «метаморфогенных» растворов на эти минералы, породы и руды.

Вакуоли однофазовых включений холодноводных растворов разновидности $Ж_в$, как это было указано нами ранее [17], при обычной температуре полностью заполнены той гомогенной жидкостью, которая представляла собой их окружение при минералообразовании (кристаллогенетическая среда). Не было никаких стимулов для ее сжатия и образования газовой фазы в виде пузырька пара, так как былой низкий термодинамический уровень кристаллизации почти не испытал изменений до наших дней.

Такие включения особенно многочисленны в минералах лагунного происхождения (гипс, галит и др.) (фототабл. IX, *а*), в фригидных образованиях кор выветривания и инфильтрационных месторождениях.

Они обычны в кальците, в арагоните сталактитов и сталагмитов и при кристаллообразовании, связанном с диагенезом осадков, например аутигенных кварцев из конкреций и прожилков в известняках Подмосковья. Однофазовые включения очень характерны для рудных минералов, образовавшихся в вадозных условиях морей и озер. Например, они наблюдаются всегда в сфалеритах, образовавшихся внутри фосфоритовых желваков Подолии, и в кристаллах серы экзогенного происхождения.

Наиболее полное изучение жидких включений в кристаллах самородной серы из Шорсуйского и Раздольского месторождений было недавно выполнено Н. П. Юшкиным и Б. И. Сребродольским [78], краткие данные которых мы приводим ниже.

Однофазовые жидкие первичные включения, имеющие размеры от 0,001 до 1,5 *мм*$^3$, занимают в среднем 1—2% объема кристаллов, часто имеют веретенообразную или каплевидную форму и содержат на стенках пленку затвердевшего битума. Встреченные в единичных случаях газовые пузырьки в сере и целестине несомненно связаны с дегерметизацией этих включений и утечкой части жидкости по трещинкам.

По месторождению Шорсу из навески серы было высвобождено и химически исследовано содержимое включений и установлено, что серообразующие вадозные растворы являются сероводородными, хлоридными, щелочноземельно-натриевыми с общей минерализацией около 60 *г/л*.

Следует отметить, что не только кристаллы экзогенных вод могут содержать однофазовые жидкие включения. Гидротермальный процесс на эндогенных месторождениях часто доходит до тепловодного и холодноводного состояния растворов и в минералах самых последних генераций встречаются также однофазовые жидкие включения. Впервые с этим мы столкнулись на примере желтого флюорита самой поздней генерации из месторождений плавикового шпата Забайкалья.

Очень редко встречаются жидкие включения истинных водных растворов, не имеющие газового пузырька, но содержащие один-два минерала-узника веществ, обладающих очень высоким температурным коэффициентом растворимости.

В этом случае снижение температуры с 40—50 до 20° С не было достаточным для обособления пузырька пара в микроампулах включений вследствие сил сцепления жидкости со стенками вакуолей, но обеспечивало кристаллизацию таких дочерних минералов-узников, как сильвин. Однако эту разновидность жидких включений $Ж_в \gg К_л$ из-за ее редкости мы не включили в классификацию (см. рис. 24).

Самыми обычными в гидротермальных минералах являются двухфазовые включения истинных водных растворов, степень наполнения которых жидкостью при обычной температуре всегда меньше единицы. Они не целиком заполняют поры в кристаллах, так как содержат часто подвижный сферический пузырек газа (пара), который иногда называют либеллой или мениском. В период пленения растущим кристаллом нагретый гомогенный водный раствор полностью занимал полость включения. Как указывалось, в процессе охлаждения минерала до обычной температуры в результате сжатия жидкости и спада давления внутри вакуоли возникло свободное пространство, заполнявшееся равновесным с жидкостью газом (паром). Образование свободного пространства во включении по мере охлаждения минерала связано с тем обстоятельством, что температурный коэфициент сжатия вакуоли кристалла всегда на один-два порядка ниже, чем у заполняющего ее жидкого раствора. Объем пузырька будет равен разности этих двух изменений и всегда меньше половины объема всего включения.

В общем виде *пузырек сжатия* будет тем большего размера относительно жидкой фазы, чем более нагретым был раствор в период роста или регенерации кристалла. Такие жидкие включения представлены на микрофотографиях в различных минералах (см. фототабл. IX).

Они могут иметь очень разнообразные размеры и самую различную форму. Часто они представляют собой негативные кристаллы, грани которых закономерно ориентированы к наружным граням минерала-хозяина (см. фототабл. IX, *в, г*).

Трехфазовые и многофазовые включения жидких концентрированных растворов возникли тем же путем. В результате охлаждения капелек концентрированных растворов в изолированных порах кристаллов в них возникает не только газовый пузырек, но и вследствие пересыщения раствора кристаллизуется одна или несколько твердых фаз, образующих дочерние минералы-узники. Чаще всего в таких жидких включениях наблюдаются изотропные кубические кристаллики хлоридов, реже кристаллизуются фториды, карбонаты, сульфаты, окислы, силикаты и сульфиды. Изображение таких включений, описывающихся формулами $Ж_в > (Г_п + К_л)$, $Ж_в > (Г_п + К_л + К_т)$ и $Ж_в \geqslant (Г_п + К_л + К_т + К_р)$, можно видеть на микрофотографиях (фототабл. X, XI). В одной из самых ранних генераций флюорита в камерных пегматитах гранитного интрузива Бектауата нами были выявлены во включениях предельно насыщенные жидкие растворы гидротермальной рапы, в которых количество разных по составу дочерних минералов-узников, кристаллизовавшихся внутри каждого включения, колебалось в пределах от 25 до 28 [24].

В многофазовых включениях можно иногда наблюдать нарастания одного минерала-узника на другой и, таким образом, иметь суждения об их «внутренних парагенетических отношениях». Однако наиболее полно вопрос последовательности их образования решается посредством нагревания и медленного охлаждения включений. Последовательность растворения («таяния») минералов-узников всегда обратна порядку их кристаллизации («восстановлению»).

Естественно, что в таких жидких включениях родственное вмещающему кристаллу вещество выделяется только на стенках включения (дополнительная твердая фаза) и иногда можно различать своеобразный ободок этого вещества вокруг современных границ включения [22].

Микроминералометрия физико-химических свойств дочерних кристаллов-узников и очень тонкие методы их определения составят в будущем значительный раздел минералогии (ультрамикроминералогия включений). Определение их состава очень существенно приближает нас к выявлению химизма гидротермальных рудообразующих растворов. Поэтому более подробные сведения о многофазовых включениях мы приведем позднее (глава 18) и при рассмотрении методов определения химического состава растворенных веществ в минералообразующих средах.

После того как появились конструкции высокотемпературных термокамер к микроскопу, повысился интерес к исследованиям высокотемпературных затвердевших и других включений в магматических горных породах.

Высокотемпературная гомогенизация расплавлением затвердевших включений была и остается понятной. Однако Ю. Т. Базаровой [4] в щелочных породах Восточных Саян, Приазовья, Кольского полуострова и в пегматитах Ильменского заповедника были установлены двухфазовые газово-жидкие включения в нефелинах и пироксенах, которые только при нагревании от 700 до 850° С превращались в гомогенные капли жидкости, иногда с отчетливым оплавлением стенок герметизирующих их вакуолей. Газовый пузырек свободно перемещался в них уже начиная с температуры 200° С и выше, чего не наблюдается в обычных аморфных включениях магматического (вулканического) стекла фенокристаллов эффузивных пород разновидности $А_с \gg Г$. Именно поэтому пока можно согласиться с предположением автора, что «жидкая фаза этих включений представляет собой раствор силикатов натрия типа жидкого натриевого стекла». По-видимому, силикатные жидкости, сосуществующие во включениях с водным раствором, изредка встречались в минералах камерных пегматитов [22] и были описаны формулами $Ж_в + Ж_х + Г$ и $(Ж_в > Ж_х) > (Г_п + К)$. Однако термометрически исследованные Ю. Т. Базаровой включения разновидности $Ж_х > Г$, по-видимому, занимают положение, промежуточное между отмеченными и отвердевшими включениями $А_с \gg Г$. В природе иногда очень трудно провести четкие разграничения между явлениями, особенно когда они еще недостаточно изучены.

Это относится, например, и к следующему виду *жидких водно-углекислых* включений, описывающихся формулами $Ж_в \geqq (Ж_у + Г)$ и $Ж_в + Ж_у + Г + К_л$. Разграничение между ними и газовыми углекислыми включениями также условно и зависит от относительного количества главных компонентов, т. е. жидкой $H_2O$ и жидкой $CO_2$. Если при обычной температуре $ЖCO_2 > ЖH_2O$ — это газовое включение, а при обратном соотношении — жидкое водно-углекислого состава. Эти разновидности включений оказались характерны не только для гидротерм, но и для растворов, участвующих в глубоком метаморфизме пород. Так, по данным Ю. А. Долгова, В. М. Макагона и В. С. Соболева, они распространены в дистене из дистен-гранат-двуслюдяных сланцев Мам-

ского района и представляют собой сильно уплотненные жидкости, которые сохраняют, даже после искусственного охлаждения до минусовых температур, внутреннее давление, превышающее парциальное давление двуокиси углерода. Такие включения при обычной температуре не имеют газовой фазы и описываются формулами $Ж_у+Ж_в$, $Ж_у+Ж_в+К_л$ или $К_т$. Общее давление, при котором они были законсервированы, составляло 2500 *атм.*

Упрощенный подход в разграничениях оказывается пока необходимым для облегчения в практическом освоении предмета широкими кругами геологов.

Если жидкая углекислота количественно будет преобладать во включении при обычной температуре над водным раствором, то при нагревании выше 31,1° С она перейдет в газообразное надкритическое состояние и растворит воду. Включение, таким образом, станет гомогенным в газовой фазе. В нормальном ходе гидротермального процесса кристаллизации минералов из гомогенных геохимических сред чаще бывает наоборот, и водноуглекислые включения в подавляющем большинстве гомогенизируются в жидкой фазе водного раствора, насыщенного в той или иной степени углекислым газом. Именно поэтому в предложенной схеме классификации такие водно-углекислые включения помещены в классе жидких гидротермальных включений. В дополнение к сделанным пояснениям мы приведем лишь типичные микрофотографии сложных систем таких водно-углекислых и углекисло-водных включений (фототабл. XII).

Вид включений *жидких коллоидно-водных* растворов, выявленный в трех разновидностях Ю. А. Долговым [14], восполнил существовавший в науке пробел, связанный с диагностикой гидротермального коллоидного минералообразования. Хотя продукты последнего имеют весьма специфические черты и общеизвестные признаки колломорфного строения, до недавнего времени продолжались попытки отрицания роли коллоидов в глубинном рудном процессе. «Живые» свидетели последнего в виде своеобразных включений были обнаружены в разных геологических ситуациях и особенно в связи с вулканогенной деятельностью, минерализацией и изменениями в эффузивных и дайковых породах основного состава, вмещающих залежи агата и исландского шпата. В скарново-гидротермальных рудообразованиях месторождений Тетюхинской группы нами были установлены бесспорные отложения гелеподобного вещества в виде *хлопьевидно-губчатых включений* в кварцах многоглавого роста («шашечный» кварц), законсервированного при температурах 90—100° С, и коллоидные пленки гелей, отложившиеся при температурах 230—240° С и отделившие две генерации кварца друг от друга. Тогда впервые было показано, что кристаллы могут расти не только из истинных, но и коллоидно-дисперсных систем [22].

Однако только Ю. А. Долгову [14] удалось в первом приближении охарактеризовать включения-индикаторы коллоидного минералообразования. Им выявлены в природе и воспроизведены *бахромчатые включения геля,* превратившегося в раскристаллизованный силикогель. Последний образует внешнюю кайму каждого такого включения, внутри которой обособилась герметизированная ею нагретая синеретическая жидкость. В этом коллоидном растворе при охлаждении, как и обычно, образовывался пузырек сжатия (см. рис. 26).

Такая разновидность, механизм образования которой будет охарактеризован в следующей главе, в классификации коллоидно-водных включений описана формулой $Ж_з+К_г+Г_п$.

Позднее оказалось, что не менее распространенными в эффузивных и дайковых породах являются вторичные *«корково-скорлупчатые»* включения разновидности $Ж_з+А_г+Г_п$, часто связанные с поствулканической деятельностью. Эти включения вначале концентрированных

коллоидных растворов образуют в межзерновых пространствах и микропустотах выщелачивания пород самоизолировавшиеся системы синеретического слабоколлоидного или в конце даже истинного водного раствора. Герметизирующей его оболочкой является аморфный силикогель, обычно с гидроокислами железа.

Для детального изучения коллоидно-водных включений наиболее удачными оказались опал-халцедоновые оторочки гнезд исландского шпата в траппах месторождений Якутии. Такие включения, изученные нами совместно с Ф. П. Мельниковым в микротермобарометрической лаборатории МГУ, представлены на фототабл. XIII. Механизм формирования таких секреционных субсингенетических включений характеризуется ниже, а здесь мы ограничимся только их формальным описанием. Как можно видеть на фототабл. XIII, эти включения можно было бы посчитать сходными с обычными двухфазовыми включениями жидких водных растворов и отметить на их стенках явление сенеретического узора трещиноватости, в некоторой мере сходного с ранее описанным для аэрогелей (см. фототабл. VIII). В центре находится газовый пузырек сжатия окружающего их водного раствора. Однако последний при обычной температуре изучения представляет собой лишь каплю обособившегося в данном участке геля синеретической жидкости. К центру этого участка оказывается приуроченным образование, воспринимающееся нами как самостоятельное газово-жидкое включение. Между тем в отличие от обычных жидких включений, герметизированных в кристаллических решетках, каждое такое включение представляет собой лишь часть образующей его системы, а другая, большая по объему часть выделившего жидкость при синерезисе геля была очень активной в отношении образования четко оконтуренного коллоидно-водного включения. Попросту говоря, в центре каждого неясно очерченного участка геля концентрировалась синеретическая жидкость, при охлаждении раствора давшая газовый пузырек сжатия. Таким образом, не капля законсервированного истинного гидротермального раствора выделила на стенках порцию родственного минералу вещества, а, наоборот, последнее (гель) обособило при синерезисе каплю водной жидкости в виде включения. Внешний контур обезвоженного геля визуально-микроскопически обычно прослеживается неотчетливо (хотя и заметен, фототабл. XIII, *б, в*). Только гидроокислы железа иногда могут оконтуривать материнские для коллоидно-водного включения участки коллоидного вещества (см. фототабл. XIII, *а*). На вопросах, связанных с формированием таких включений, мы еще остановимся в главе 15.

Здесь лишь отметим, что коллоидные растворы фиксируют свою деятельность и в виде макровключений в миндалинах основных эффузивов, в которых их надежная самоизоляция обеспечивается слоистой «скорлупой» из халцедона и опала. Однако в отличие от предыдущей разновидности в них из сенеретической остаточной жидкости, представлявшей уже истинный водный раствор кремнезема, в заключение процесса происходила кристаллизация «головок» горного хрусталя или аметиста. Всю систему таких включений можно описать формулой $Ж_{в\,(з)} + А_г + К_т + Г_п$.

К большому сожалению, такие жидкие включения из-за их значительных размеров и непрозрачности стенок вакуолей не удается исследовать в виде целостных систем, так как после вскрытия жидкие и газовые компоненты оказываются выведенными из равновесия.

Познанию сходных включений очень содействовали факты, полученные Л. А. Приказчиковым [57] по гигантским кристаллам морионов из камерных пегматитов Волыни.

Эти очень поучительные месторождения предоставили многообразные материалы исследователям эндогенных геохимических растворов,

среди герметизированных образцов которых встречаются жидкие водные включения объемом до 400—500 *см*³, надежно сохранившиеся свыше полумиллиарда лет в вакуолях кристаллов.

В кристаллах-гигантах Л. А. Приказчиков из четырех включений отобрал пробы минералообразующих растворов, относящиеся, по нашим исследованиям, к самой поздней стадии регенерации этих кристаллов, отвечающей образованию аметиста, халцедона и опала в природных резервуарах-кристаллизаторах этих пегматитов.

Остаточные растворы в заключение своей деятельности законсервировали сами себя в вакуолях трещин и в щелевидных пространствах между индивидами многоглавого роста кристаллов.

Порции этих растворов вначале самоизолировались зоной сплошного серого кварца, затем корой шестоватого горного хрусталя, нарос-шего на стенках полости минерала-хозяина (мощность 7—8 *мм*), на которой образовалась 5-миллиметровая зона гидроокислов железа (гематит, гидрогётит), в свою очередь перекрытая коркой халцедона мощностью до 1,5 *мм* с обращенными внутрь, как и в агатовых миндалинах, головками ограненных кристаллов кварца завершающего момента герметизации. Эти кристаллы выросли внутри включения из последних порций раствора в процессе его окончательного охлаждения.

Естественно, что такие поздние растворы, выделившие внутри образовавшихся вакуолей столь большое количество минеральных веществ, теперь при обычной температуре, по данным Л. А. Приказчикова, оказались очень слабыми, почти нейтральными, содержащими лишь следы кремнезема и небольшое количество сопутствующих веществ, представленных по двум крупнейшим включениям (I — 400 *см*³ и II — 150 *см*³) в табл. 9 (анализы лаборатории ВСЕГЕИ).

Таблица 9

**Результаты анализов позднегидротермальных растворов в очень крупных включениях кристаллов кварца Волыни**

| № включений | $Cl^-$ | $HCO_3^-$ | $SO_4^{2-}$ | Сумма анионов | $Ca^{2+}$ | $Mg^{2+}$ | Na+K | Сумма катионов |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| I | | | | | | | | |
| *мг* | 0,88 | 21,75 | 2,60 | 24,83 | 7,20 | Сл. | 1,60 | 8,80 |
| *мг·экв* | 0,025 | 0,350 | 0,54 | 0,429 | 0,360 | — | 0,069 | 0,429 |
| II | | | | | | | | |
| *мг* | 2,14 | 21,37 | Сл. | 23,51 | 8,80 | Нет | 1,48 | 10,28 |
| *мг·экв* | 0,06 | 0,350 | — | 0,504 | 0,440 | — | 0,064 | 0,504 |

Таким образом, растворы, завершавшие минералообразование в камерах пегматитов и в вакуолях описанных очень крупных включений, относятся к бикарбонатно-кальциевому типу, вещества которых почти полностью отложились или кристаллизовались на стенках полостей, что особенно характерно для вида коллоидно-водных включений остаточных растворов.

Описанная разновидность «корково-скорлупчатых» включений представляет собой сложное образование, в котором сочетаются признаки существования и действия обычных истинных и коллоидных растворов. Она в наиболее упрощенном виде может быть охарактеризована формулой $(К_г + Ж_з) + (Ж_в > К_т \gg Г_п)$, в которой вторая ее часть характеризует современное состояние включений, а первая отражает начальный этап их самоконсервации.

IV часть нашей книги, посвященная разнообразию заполнения вакуолей включений минералообразующими средами, кроме ряда зарисовок, иллюстрируется 57 микрофотографиями, помещенными на первых 13 фототаблицах. Пока еще не составлен фотоатлас — определитель включений в минералах; эти микрофотографии, сопровождающиеся пояснениями, помогут исследователям в диагностике видов и разновидностей включений растворов и расплавов. Однако в VI части работы (глава 18) мы уделяем дополнительное внимание оптическим способам визуального изучения и распознавания природы включений по их составу и состоянию, а внутривакуольную ультрамикроминералогию многофазовых включений отдельно рассматриваем в главе 20.

В заключение IV части нашей книги подчеркнем, что замыкания каждого из наблюдающихся включений расплавов и растворов, которые окружали минералы и из вещества которых они образовались, это процесс разной и неизвестной для нас длительности (отнюдь не всегда быстрый). Трансформация включений до их современного состояния тем более должна рассматриваться с учетом координаты времени.

При детальном исследовании никогда нельзя забывать элемента истории формирования самих включений и при ретроспективном восстановлении условий их образования необходимо учитывать сложное развитие этих микрообъектов, представляющих геологам столь важные факты для диагностики процессов минералообразования.

Даже статическое изучение стабильных при комнатной температуре систем минералообразующих сред представляет нам очень важный источник научной информации о фактах геологического прошлого. Выявленные в минералах разных эндогенных месторождений и закономерно повторяющиеся в одних и тех же типах консерваты рудообразующих сред в трех главных группах, девяти видах и сорока разновидностях представляют нам *азбуку генетического кода*, объективно выявляющую общие различия и тонкие нюансы изменений в развитии процессов глубинного минералообразования.

Однако еще далеко недостаточно уметь различать описанные включения геохимических сред по их составу и состоянию. Представляется необходимым для правильного использования их в науке и практике учитывать и относительное время и *механизм их образования,* что является содержанием V части книги.

Часть V

# ПРОИСХОЖДЕНИЕ И ОТНОСИТЕЛЬНОЕ ВРЕМЯ ФОРМИРОВАНИЯ ВКЛЮЧЕНИЙ МИНЕРАЛООБРАЗУЮЩИХ ГЕОХИМИЧЕСКИХ СРЕД

Впервые генетический элемент в классификации включений внес Ф. Циркель, принявший предложение Г. Фогельзанга о делении включений на «первичные», образовавшиеся во время роста кристалла, и «вторичные», образовавшиеся в результате попадания растворов в трещины кристалла... Таким образом, мы сейчас, как и в 1929 г., принимаем основное деление жидких включений на «первичные» и «вторичные». Эти термины должны лишь отражать характер образования. Первичные включения образовались при всех явлениях роста или регенерации кристалла, а вторичные включения — при явлениях залечивания трещин в кристаллах, независимо от того, происходило ли это залечивание сингенетично или постгенетично с процессами, при которых происходил сам рост кристалла.

*Г. Г. Леммлейн* [45]

## Глава 14

## ВОЗРАСТНОЕ ВЗАИМООТНОШЕНИЕ ВКЛЮЧЕНИЙ И КОНСЕРВИРУЮЩИХ ИХ МИНЕРАЛОВ

### *Общее значение вопроса и трехчленное возрастное подразделение включений на классы*

Каждый природный макро- или микрообъект исследования имеет генетическую историю своего формирования, занимающую в координате времени тот или иной интервал. Однако определение абсолютного времени и продолжительности любого геологического или геохимического процесса до сих пор еще встречается со значительными затруднениями.

Те или иные семейства включений минералообразующих сред в координате времени оцениваются по их отношению к элементам внутренней морфологии кристаллов, например к прослеживающимся от их центра к периферии зонам и пирамидам роста. Приуроченность включений к плоскостям былых граней роста или к микротрещинам, пересекающим только внутренние зоны кристаллов или друг друга, или же к сквозным трещинам, нарушающим весь кристалл и однородность группы кристаллов, слагающих руду или породу, должна определяться со всей возможной тщательностью. Для исследователей, пытающихся подходить к минеральной природе не только с позиций описания морфологии, выявления состава и физических свойств минеральных индивидов и их парагенезисов, но и с генетических позиций, представляется необходимым увязывать полученные по включениям факты с определенной последовательностью герметизации содержимого самих этих включений, возникших внутри минералов.

В этом отношении *онтография минералов* при ее сочетании с исследованиями включений минералообразующих сред может превратиться в *онтогению и филогению минералов,* которые позволят осуще-

ствлять генетическую расшифровку многообразных аспектов формирования кристаллов и руд каждого эндогенного месторождения в его былом динамическом развитии.

Любые объекты природы вне зависимости от их размеров возникали и существуют в координатах времени и пространства. Эти категории совершенно неотделимы друг от друга и включения в минералах также не могут рассматриваться вне зависимости от них. Только при очень формальном изучении этих включений, как таковых, без постановки каких-либо научнопрактических целей их использования можно допускать здесь безразличное отношение.

Еще в прошлом веке впервые Г. Фогельзанг (1867 г.), А. А. Ауэрбах (1870 г.), а затем Ф. Циркель (1893 г.) сделали большой шаг вперед, установив относительно разное время образования газово-жидких включений в минералах. Они разделили включения на *первичные,* возникшие сингенетично с кристаллами и связанные с элементами их роста, и *вторичные,* возникшие постгенетично по трещинам, нарушившим минералы после их образования. Такое подразделение позволило разобраться в том, что часть газово-жидких включений не является синхронной образованию включающих минералов.

Таким образом, при интерпретации данных, полученных по включениям, каждому исследователю оказалось необходимым не только четкое понимание разнообразной природы их заполнения (см. предыдущую главу), но и выяснение относительного времени и механизма их образования в кристаллах. Первое достигается исследованием состава и первоначального фазового состояния содержимого включений, второе — выяснением их морфологии и пространственного распределения в каждом кристалле-хозяине.

Как будет показано ниже, 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 геолого-генетической интерпретации результатов экспериментов с включениями. Однако этот фактор в приложении к изучению включений, как уже отмечалось, может оцениваться только по отношению ко времени образования различных элементов роста минерального индивида с учетом его положения и соотношения с другими минералами в рудных телах и породах.

Именно благодаря тому, что подавляющим большинством исследователей прошлого века не учитывалось разнообразие способов и время образования включений в минералах, они нередко при интерпретации полученных по включениям данных приходили к противоречивым результатам. В большой степени поэтому интерес к включениям был надолго утрачен. Для иллюстрации сказанного достаточно напомнить старый спор между нептунистами и плутонистами относительно происхождения гранитов. В этом споре нептунисты аргументировали водное происхождение гранитов встречающимися в трещинках кварца этих пород жидкими включениями водных растворов. Только с конца прошлого века стало вполне ясно, что эти включения вторичны по отношению к пирогенным минералам. Они образовались значительно позднее гранитов в результате залечивания трещинок в минералах в процессе пневматолито-гидротермального метаморфизма этих пород.

Таким образом, в истории использования включений минералообразующих растворов в минералах для разрешения научных задач большое значение имело понимание «первичности» или «вторичности» этих включений. В начальный период их использования как саморегистрирующих термометров вторичное происхождение включений совсем не учитывалось и не выяснялись способы их возникновения. Последний вопрос был рассмотрен русским ученым А. Ауэрбахом (1870 г.), который на примере изучения закономерностей расположения газово-жид-

ких включений в топазе дал правильное объяснение образованию вторичных включений в результате обособления порций растворов в процессе залечивания ими микротрещин в кристаллах.

Способ образования вторичных включений в результате дендритного зарастания трещинок в кристаллах легкорастворимых солей наиболее обстоятельно и с большей наглядностью был показан Г. Г. Леммлейном (1929 г.), который сформулировал также и важнейшие признаки распознавания вторичных включений. Однако после его работы, показавшей в качестве «общего явления для многих минералов» приуроченность включений к трещинкам, наступил резкий спад интереса к изучению включений вообще, да и сам автор более чем на два десятилетия перестал ими заниматься. Создалось неправильное впечатление, что все или почти все включения относятся к постгенетичным для включающих минералов процессам, т. е. имеют вторичное происхождение.

Доказательства способов образования первичных включений, выявленные еще А. В. Шубниковым, оказались почти забыты, а эксперименты с включениями растворов в природных кристаллах почти прекращены. В 30-х годах только один В. Ньюхауз вслед за М. Бергером применил метод температурных определений по включениям, пользуясь, впрочем, неточным критерием их первичности, заключающимся в обязательном нахождении включающих минералов в *занорышах* и других открытых полостях [82].

Очень важное генетическое значение включений, приуроченных к субсингенетическим залеченным трещинкам и весьма распространенных в минеральном мире, по установившейся уже традиции, продолжало недооцениваться и в 40-х годах нашего века. Такие включения считались, в частности, совсем непригодными при определении температур образования минералов методом гомогенизации, а при ориентации только на «чисто» первичные включения резко сужались возможности генетических исследований минералов и руд.

Наиболее характерным признаком первичности включений справедливо принималась приуроченность их к былым граням или другим реальным элементам роста кристаллов. Отсутствие такой приуроченности и, в частности, расположение включений по залеченным трещинкам в минерале, пересекающем зоны и пирамиды роста или же друг друга, вслед за Г. Г. Леммлейном [1929 г.] считалось характернейшим признаком для вторичного постгенетического образования таких включений. Это в мировой литературе и практике исследований газово-жидких включений превратилось почти в незыблемое правило [78].

В связи с практическими надобностями оценки качества природного пьезооптического кристаллосырья нам пришлось с 1941 г. вплотную заняться изучением включений, оказавшихся важнейшим дефектом для этих видов минерального сырья. Прозрачность кристаллов пьезокварца, флюорита и исландского шпата очень облегчила изучение их внутренней морфологии и закономерностей распределения в них газово-жидких включений. Последние в действительности далеко не всегда оказывались приуроченными к первичным элементам роста кристаллов. Была выявлена наиболее обычная связь их с залеченными микротрещинами, нарушавшими сплошность почти каждого минерала-хозяина.

Семейства включений, находившиеся в пределах каждой микротрещины, обычно показывали удивительное постоянство в соотношениях объемов фаз: жидкий раствор — газовый пузырек. Однако самым важным признаком, который впервые нам удалось достоверно выявить на примере изучения многих сотен ограненных зонарных минералов и фантом-кристаллов, был факт перекрытия вмещающих включения трещинок теми или иными сингенетичными моменту их залечивания

наружными зонами нарастания кристаллов. Даже поздние микротрещины, которые казалось бы пересекали все зоны роста кристаллов на самом деле, перекрывались в своем «устье» очень тонким или даже тончайшим (несколько десятков микрон) «слоем» кристаллического вещества, принявшим завершающее участие в формировании минерала.

Таким образом, для минералов, кристаллизовавшихся в открытых полостях и обычно имеющих залеченные внутренние трещинки, было установлено, что по существу все газово-жидкие включения растворов являются не эпигенетическими, а сингенетическими образованиями. При этом семейства казалось бы вторичных включений, располагавшихся в разных залеченных трещинках, но перекрывавшихся одной определенной зоной роста кристалла-хозяина, обнаруживали полное сходство фазового заполнения и одинаковую температуру гомогенизации. Таким образом, нам стало ясно, что нельзя ограничиваться выделением только двух классов включений в минералах — *первичных* и *вторичных,* и что по относительному времени образования необходимо выделять промежуточный между ними класс, объединяющий признаки тех и других [21].

Дальнейшее изучение условий образования и расположения в кристаллах таких газово-жидких включений продолжалось, и по мере изучения новых кристаллических индивидов мы решились обособить их под названием *регенерационных* включений, указав, что «вторичные гипогенные, регенерационные включения не должны недооцениваться, тем более потому, что они имеют и «первичное» значение..., могут показать температуру образования наружного слоя кристаллов или по меньшей мере могут помочь установить изменения температурного режима на месторождениях после главного этапа их образования» [18, стр. 65]. В качестве наиболее простого аргумента в пользу этого нами были предложены наблюдения, относящиеся еще к 1942 г., когда в фантом-кристаллах флюорита с Куликолона были установлены залеченные трещинки с газово-жидкими включениями. Это залечивание внутреннего кристалла происходило параллельно с начавшимся нарастанием наружной части кристалла и, следовательно, такие вторичные для внутренней части кристалла двухфазовые включения являлись в то же время первичными для наружной части фантом-кристалла. На основании подобных наблюдений мы пришли к выводу, что «наметившееся после работы Г. Г. Леммлейна некоторое игнорирование вторичных жидких включений при выяснении генезиса минералов (в его современном, историческом понимании) вряд ли может быть чем либо оправдано» [18, стр. 65]. В дальнейшем такие включения были названы первично-вторичными [20] и автором была представлена первая в литературе генетическая классификация жидких и газовых включений с трехчленным подразделением их на типы (рис. 27). После этих работ [18, 19, 20] возражения вызвало не существо вопроса, а необычность словосочетания «первично-вторичные» для промежуточного генетического класса, отражавшее непривычное для ряда минералогов и кристаллографов диалектическое единство взаимопротивоположных природных явлений. Поэтому автор уже в 1950 г. в своей монографии заменил этот казавшийся «еретическим» термин на «мнимовторичные включения», который в зарубежной литературе стал фигурировать как «псевдовторичные включения». Таким образом, удалось обойти и это терминологическое (методологическое) препятствие, а существо дела осталось прежним.

Так или иначе во второй половине XX века большинство советских исследователей включений преодолело трудности в понимании многих методологических вопросов познания рассматриваемых микрообъектов природы, что открыло широкую дорогу в их научно-практическом использовании. Коллективный опыт позволил существенно усо-

вершенствовать нашу классификацию [22] и опубликовать ее на стенде Музея землеведения МГУ в 1956 г.

Как видно на схеме (рис. 28), семейства включений, располагающиеся в залеченных трещинках, пересекающих внутренние зоны, эпигенетичны по отношению к ним, но, безусловно, сингенетичны по отно-

| Типы включений | Виды включений и их расположение в кристаллах | Схемы образования и распределение включений в кристаллах |
|---|---|---|
| I. Первичные включения в монокристаллах | | |
| 1. Включения скелетного и дендритообразного роста | 1 В плоскостях граней |  |
| | 2 В следу движения ребра |  |
| | 3 В трассе движения вершины | |
| | 4 В ступенчатой поверхности чередования роста смежных граней |  |
| 2. Включения многогранного роста | 5 В зонах пирамид нарастания |  |
| | 6 В одевающем слое новой генерации |  |
| | 7 На границе неровной поверхности регенерации и растворения |  |
| II. Первично-вторичные включения | 8 В трещинах различных зон роста кристалла |  |
| | 9 На границе раздела двойниковых „ломтей" |  |
| | 10 В индукционных плоскостях друз |  |
| | 11 На пути отталкивания гранями чужеродных частиц |  |
| | 12 Около включенных минералов-спутников |  |
| III. Вторичные включения | 13 В трещинах механического происхождения |  |
| | 14 В трещинах напряжений и скольжений при полиморфных превращениях |  |
| | 15 В трещинах термического воздействия | |
| | 16 В трещинах денудационного происхождения |  |

Рис. 27. Способы образования и генетическая классификация жидких и газовых включений в кристаллах (по Н. П. Ермакову [20])

шению к образованию каждой следующей зоны, замыкающей микротрещину в «торец». Природные кристаллы, еще в процессе своего роста связанные с постепенными изменениями или резкими вибрациями термодинамических параметров, испытывали внутренние напряжения, нарушались микротрещинами по спайности или в результате междвойникового скольжения, или ориентированно по отношению к направлению сжатия (скола) или расширения (разрыва). Этому не в малой мере содействовали и внутриминерализационные тектонические подвижки. Так как при этом продолжали циркулировать минералообразующие растворы, происходила инъекция последних в микротрещинки и их залечивание родственным веществом в результате ориентированного дендритообразного (не дендритного) зарастания, заканчивавшегося герметизацией микропорций этих растворов.

Вследствие различий в вязкости кристаллизующих минералы геохимических сред (см. главу 4) наиболее легко в микротрещинки образующихся кристаллов проникали газообразные и жидкие гидротермальные растворы. Если эти растворы в конце процесса кристал-

лизации были недосыщены родственными компонентами, то они заимствовали необходимый для залечивания материал не только в своем минеральном окружении, но даже в пределах каждой микротрещинки, в которую проникали. Кроме степени подвижности (вязкости) растворов, большую роль в осуществлении полных и быстрых инъекций растворов играло повышенное гидростатическое давление в минералообразующей среде.

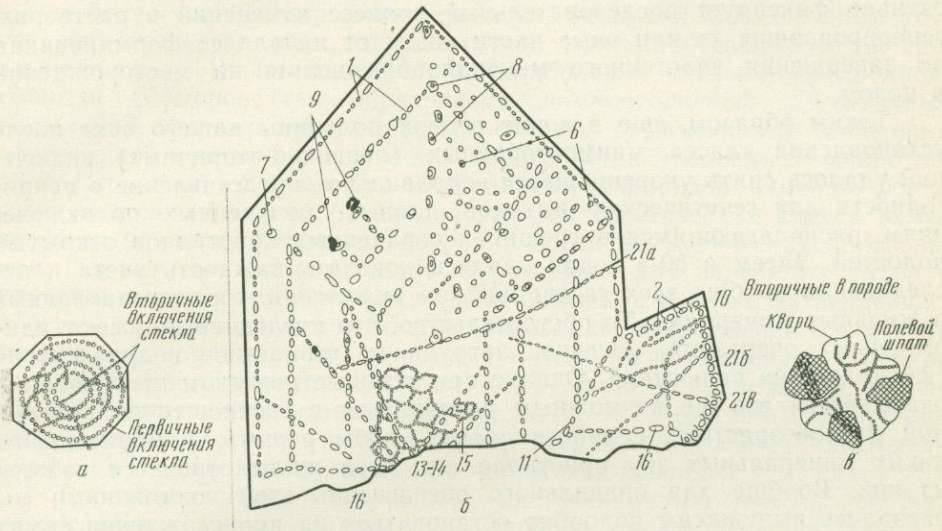



Рис. 28. Основные генетические подразделения и относительный возраст включений (по Н. П. Ермакову)

*а* — лейцит в порфире; *б* — кристаллы кварца; *в* — гранит. Сингенетические (в кристаллах) первичные: *1* — в плоскостях граней роста; *2* — в наружной зоне многоглавого роста; *6* — в пирамидах роста основного ромбоэдра; *7* — в следе продвижения ребра; *8* — в трассе передвижения вершины; *9* — в трассе отталкивания частиц; *10* — между двойниками и блоками. Субсингенетические мнимовторичные: *13, 14* — в трещинах внутренних зон; *15* — в сотовых трещинах α—β-трансформации; *16* — на границе регенерации. Эпигенетические вторичные в минеральных индивидах в постгенетических трещинах (*21*), пересекающих: *21а* — внутренние и наружную зоны; *21б* — границы регенерации; *21в* — индукционные грани

Таким образом, при изучении геохимических условий образования минеральных индивидов по консерватам кристаллизующих и регенерирующих растворов оказалось возможным на равных основаниях использовать не только первичные включения, приуроченные к элементам роста минералов, но и «первично-вторичные» включения, которые с 1950 г. мы называем *мнимовторичными* (псевдовторичными). Их значение в выяснении процессов пневматолито-гидротермального минералообразования оказалось при генетическом исследовании месторождений значительно более существенным, чем включений чисто первичных. Это связано не только с их существенно более широким распространением в минералах и рудах. Оказалось, что они позволяют с высокой степенью точности расшифровывать изменения в физико-химических параметрах при росте не только отдельных минералов и их последовательных генераций, но и при образовании разных зон в жилах и других рудных телах. Они позволяют устанавливать даже количество внутриминерализационных подвижек, имевших место при формировании месторождения.

Эти и многие другие возможности использования включений будут раскрыты в последующих главах нашей работы. Здесь лишь отметим, что в жильных не ограненных минералах каждой более ранней зоны обычно обнаруживаются не только первичные, но и вторичные включения растворов, относящиеся по времени образования к каждой последующей зоне формирования этих жил.

Можно видеть, что расшифровка генезиса включений может и должна осуществляться не только в объеме каждого минерального индивида, но и в масштабе зональной жилы или иного полиминерального тела месторождения многостадийного образования. В первом случае казалось бы эпигенетические вторичные включения, находящиеся в залеченных трещинах, на самом деле применительно ко всему включающему кристаллу оказываются сингенетичными, т. е. мнимовторичными. Во втором случае сложный калейдоскоп таких включений объективно фиксирует последовательный процесс изменений в растворах, генерировавших те или иные части жилы от начала ее формирования до завершения эндогенного минералообразования на месторождении в целом.

Таким образом, еще в конце первой половины нашего века после установления класса мнимовторичных (первично-вторичных) включений удалось снять укоренившееся неправильное представление о непригодности для генетических выводов данных, полученных по включениям, располагающимся в трещинах ограненных кристаллов открытых полостей. Затем в 50-х годах удалось показать важность учета и исследования вообще всех газово-жидких включений, герметизированных в жильных минералах. То обстоятельство, что последние не имеют идиоморфных очертаний, конечно, затрудняет возрастное подразделение газово-жидких включений. Однако при термометрическом исследовании оказывается все же возможным разобраться в соотношениях включений разновозрастных семейств с тем, чтобы решить, к образованию каких минеральных зон кристалла или всей жилы относится каждое из них. Вообще для правильного обеспечения этой возможности мы оказались вынуждены подробно остановиться на происхождении самих включений и представить их современную генетическую классификацию, которая позднее по мере дальнейшего накопления материалов несомненно еще будет уточнена.

Таким образом, при всегда необходимой объективной увязке физико-химических данных, полученных по включениям геохимических сред, с процессами минералообразования и продуктами этих процессов — минеральными генерациями и парагенезисами, а также с изменениями в геологической обстановке в период формирования эндогенных месторождений обязательно требуется *трехчленное подразделение* включений на *сингенетические — первичные, субсингенетические — мнимовторичные* («первично-вторичные») и *эпигенетические — вторичные* включения.

Большинство исследователей включений придерживаются этой трехчленной классификации, лишь те из них, для которых изучение включений является самоцелью и проводится ради изучения самих включений, а не для расшифровки гаммы сложных процессов эндогенного рудообразования, все еще сохраняют двухчленное генетическое подразделение и практически остаются на старых формальных позициях прошлого века.

### *Увязка состава и свойств минералообразующих сред со способами и временем их консервации во включениях*

Образование каждого включения геохимической минералообразующей среды — это процесс неизвестной нам, но, безусловно, различной длительности. Это образование завершается моментом герметизации большей или меньшей микропорции расплава, газа или жидкого водного раствора, различных в физико-химических свойствах, которые уже сами по себе обеспечивают разнообразие явлений (способов) образования включений. Именно здесь, в самих различиях между геохимическими средами, кроются главные различия и в способах консервации эндо-

генными минералами своих материнских подвижных субстанций. От специфики последних, степени их вязкости и насыщенности минералообразующими веществами (концентрация), от темпа изменения интенсивных термодинамических параметров (температура, давление) зависят и скорость кристаллизации включающих минералов, и быстрота образования самих включений, и их количество на единицу объема минерала.

Сочетание этих главных факторов в природе очень многообразно и еще более усиливается влиянием целого ряда связанных с ними других обстоятельств, таких, например, как текучесть геохимической среды (см. главу 4). Последняя имеет наибольшее значение среди «подсобных» факторов для образования *мнимовторичных и вторичных* включений, формирование которых связано с инъекциями минералообразующей среды в очень узкие пространства «волосных» микротрещин, нарушающих цельность минеральных индивидов. Именно вследствие высокой вязкости расплавов эти два генетических класса включений встречаются относительно редко среди магматических образований. Однако они исключительно характерны для *первичных* видов и разновидностей включений расплавов, входящих в класс затвердевших и остаточно магматических микрообразований, наблюдающихся внутри минералов, пород и руд соответствующего происхождения. Высокая степень вязкости расплавов обеспечивает захват минералами не только гомогенных эталонов материнской среды, но и гетерогенных микропорций, содержащих уже образовавшиеся твердые акцессории или обособившиеся в жидкости пузырьки газообразных флюидов (см. главу 16).

Такие включения, к сожалению, еще очень слабо изучены, так как петрографы, с прошлого века обеспечившие первые большие успехи в визуальном изучении включений, после классических работ Г. Сорби (1858 г.), Ф. Циркеля (1893 г.) и М. Розенбуша (1904 г.), до настоящего времени придают забвению дело изучения этих ультрамикрообъектов, часто не отличая обычные акцессории от герметизированных в пирогенных минералах микросистем магматических расплавов, для петрографии почти безразличных, а для петрологии чрезвычайно важных.

Густая, вязкая магматическая среда, плотно облекающая при высоком уровне термодинамических параметров растущие магматические кристаллы, наиболее охотно, а чаще принудительно захватывается ими по граням роста. Это особенно наглядно проявляется в аллохтонных фенокристах эффузивных пород, выраставших по пути следования магмы вверх по вулканической диатреме. Получаются классические зональные или зонально-кольцевые (с оплавлением) структуры кристаллов, быстрый рост которых вследствие прогрессировавшего спада температуры и давления обеспечивал массовый захват окружающего жидкого материала в виде типичных первичных включений по граням роста фенокристаллов (см. рис. 28, *а*).

После того как каждый пирогенный минерал-хозяин был «выплеснут» вместе с лавой на поверхность, эти включения расплавов, как отмечалось, превращались в аморфные или только частично раскристаллизованные включения вулканического стекла. Рост кристаллов осуществляется всегда только за счет «подтока» к граням родственного им материала. В магматических условиях вследствие высокой вязкости среды этот приток затруднен и поэтому неугасимое стремление кристаллизации вокруг зародыша каждого минерала (кристаллоорганизация вещества) преодолевается через захват относительно малоподвижной окружающей жидкой среды расплавов, часто вместе с уже обособившимися в ней твердыми микрокристаллами, газовыми пузырьками или остаточными жидкостями разного состава ($ОЖ_x$).

В этом случае нормальные пропорции растворенных в магме ком-

понентов могут нарушаться и для экспериментов по выявлению ее физико-химических параметров требуется тщательный отбор включений характерного («среднего») расплава. Часто начало их захвата дают «прижатые» к граням кристаллизующихся индивидов магматические акцессории, так как из-за их экранирующего воздействия нарастание граней минерала-хозяина над ними временно задерживается. Таким образом, возникают комбинированные с твердыми включениями микроконсерваты минералообразующих расплавов.

При герметизации микропорций самостоятельно действующих уже отделившихся от магмы газообразных сред (флюидов) их облекание веществом кристаллов в несравненно большей степени, чем в предыдущем случае, зависит от дефектов роста самого включающего минерала-хозяина. Большая активность геохимических газовых сред связана с их неукротимым стремлением занять любой освободившийся объем. Поэтому при растрескивании кристаллов в процессе роста минералообразующие газовые среды наиболее легко проникают в микротрещины, вызывая их залечивание с образованием мнимовторичных и вторичных включений даже в очень узких капиллярных полостях.

Такая проницаемость газов обеспечивает наиболее полное залечивание даже таких ультрамикротрещин, которые возникают при быстрой трансформации пирогенных кварцев, вследствие резкого спада интенсивных параметров. Как было выяснено Е. Е. Цинзерлинг и Ю. А. Долговым [13], такая трещиноватость характеризуется полигональным расположением и после залечивания флюидами обеспечивает возникновение «сотовых» кварцев и очень типичных мнимовторичных газовых включений. Последние по своим физико-химическим параметрам характеризуют начало образования перекрывающей сотовую трещиноватость зоны пневматолитового β-кварца, в которой изолируются и обособленные относительно редкие первичные включения минералообразующих газов вместе с их инертными компонентами.

В известной мере промежуточное положение между условиями формирования включений расплавов и газовых сред занимают жидкие водные и водно-углекислые включения гидротермальных растворов, обладающие промежуточными значениями вязкости (текучести). Поэтому мы с наибольшей подробностью рассмотрим генетику нормальных водно-жидких включений истинных растворов. Этому существенно содействует также и то обстоятельство, что именно такими растворами пользовались в подавляющем большинстве случаев для искусственного воспроизведения включений с целью выяснения общего и частного механизма их образования.

После опытов Г. Сорби (1858 г.) и А. В. Шубникова [76] по воспроизводству первичных включений в водорастворимых солях наглядные опыты образования включений в трещинах включающих их кристаллов выполнил Г. Г. Леммлейн [42, 43]. Он показал, что искусственные вторичные включения жидких растворов самоизолируются в микротрещинах в результате роста гребенчатого дендрита.

Дендрит при залечивании трещины испытывает ориентирующее влияние ее кристаллических стенок, выбрасывает из балок 1 порядка ветви-балки 2 и 3 порядков, которые, смыкаясь друг с другом, изолируют в микротрещинах капельки залечивавшего их раствора. Такое залечивание капиллярных трещин начинается у выклинивающегося глухого конца и постепенно распространяется к их устью на поверхности кристалла.

По нашим наблюдениям [22], в макротрещине кварца из Бристенштока (Альпы) на выходе трещин к поверхности и в их расширениях из-за облегченной диффузии родственного вещества омывающих кристалл растворов происходит смена дендритообразного их зарастания многоглавым ростом микрокристаллических субиндивидов.

Последние, вырастая навстречу друг другу, консервировали в промежутках между своими головками микропорции кварцрегенерирующих растворов в вакуолях ограненной ромбоэдрами формы. Эти включения являются мнимовторичными, потому что параллельно с формированием такой «микрожилы» в кристалле кварца происходило и нормальное его дорастание кристаллизацией слоя вещества на гранях призмы и пирамиды. Описанная макротрещина частично осталась незалеченной вследствие прекращения действия кварцобразующих растворов [22].

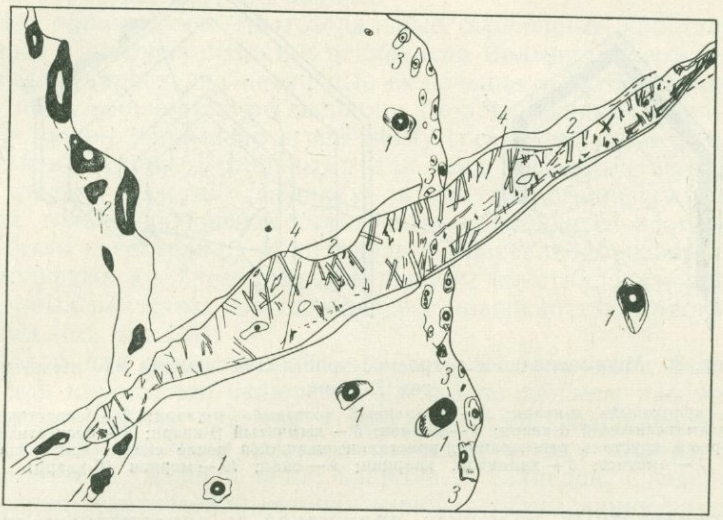


Рис. 29. Схема взаимоотношения разновозрастных залеченных трещинок-«жил» в морионе Волыни

*1* — жидкие высокотемпературные включения мориона; *2* — жидкие низкотемпературные включения аметиста; *3* — существенно газовые включения кварца регенерации; *4* — твердые включения гётита в аметисте

Однако в подавляющем большинстве случаев капиллярные микротрещины оказываются закристаллизованными целиком, как это можно видеть на рис. 29. Этот очень показательный случай залечивания разновозрастных трещин был установлен и задокументирован нами совместно с Н. И. Мязь при исследовании препаратов из многозональных кристаллов морионов Волыни. Зарисовка фрагмента, по-видимому, этого же образца, в очень схематическом виде была представлена ранее В. А. Калюжным [31, стр. 125]. Этот образец привлек наше внимание потому, что разная окраска бесцветно-белого и дымчатого кварца, а также сиреневого аметиста, включающего игольчатые кристаллы гётита, позволила четко разобраться в последовательности формирования ультрамикропрожилков этих разноидностей кварца на черном фоне кристалла.

Наличие в каждой из таких залеченных микротрещин своих характерных включений существенно облегчило задачу, имеющую принципиальное значение в исследовании семейств мнимовторичных и вторичных включений.

Морион, содержащий одиночные изолированные друг от друга жидкие высокотемпературные включения растворов 1 (см. рис. 29), в левой части препарата и по его диагонали оказался рассечен микротрещинами, которые были заполнены прозрачным кварцем *2*, несущим газовые включения и регенерирующим некоторые наружные сколы кристалла-хозяина. Микротрещина *3*, пересекающая морион и прожилки пневматолитового кварца, была залечена жидкими растворами. После этого по диагональному микропрожилку произошло новое повторное

нарушение сплошности и новое залечивание ее аметистовым кварцем *4* сиреневого цвета, который пересекает и микропрожилок *3*. На наружных гранях кристалла мориона наблюдалось его слабое дорастание аметистом на изолированных участках (в виде «нашлепок»).

Таким образом, в образовании и регенерации кристалла-хозяина здесь участвовали растворы разного агрегатного состояния, состава и температур, зафиксировавшие себя в виде пересекающихся друг с дру-

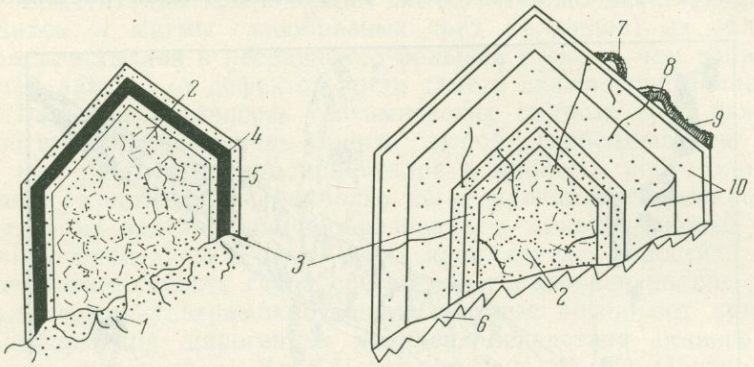



Рис. 30. Многозональное строение кристаллов кварца из пегматитов Волыни

*1* — «блоковый» α-кварц; *2* — ограненный «сотовый» α-кварц; *3* — бесцветный пневматолитовый α-кварц; *4* — морион; *5* — дымчатый β-кварц; *6* — бесцветный горный хрусталь регенерации, кристаллизовавшийся после скола кристалла; *7* — аметист; *8* — халцедон, кварцин; *9* — опал; *10* — морион (β-кварц)

гом разновозрастных волосных прожилков и характерных газовых и жидких включений, которые в низкотемпературном аметисте оказались однофазовыми жидкими или содержащими очень мелкие газовые пузырьки, исчезающие при температуре ниже 130° С.

Эти растворы, залечившие микротрещины в зоне мориона, принимали участие в образовании и преобразовании изученного кристалла в целом, а поэтому соответствующие им включения нельзя относить к вторичным образованиям. Они вторичны только по отношению к зоне мориона, но отражают единую цепь событий в прерывистом кристаллообразовании всего минерального полигенного индивида. Это субсингенетические мнимовторичные включения, среди которых для приведенного примера, если пользоваться терминологией В. А. Калюжного [31], можно различать ранневторичные и поздневторичные, а значит и средневторичные включения. При учете других внутренних зон кристалла (рис. 30) к этой тройной градации добавляется ровно столько дополнительных генераций субсингенетических включений, сколько зон и разновидностей кварца кристаллизовалось после стержневой части включающего индивида.

В такого рода многостепенном подразделении включений не было бы ничего плохого, если бы за ним не скрывалась тенденция сохранить в науке старое, только двухчленное генетическое разделение включений на первичные и вторичные. Все ранне-, средне- и поздневторичные включения во множестве своих генераций, находящихся в зависимости от многократного растрескивания растущих кристаллов и нарастания после этого более молодых зон, должны объединяться во избежание путаницы в единый класс субсингенетических мнимовторичных включений вне зависимости от многих моментов перекрытия внутренних микротрещин нарастающими новыми зонами кристаллов.

Применительно к разобранному примеру с кристаллом мориона из камерных гранитных пегматитов Волыни вторичными эпигенетическими включениями будут только жидкие однофазовые включения в микро-

трещинах кварцев, выходящих на поверхность кристаллов и отвечающих отложению в полости пегматита аморфного кремнезема. Кварцевые зерна вмещающих пегматиты гранитов, имеющие первичное пирогенное происхождение и не дораставшие под воздействием проникших в эти породы пневматолитовых или гидротермальных растворов из-за отсутствия свободного пространства, содержат в своих микротрещинках также типичные вторичные включения (см. рис. 28) в количествах, все увеличивающихся по мере приближения к источнику этих растворов — камерному пегматиту или к трещинной гидротермальной жиле, пересекающей эти породы.

Таким образом, все многозональные ограненные кристаллы, образовавшиеся в камерах-полостях пегматитов Волыни, содержат по зонам и пирамидам нарастания первичные включения, а по трещинкам в этих зонах и на поверхностях регенерации сколов — мнимовторичные включения растворов, разных по агрегатному состоянию, температурам, концентрации и составу. Вторичными для этих полостных кристаллов мориона, топаза, берилла, фенакита и других ограненных минералов являются только включения остаточных коллоидных растворов, которые не были в состоянии участвовать в кристаллообразовании и отложили аморфный кремнезем на поверхности кристаллов, а иногда даже в их крупных полостях, сообщавшихся с поверхностью кристаллических индивидов (см. рис. 28).

В целом для пегматитовой камеры-кристаллизатора даже эти вторичные для кристаллов включения растворов должны рассматриваться как мнимовторичные, так как в результате их завершающего минералообразующего действия во всех полостях внутри камеры отлагался гель кремнезема, давший опал, кварцин и халцедон. Следовательно, с точки зрения генетической истории минералообразования камерных пегматитов все включения расплавов, газовых и жидких растворов дают важную генетическую информацию от начала и до конца пегматитообразующего процесса. Нужно только уметь различать генетические классы, виды и разновидности включений геохимических сред в минералах и правильно увязывать данные по их фазовому и химическому составу с минеральными парагенезисами рудных тел и месторождений. Именно этой цели служат все главы V части книги и в особенности современная генетическая классификация обычных нормальных и не обычных аномальных включений гомогенных и гетерогенных минералообразующих геохимических сред, представленная нами в следующих главах.

## Глава 15

## СОВРЕМЕННАЯ ГЕНЕТИЧЕСКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ НОРМАЛЬНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ МИНЕРАЛООБРАЗУЮЩИХ СРЕД

### *Критическое рассмотрение существующих классификаций*

Уже в самой первой книге, посвященной включениям [20, рис. 29], нами было описано некоторое разнообразие способов их образования и была представлена генетическая классификация жидких и газовых включений в минералах. Эта классификация с небольшими изменениями вошла и в нашу вторую монографию [22] в виде таблицы [табл. 10], содержащей, как теперь выяснилось, ряд существенных неточностей. В частности, обозначенные в ней под 10, 11 и 12 генетические разновидности включений растворов были неправильно отнесены к мнимовторичным, а не к первичным образованиям. Эта ошибка имела ту причину, что обозначенные разновидности не подчинялись установившемуся с 1929 г. неверному правилу: зональность является общим свойством всех первичных включений. Как будет показано

Таблица 10

**Генетические типы и виды газово-жидких включений [22]**

| Типы и подтипы включений | Виды включений и их расположение в кристаллах |
|---|---|
| **А. Сингенетические включения** | |
| I. Первичные включения<br>1. Включения скелетного роста | На элементах первичного ограничения:<br>1) в плоскостях граней<br>2) в следу движения ребра<br>3) в трассе движения вершины<br>4) в зонах пирамид нарастания<br>5) в трубчатых кристаллах |
| 2. Включения многоглавого роста | 6) в плоскостях нарастающих граней между субиндивидами<br>7) в одевающем слое новой генерации (после перерыва в росте) |
| II. Мнимовторичные включения | 8) в трещинах различных зон роста кристалла<br>9) на границе неровной поверхности скола, растворения и регенерации<br>10) в индукционных плоскостях друз<br>11) на пути отталкивания гранями чужеродных частиц<br>12) около включенных минералов- «спутников» |
| **Б. Эпигенетические включения** | |
| III. Вторичные включения | 13) в трещинах механического происхождения<br>14) в трещинках напряжений и скольжений при полиморфных превращениях минералов<br>15) в трещинах денудационного происхождения |

ниже, имеется целая серия азональных, но, безусловно, первичных включений, что не было понято нами ранее.

Вторая попытка общей систематизации образования включений принадлежит Ф. Г. Смиту [63], который представил ее в следующем виде.

1. Заполнение дендритов.
2. Неполное смыкание ступеней роста:
   а) включения, расположенные параллельно граням кристалла;
   б) включения, перпендикулярные граням.
3. Прилипание пузырьков газовой фазы к растущей поверхности.
4. Прилипание кристалликов к растущей поверхности.
5. Рекристаллизация изъянов.
6. Рекристаллизация эпигенетических трещин.
7. Заполнение включения жидкостью или потеря последней.

Как видно, автор в этой систематике характеризует разные механизмы захвата включений, отвлекаясь от относительного времени их образования в теле каждого кристалла, и учитывает далеко не все возможности в этом вопросе. Заполнение дендритов в равной мере может относиться как к включениям, связанным с ростом кристаллов, так и к залечиванию трещинок в них (пункт 6 у Ф. Г. Смита). Прилипание пузырьков и их облекание относится не к нормальному образованию кристаллов из гомогенной среды, а к редким аномальным случаям гетерогенного состояния последней, прилипание же кристаллов (пункт 4) должно рассматриваться отдельно в связи с многообразными возможностями образования твердых включений.

Как следует из пояснительного текста Ф. Г. Смита [63, стр. 99], рекристаллизация изъянов (пункт 5) относится не к образованию газово-жидких включений, а только к преобразованию внутренней поверхности их вакуолей. В пункте 6 Ф. Г. Смит учитывает рекристаллизацию только эпигенетических трещин с образованием вторичных включений и не представляет возможностей образования таким же способом субсингенетических мнимовторичных включений. И, наконец, введение в систематику пункта 7 не оправдывается никакими фактическими данными применительно к нормальным включениям или может относиться лишь к аномальным случаям перенаполнения дегерметизированных включений. Таким образом, приведенная систематика очень разнообразна по своим подходам, так как в один и тот же классификационный ряд поставлены разные градации включений. Однако автор приводит интересные сведения о механизме образования некоторых разновидностей включений.

Третья попытка общей генетической классификации включений принадлежит Г. Г. Леммлейну [45], также уделившему много внимания выяснению механизма образования и преобразования вторичных включений. Эта классификация (табл. 11), как и приведенные выше, не лишена существенных недостатков. Как справедливо отмечается Д. Н. Хитаровым, ее излишняя сложность, а иногда и отсутствие четких градаций связана со стремлением автора сохранить двухчленное генетическое подразделение включений только на первичные и вторичные. Введение в эту классификацию ксеногенных (чужеродных), протогетерогенных и даже мелких аномальных включений, связанных со взрывами более крупных, еще более осложнило ее понимание и возможности практического использования. Непризнание автором генетического класса мнимовторичных включений привело к тому, что включения рубцового зарастания входа в залеченную трещину считаются первичными сингенетическими, а включения растворов в тех же залеченных трещинах, перекрытых последующим слоем новой генерации вещества (без изменения характера среды, из которой продолжалась кристаллизация), отнесены ко вторичным, постгенетическим образованиям.

Включения, связанные с регенерацией механических повреждений кристаллов, например поверхности излома (скола), правильно относятся им к первичным, а образовавшиеся в результате залечивания их трещинных повреждений (не вызвавших разделения кристалла на обломки) относятся уже ко вторичным включениям. Даже два последних примера показывают, как трудно было обходиться Г. Г. Леммлейну без обособления промежуточного класса мнимовторичных включений.

В этом классе, как было показано в предыдущей главе, находятся все субсингенетические образования включений и в залеченных внутренних трещинах, перекрытых новыми слоями роста, и на былых поверхностях сколов и растворения с последующей регенерацией. Следует отметить, что в классификации Г. Г. Леммлейна действительно постгенетическими вторичными включениями, с наших позиций, являются только включения в трещинах, не перекрытых новыми слоями, образовавшиеся без последующего нарастания кристалла.

В. А. Калюжный [32], также поддерживающий двухчленное разделение включений, до сих пор встречается с неменьшими трудностями при рассмотрении их генезиса и использовании терминологии предмета. Он пишет, что «подобное подразделение по способу образования включений, как произведено у Г. Г. Леммлейна, потребует специальных, возможно не всегда доступных исследований пространственного и генетического соотношения кристалл — включение» [31, стр. 161] и пытается дать конкретные определения важнейших понятий. В част-

Таблица 11

**Классификация жидких включений в минералах по Г. Г. Леммлейну [45]**

| Образование включения в результате следующих явлений роста кристалла | Характер содержимого включения |
|---|---|
| **Первичные включения** | |
| Появления застойных участков насыщенного маточного раствора между концентрационными потоками над: | Аутигенный, сингенетичный |
| гранями кристалла, ребрами кристалла, вершинами кристалла | |
| Изменения характера роста кристалла при: | |
| смене скелетного роста на нормальный, зарастании граней с переменой габитуса, многоглавом росте в начале отложения слоев новой генерации | |
| Разветвленного и друзового роста кристаллов на границе между: | Аутигенный? сингенетичный? (слабая сохранность содержимого) |
| ломтями свилеватого (блочного, мозаичного) кристалла, соседними кристаллами в друзе, зернами агрегата: | |
| мономинерального | |
| полиминерального | |
| растворением (и последующей генерацией); | |
| своим расплавом или раствором, раствором нового поступления | |
| Регенерации повреждений кристалла, вызванных: | Аутигенный, сингенетичный? |
| механическим путем при: | |
| многоглавом росте на поверхности излома, рубцовом зарастании входа в залеченную трещину | |
| Захвата растущим кристаллом прилипших частиц: | Протогетерогенный, сингенетичный |
| при одновременном захвате маточного раствора с обрастаемыми: | |
| пузырьками газа, каплями жидкости, не смешивающейся с маточным раствором, твердыми частицами | |

Продолжение табл. 11

| Образование включения в результате следующих явлений роста кристалла | Характер содержимого включения |
|---|---|
| путем плотного обрастания: пузырьков газа, капель жидкости, не смешивающейся с маточным раствором, твердых частиц | Ксеногенный, сингенетичный |
| Вторичные включения | |
| Сингенетичных с входом в трещину, перекрытым слоем вещества кристалла той же генерации | Аутигенный, сингенетичный, при неизометрическом залечивании частично протогетерогенный |
| Постгенетичных с входом в трещину, перекрытым слоем новой генерации: без изменения характера среды, из которой продолжается кристаллизация, с изменением характера среды, из которой продолжается кристаллизация | Аутигенный, постгенетичный, при неизометрическом залечивании частично протогетерогенный |
| Постгенетичных с входом в трещину, не перекрытым новыми слоями, без последующего нарастания кристалла; залечивание за счет капиллярной конденсации растворителя в трещине | Нередко протогетерогенный, постгенетичный |
| Внутренних трещин вокруг взорвавшихся включений | Зависит от характера содержимого включений |

ности он пишет, что «поздневторичные включения образуются при залечивании трещин вследствие переотложения материала без привноса его из вне расположенной среды» [31, стр. 162].

Если под поздневторичными включениями им подразумеваются действительно вторичные, например газово-жидкие включения в микротрещинах кварцев гранитов, то как же действительно определить, несли или не несли кремнезем воздействующие на породу газовые или водно-жидкие растворы? При залечивании микротрещинок в зернах кварца чистой водой, использовавшей свою способность к растворению и переотложению кварца в пределах каждого зерна, газово-жидкие включения будут, по мнению этого автора, поздневторичными, т. е. вторичными. А если гидротермы выносили кремнезем из ниже расположенного магматического очага или заимствовали его из пород по фронту своего продвижения, то они, залечив микротрещинки в кварце, оставят, по-видимому, уже ранневторичные включения. Какие еще не всегда доступные специальные исследования требуются для того, чтобы геологи, занимавшиеся включениями, нашли наконец общий язык для взаимопонимания и занялись вплотную научно-практическим использованием этих включений для познания глубинного минералообразования и разработки новых методов поисков рудных месторождений. Именно ради этого мы снова, как и в 1949—1950 гг., должны подробнее чем хотелось бы задержаться на генезисе самих включений и на терминологии, отражающей существо предмета.

Следует отметить, что для начинающих исследователей включений до сих пор оказывалось достаточным понимание классификационных данных, представленных еще в 1950 г. Однако все расширяющееся использование включений в практике поисково-разведочных работ и при изучении генетически разнообразных месторождений, в частности, связанных с магматическим, метаморфическим, метасоматическим и коллоидным минералообразованием, потребовало дальнейшего углубления в понимании механизма образования самих включений разного состава и состояния. При этом оказалось совсем недостаточным проведение опытов по воспроизведению включений в легкорастворимых солях и наблюдений за преобразованием их вакуолей. Результаты этих полезных опытов невозможно просто перенести на природные обычно труднорастворимые минералы. Это наиболее детально было показано на включениях в кварце А. В. Лоскутовым [48] и Ю. А. Долговым [13, 14], по турмалинам — М. М. Сливко [61, 62], по кальцитам — Н. И. Андрусенко и Е. Я. Киевленко [1], по флюоритам — автором [19], по берилам — В. Г. Фекличевым [65, 66] и другими авторами, внесшими значительный вклад в понимание механизма образования вакуолей включений. Кроме того, важными в этом отношении были работы Г. М. Сафронова и В. Е. Хаджи [59, 60], А. А. Шапошникова и автора с воспроизведением включений в искусственных кварцах. Из теоретических работ общего плана, связанных с реальным кристаллообразованием в искусственных и природных условиях, наиболее важными для нас являются исследования Н. Н. Шефталя [73].

Кроме того, представленное ниже в классификации дробное генетическое подразделение нормальных включений оказалось возможным осуществить благодаря ранним трудам таких советских ученых, как А. В. Шубников, В. А. Мокиевский, Д. П. Григорьев, И. И. Шафрановский, О. М. Аншелес, Г. Г. Грушкин, П. С. Вадило, А. И. Захарченко и др. Далеко не все эти исследователи интересовались включениями в минералах, но все они внесли свою долю в понимание механизма роста и выяснение внутренней морфологии кристаллов.

### *Генетическое разнообразие видов и разновидностей нормальных включений*

#### Первичные включения (зональные и азональные)

Без возможностей разделения включений растворов и расплавов в минеральных образованиях на классы и виды по времени и способу их образования все данные, которые могут быть получены по ним через статическое и экспериментально-аналитическое изучение, остаются не привязанными к процессам генезиса включающих минералов и их агрегатов.

В классе первичных сингенетических включений их семейства, наблюдающиеся внутри кристаллов, обязательно принадлежат к плоскостным или объемным элементам внутренней морфологии включающих минералов. В связи с этими различиями нами выделяются два вида первичных включений: зональные и азональные (табл. 12).

*Зональные включения* располагаются всегда по плоскостям былых граней роста кристаллов, хотя механизм захвата и герметизации микропорций растворов и расплавов на этих гранях далеко не одинаков. По крайней мере можно различать пять разных возможностей плоскостной консервации образцов минералообразующих сред: 1) нормального ступенчатого или слоистого роста, 2) многоглавого, 3) спирального, 4) вицинального и 5) «зубчатого» нарастания граней кристаллов. Эти пять способов роста могут находиться в той или иной комбинации друг с другом.

Таблица 12

**Современная генетическая классификация нормальных включений минералообразующих сред (составил Н. П. Ермаков)**

| Классы | Виды | Разновидности |
|---|---|---|
| По относительному времени образования | По генезису и расположению включений в теле минералов и их агрегатов | Диагностика по местоположению в минеральных образованиях |
| I. Первичные, сингенетические | 1. Зональные<br>Нормального, с участками «голодания» раствора, многоглавого, спирального, вицинально-дендритного и «зубчатого» роста граней кристаллов | 1) В плоскостях граней ступенчатого роста кристаллов и присыпок<br>2) В новых зонах между головками субиндивидов<br>3) Под выпуклыми спиралями роста (выростами) и при их смыкании<br>4) Во впадинах желобчатых вициналей<br>5) В промежутках между «зубьями» роста |
| | 2. Азональные<br>Нормального, скелетного, беспорядочно-спонтанного и многоглавого (друзового) роста кристаллов и их агрегатов и при метасоматозе | 6) В сегментах пирамид нарастания<br>7) В следах продвижения ребер и на пересечениях граней<br>8) В трассе перемещения вершины<br>9) В местах захвата и отталкивания гранями жидких и твердых частиц<br>10) Между двойниками и блоками мозаичных кристаллов<br>11) В контактах индукционных граней друз и радиально-лучистых агрегатов<br>12) В микропорах полных псевдоморфоз |
| | 3. Сингенетических трещин (в дораставших кристаллах) | 13) В микротрещинах внутренних зон, перекрытых зонами дорастания |
| | Дендритообразное и многоглавое зарастание трещин, возникающих в процессе роста кристаллов, сингенетичное одной из последующих зон | 14) В трещинах «бороды» кристаллов, развивающихся от субстрата<br>15) Инверсионные включения в полигональных сотовых трещинах α—β-трансформации |
| II. Мнимовторичные (первично-вторичные), субсингенетические | 4. Регенерационные<br>Восстановление механических повреждений кристаллов и корродированных выщелачиванием граней | 16) На границе поверхностей механического скола и дорастания<br>17) В регенерированных зонах растворения и оплавления<br>18) В местах выщелачивания твердых включений и поврежденных участков |
| | 5. Секреционные<br>Бахромчатое и скорлупчатое «окантование» полостей с синеретической жидкостью | 19) В изометрических микрополостях пор «островного» расположения<br>20) В микротрещинах контракции при синерезисе гелей |

Продолжение табл. 12

| Классы | Виды | Разновидности |
|---|---|---|
| | 6. Постгенетических трещин (без дорастания и метасоматоза кристаллов). Дендритное залечивание трещин катаклаза и самотрансформации кристаллов без привноса и с привносом родственного вещества | 21) В микротрещинах пересекающих:<br>а) внутренние и наружную зоны<br>б) границы регенерации кристаллов<br>в) индукционные грани их агрегатов<br>22) Во внутризерновых микротрещинах, между зернами и при сокращении объемов минералов при α—β-превращениях |
| III. Вторичные, эпигенетические | 7. Трещинно-метасоматические с выщелачиванием. Околотрещинные, неполный метасоматоз и выщелачивание с образованием новых минералов в минералах руд и пород с самоизоляцией микрокапель растворов | 23) То же, в метасоматических окаймлениях трещин минералов и пород<br>24) В микропорах выщелачивания и замещения минералов<br>25) В микротрещинах делятации минералов и пород |

Известно, что рост каждого кристалла из расплава, газового или жидкого раствора является результатом очень тонкого взаимодействия атомов этих подвижных минералообразующих геохимических сред и поверхности зародившегося в них кристаллического индивида.

Процесс роста определяется и регулируется изменениями интенсивных термодинамических параметров среды кристаллизации: температуры, давления и концентрации. Немаловажную роль играют изменения в составе, химических реакциях и агрегатных состояниях кристаллизующих сред. Имеют значение также и граничные эффекты в тонком слое питающей минералообразующей среды, из которой растущий кристалл благодаря своему электромагнитному полю «вырывает» необходимые ему ионы, атомы или радикалы достраивающих его родственных веществ.

Вопросам реального кристаллообразования из жидких сред посвящено очень большое количество работ и применительно к образованию первичных включений мы используем, не претендуя на исчерпывающую характеристику предмета, в основном только работы советских ученых. Однако росту кристаллов из газовых сред уделялось мало внимания, и этот пробел был восполнен Н. Н. Шефталем [73].

Беспорядочно двигающиеся атомы газов, как отмечалось нами ранее, перед вхождением в кристаллическую решетку могли объединиться с образованием диплетов, триплетов (см. рис. 10, *а*, *б*) и даже ультрамикрокристалликов. В насыщенном паре возникают также сложные комплексы, содержащие свыше 1000 молекул. Поэтому нормальная кристаллизация из газовой фазы, находящейся в равновесии с растущими кристаллами, происходит не только за счет одиночных атомов, но иногда в результате их агрегирования, опережающего кристаллизацию. Притягивание кристаллом агрегатов атомов создает условия захвата между их блоками микропорций атомарных газов с образованием существенно газовых включений в местах незаполненных вакансий кристаллической решетки.

Дальнейшее освещение механизма образования нормальных пер-

вичных включений касается в основном кристаллизации минералов из жидких геохимических сред.

О. М. Аншелес [2] впервые показал, что у нормально растущих кристаллов образование каждого нового дискретного слоя вещества начинается с ребер и вершин, а затем тангенциально распространяется на всю грань. Случается так, что в результате застоя раствора у нарастающего таким образом участка грани или накопления на ее поверхности не поглощающихся примесей (присыпок) происходит задержка в кристаллизации вещества. Дальнейшее нарастание кристалла осуществляется полосками вдоль ребер, образующими коробчатые углубления на гранях. Такой и более сложный обедненный рост приводит к образованию относительно крупных первичных включений и даже пустотелых кристаллов, заполненных материнским раствором. Иногда встречаются «открытые» полости, которые вследствие прекращения роста кристалла оказались не полностью замкнутыми. Они сохранили связь с поверхностью наружных граней, но естественно не могли удержать своего заполнения.

Этого не случается, если условия скелетного роста достаточно быстро сменяются нормальным слоистым ростом, сопровождающимся выдвижением от реберных «полосок» к центру граней ступенек вещества, перекрывающих возникшие углубления на гранях вследствие неполного смыкания более ранних ступенек. Такое перекрытие вызывает захват и изоляцию порций минералообразующих растворов с образованием наиболее распространенной первой разновидности зональных первичных включений (фототабл. XIV, *а*). Последние часто располагаются на былых гранях роста совместно с присыпками, наличие которых создает неоднородности и содействует образованию комбинированных или обычных газово-жидких включений. Таким образом, возникают семейства нормальных зональных включений, параллельные граням роста (см. фототабл. XIV, *б*).

Включения многоглавого роста возникают при возобновлении кристаллизации после перерывов в росте, иногда сопровождающихся сменой габитусов. Кроме того, в результате временных сильных пересыщений растворов на гранях кристалла возникает множество центров кристаллизации, обусловливающих начало многоглавого роста. В углублениях между растущими миниатюрными головками субиндивидов «застревают» частицы маточного раствора и образуются ограненные или полуограненные первичные включения второй разновидности. Часто подобные зоны с включениями образуют «рубашку» кристалла, облекающую его со всех сторон. В других более редких случаях такого роста многочисленные включения располагаются только в головке кристаллов с образованием белой «форфоровидной насадки» («коневьи зубы» топазов Шерловой горы).

При позднейшем уменьшении степени пересыщения многоглавый рост субиндивидов сменялся нормальным слоистым ростом последующей зоны, под которой надежно консервировались микрокапли маточного раствора, вошедшие таким образом в состав предыдущей зоны кристалла.

Несовершенства роста кристаллов в виде винтовых дислокаций в недавнее время привели к выяснению закономерностей спирального роста, возможного даже при очень малом пересыщении растворов (1 вес. %). Места возникновения таких несовершенств роста определяли иногда зарождение вакуолей спиралеобразной формы, установленных впервые Н. И. Андрусенко и Е. Я. Киевленко [1].

Спиральные выросты на былых гранях кристаллов консервировали под собой в таких «негативных» вакуолях булавовидные и дисковидные включения жидких водных растворов третьей разновидности, располагающихся в зонах и участках спирального роста кристаллов

(см. фототабл. (XIV, *в*, *г*). Разрастание «спиралей» приводило к их смыканию и перекрытию друг другом, что также вызывало образование первичных микровключений разнообразной формы.

В ряде случаев для кристаллов существенно удлиненного (турмалин, берилл, реже кварц) габитуса наблюдаются сильно вытянутые, параллельно оси «*С*» трубчатые и клиновидные включения, происхождение которых в турмалинах М. М. Сливко [62] объясняет захватом растворов при зарастании в поясе призм вицинальных желобочных углублений в кристаллах. Такое объяснение представляется нам вполне реальным. Для искусственного кварца оно было проиллюстрировано В. Е. Хаджи и Г. М. Сафроновым [68] при зарастании ребристой поверхности, возникавшей на затравке «косого среза» в зоне грани отрицательного ромбоэдра (см. фототабл. XIV, *д*). Авторы отмечают общую закономерную ориентировку рядов вакуолей с отклонениями длинных осей последних до 10—20° в плоскости каждого ряда. Перекрытие вицинальных желобков с образованием включений растворов трубчатой формы, вероятно, связано с относительно «застойным» состоянием растворов на их «дне», перекрытием их в процессе слоистого роста и выравнивания ребристой поверхности кристаллов, обеспечивающего консервацию включений четвертой разновидности.

Н. Н. Шефталь [73] на примере выращивания кристаллов сахарозы впервые показал, что на фронте разрастающихся кристаллических слоев в месте наименьшего пересыщения или от твердой частицы, попавшей на крупную грань, образуются входящие углы, делающие грань «зубчатой». По линии продвижения входящего угла каждого такого дискретного микрослоя в нем образуются цепочки включений маточных растворов, перекрывающиеся наросшим сверху следующим кристаллическим слоем вещества. Очень наглядно такой тангенциальный гребенчатый рост проявляется на плоскостях кристаллов фтор-флогопита с образованием зональных раскристаллизованных включений, «застревающих» в капиллярных «щелях» (каналах) того или иного дискретного слоя нарастания, перекрытого новыми слоями слюды (см. фототабл. XIV, *е*). Такой процесс образования первичных включений расплавов был детально прослежен и задокументирован И. Н. Аникиным.

Эти пять разновидностей зональных первичных включений, вероятно, не исчерпывают еще всех возможностей их образования, но и приведенные примеры показывают разнообразие способов их возникновения.

На природных объектах далеко не всегда удается в точности определить способы образования разновидностей включений растворов и расплавов, но установить их генетический вид по расположению в теле кристаллического минерала при наличии в нем первичных элементов внутренней морфологии обычно не представляет затруднений.

*Азональные включения.* Семейства азональных включений не ориентированы в тех или иных определенных зонах кристаллизации. Они одиночны или имеют друг по отношению к другу объемное распределение, или же располагаются радиально по линиям и плоскостям, пересекающим эти зоны, но не связанным с трещиноватостью кристаллов. Этот признак является важнейшим для их выделения среди первичных зональных включений или включений мнимовторичных (фототабл. XV, *а*).

Еще А. В. Шубников на опыте с выращиванием алюмокалиевых квасцов установил, что одни грани кристаллов (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 могут отсутствовать.

Такое секториальное по сегментам пирамид нарастания распределение включений в искусственных и природных кристаллах извест-

но минералогам и кристаллографам с середины прошлого века и представлено на рис. 29. Включения в наибольших количествах образуются под гранями, испытывавшими быстрое радиальное продвижение. Вообще, чем быстрее растет не только отдельная грань, но и весь кристалл в целом, тем больше в нем консервируется включений кристаллизующей среды. Эта, шестая разновидность включений может быть связана не только с беспорядочно-спонтанной кристаллизацией и многоглавым ростом, но и с чередованием слоистого, скелетного или многоглавого роста.

В некоторых кристаллах кварца, а чаще топаза и особенно берилла и турмалина наблюдаются трубчатые включения, которые в связи с разработкой визуального метода определения температур и выявления типов и видов гомогенизации включений ранее привлекали у нас большое внимание [20, 22]. Судя по исследованиям П. С. Вадило [9], включения подобной формы возникают на ребрах кристаллов вначале в виде желобчатых углублений. В связи с быстрым разрастанием в стороны граней эти углубления перекрываются, консервируя включения маточных растворов трубчатой формы. По-видимому, при встрече над ребром омывающих кристалл концентрационных потоков получается область застоя, в которой возникает притупляющая это ребро грань, а выдвижение над ней соседних габитусных граней вызывает образование удлиненного параллельного ребру включения. При периодических повторениях этого в плоскости продвижения ребра кристалла может образоваться серия параллельных данному ребру трубчатых или вытянутых включений раствора седьмой разновидности (см. табл. 12).

Почти аналогично возникают при росте кристалла включения восьмой разновидности, располагающейся линейно по трассе перемещения вершины (см. рис. 28).

В реальных кристаллах, как отмечалось ранее, мы часто встречаемся с твердыми включениями посторонних веществ, которые вопреки проявлению кристаллизационного давления оказались замкнутыми в теле минералов. Такого рода вынужденный захват инородных частиц часто сопровождается или обусловливает возникновение нормальных газово-жидких включений по трассе отталкивания кристаллом твердых включений. Впервые это с большой убедительностью было показано А. В. Шубниковым [76, 77]. Такое зарождение вакуолей, чаще заполненных кристаллизующими растворами или не заполненных ими (полые включения), происходит как под этими экранирующими частицами, так и над ними. В первом случае в процессе нарастания слоя грани под влиянием кристаллизационной силы происходит «поднятие» осевшей на нее твердой частицы; тогда в следу движения этой частицы остается полость, часто заполненная раствором и имеющая форму, вытянутую по направлению движения, а чаще несколько полостей, если отталкивание происходило неоднократно. Г. М. Сафроновым на искусственном кварце экспериментально показано образование газово-жидких включений и над частицами посторонних веществ (см. фототабл. XV, *в*).

В конце концов твердая частица обычно захватывается растущим кристаллом, но может быть значительно удалена от первоначального места ее выпадения и появившегося жидкого включения или линейно вытянута перпендикулярно граням нарастания цепочки таких включений (см. фототабл. XV, *в*).

Такой процесс образования жидких и аномальных полых включений в следу движения твердых частиц и над ними недавно был проиллюстрирован М. М. Сливко (62) на примере турмалинов Сибири (рис. 31). Этот тонкий исследователь включений справедливо полагает, что по длине «нижних» полостей можно измерять расстояние, на которое кристаллизационной силой была перемещена твердая частица при росте минерала.

В кристаллах мозаичного (блокового) строения (для кварца — в «свилеватых» кристаллах), образовавшихся через длительный рост субиндивидов несколько различной ориентации в пространстве и друг по отношению к другу, так же как и на границах двойников, иногда наблюдаются субмикроскопические включения растворов, выделенные в 10 разновидности. В генетическом отношении они должны быть очень

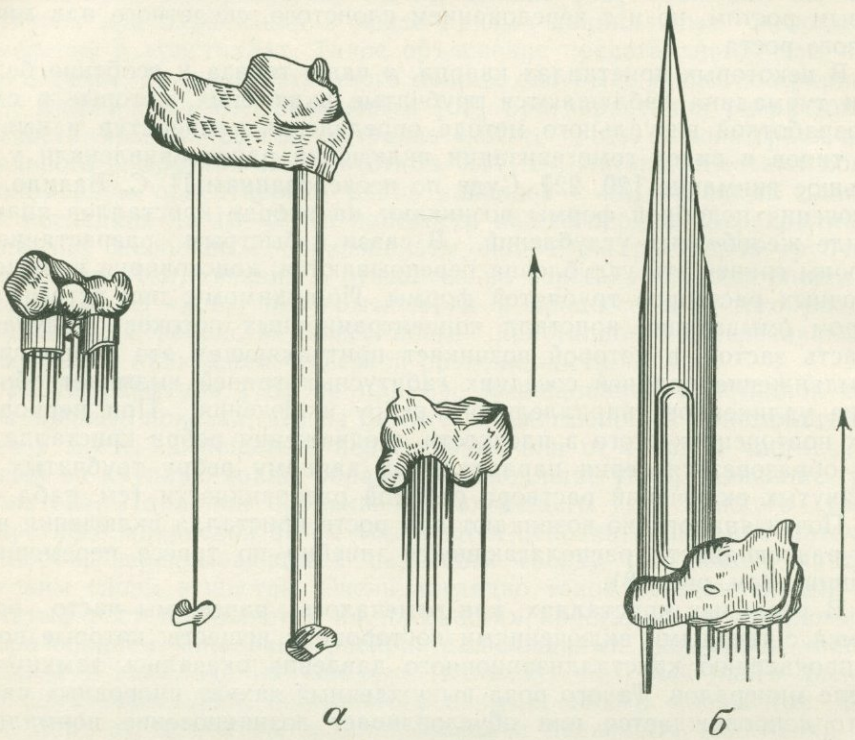



Рис. 31. Полости в турмалине, образующиеся при отталкивании твердых включений (по М. М. Сливко)

*а* — под твердыми частицами. Ув. 75; *б* — то же, и над твердым включением, временно экранировавшим нарастание на грани вещества минерала-хозяина. Ув. 200

сходны с включениями, располагающимися в индукционных гранях друз и радиально-лучистых агрегатов. Эта 11 разновидность первичных включений, возникающая на границе соприкосновения сорастущих в друзах кристаллов, впервые была выявлена Д. П. Григорьевым, представившим характерную схему их расположения (рис. 32, *а*). Эта схема особенно хорошо читается в сопоставлении с вторичными включениями, располагающимися в трещинах, пересекающих индукционные грани (см. рис. 32, *б*). Микропорции растворов захватывались в неровных капиллярных щелевидных полостях на границе двух соприкасавшихся при росте кристаллов, однако такое их положение не дает уверенности в полной герметизации содержимого вакуолей в отличие от микровключений в кристаллах блокового строения. Обычно все эти срастания кристаллических субиндивидов кварца не обнаруживают параллельного положения осей «*С*», но при наличии такового индукционные включения растворов по существу отвечают самим наружным зонам сдвойникованных кристаллов и должны быть в этом случае отнесены к первому генетическому виду зональных включений.

Мелкие частицы иногда даже захватываются внутрь самим жидким включением или запечатываются на границе вакуоли с образованием комбинированного включения.

Любопытный пример такого включения, возникающего в связи с наличием в кристаллах кварца Памира твердых включений галита, представлен нами ранее (см. фототабл. XV, *б*). Наружная грань кристалла кварца располагается вверх от кубика галита. Когда в процессе роста былая грань кварца достигла уровня верхней грани галита, кристаллизация кремнезема на галите не происходила в связи с различиями решеток этих двух минералов. Продвигавшаяся радиально

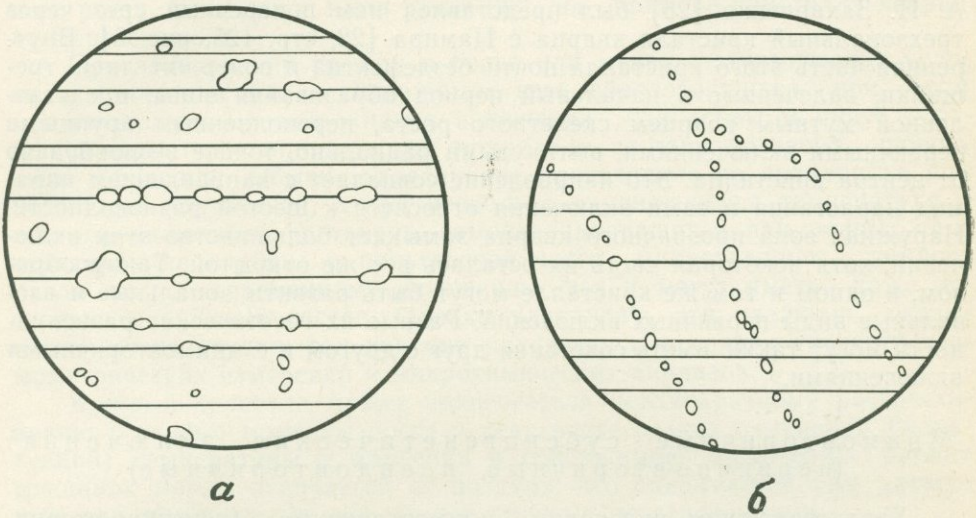



Рис. 32. Вакуоли жидких включений в кварце (по Д. П. Григорьеву)
*а* — первичные включения, расположенные по индукционным ребрам и граням. Ув. 35; *б* — вторичные включения в залеченных трещинках, пересекающих индукционные грани. Ув. 15

грань кварца в конце концов сомкнулась довольно далеко от верхней грани галита, образовав полость неправильной формы, заполненную маточным раствором. После охлаждения возникшего таким образом комбинированного включения в нем обычным образом возник газовый пузырек. Родственное галиту вещество из капли раствора, по-видимому, кристаллизовалось на оставшейся обнаженной грани галита, а хлористый калий, также обычный в составе кристаллизующих кварц-гидротермальных растворов, обособился в виде отдельного кристалла, наблюдающегося на микрофотографии левее газового пузырька. Нагревание этого весьма поучительного включения вызывает быстрое растворение сильвина, но кристалл галита, образовавшийся ранее включения, был не в состоянии раствориться в той малой порции раствора, которая с его помощью осталась в виде жидкого включения.

Таким образом, механизм образования включений растворов над твердыми частицами объяснялся нами [22] тем, что грань кристалла, уже не способная далее отталкивать твердое тело, начинает расти с перерывом и не облекает его в верхней части. Над ней образуется углубление, в дальнейшем все же перекрываемое нарастающими слоями грани, под которыми минералообразующие растворы консервируются в возникающей таким образом полости.

Несколько особое положение занимают газово-жидкие включения, объемно распределенные в микропорах полных псевдоморфоз. Конечно, эти включения вторичны по отношению к замещавшемуся исходному минералу, но они являются и первичными, характеризующими метасоматирующие растворы метакристаллов. Такие включения наблюдались нами в метакристаллах казахстанских пегматитов Каибского плутона при полном замещении ихтиоглиптов кварца флюоритом и в ин-

трузиве Акджайляу при замещении кристаллов полевого шпата гидротермальным кварцем. Такие явно метасоматические образования содержат очень мелкие включения растворов без проявлений какой-либо зональности или каких-либо закономерностей в объемном распределении в теле псевдоморфозы (параморфозы).

Разнообразное чередование способов роста приводит к образованию серий разновременных первичных включений, располагающихся в разных плоскостях граней кристалла и пирамид нарастания. Так, А. И. Захарченко [25] был представлен нам поперечный срез через трехзональный кристалл кварца с Памира [22, стр. 125, рис. 5]. Внутренняя часть этого кристалла почти бездефектна и содержит лишь трещинки, залеченные в начальный период образования зоны, представленной мутным кварцем скелетного роста, переполненным крупными первичными включениями, вытянутыми радиально, точнее веерообразно от центра кристалла. Это направление совпадает с направлением пирамид нарастания и сами включения относятся к шестой разновидности. Наружная зона прозрачного кварца замыкает большинство этих включений, хотя некоторая часть их осталась все же открытой. Таким образом, в одном и том же кристалле могут быть развиты зональные и азональные виды первичных включений. Разные их генетические разновидности могут также иметь сочетания друг с другом и с мнимовторичными включениями.

### Мнимовторичные субсингенетические включения (первично-вторичные, псевдовторичные)

Характернейшим признаком мнимовторичных (первично-вторичных) субсингенетических включений является приуроченность их к трещиноватым кристаллам, претерпевшим разрывные деформации в процессе роста или регенерации (дорастания) поврежденных участков, или же для коллоидных минералов в процессе образования и трансформации полостей при синерезисе гелей.

В соответствии с этими различиями мы выделяем три вида включений: 1) включения сингенетических трещин залечивания в дораставших кристаллах; 2) регенерационные включения, возникшие при восстановлении изъянов кристаллов — механических сколов, поверхностей растворения и плавления; 3) секреционные включения, связанные с самопреобразованиями коллоидного вещества.

Из этих трех видов включений самыми распространенными в природе реальных кристаллов являются включения геохимических минералообразующих сред, связанные с залечиванием трещин, возникавших в процессе продолжавшегося кристаллизующего действия этих сред, обеспечивающего дорастание кристаллов любым из рассмотренных способов их образования.

*Способы зарастания сингенетических трещин и образования в них включений.* В расшифровке процессов залечивания трещин в минералах, проведенной на основе экспериментов с легкорастворимыми кристаллами солей, важные представления были сформулированы Г. Г. Леммлейном [44, 46]. Он считал, что форма полости любой капиллярной трещины, обычно возникающей в кристалле в результате разрядки внутренних напряжений, должна рассматриваться как предельно неравновесная форма поверхности раздела кристаллической и жидкой или газообразной фаз. Перестройка этой полости под воздействием проникших в нее растворов начинается в выклинивающейся части трещины и на активных участках поверхности ее стенок одновременно во многих местах. Процесс перестройки такой полости может осуществляться даже без привноса вещества извне, а только за счет растворения стенок трещины и перекристаллизации растворенного ве-

щества в виде дендритного образования. Возникновение и рост внутритрещинных дендритных образований одновременно во многих местах и сама разветвленная форма дендрита неизбежно приводят к замыканию частиц раствора в виде включений и к расчленению неравновесной капиллярной полости трещины на множество малых «делянок» — полостей, каждая из которых стремится приобрести форму, наиболее близкую к равновесной. Однако здесь необходимо отметить и распространенное залечивание трещин в кристаллах в результате многоглавого роста, показанное нами ранее [22] на примере кристалла кварца из Бристенштока.

При залечивании трещин в более или менее изотермических условиях отношения фаз и содержимое всех образовавшихся при этом мнимовторичных газово-жидких включений одинаковы и будут соответствовать термодинамической природе и составу раствора, проникшего в трещину. Обычно залечивание происходило во времени не при абсолютно постоянной, а при несколько изменяющейся температуре и поэтому включения растворов, самоизолировавшихся при разных температурах на глубине и приустьевой части микротрещины, немного различны по современному отношению фаз и могут иметь даже несколько различный состав. Однако улавливать эти различия оказывается очень трудно, так как они находятся в пределах точности термометрических измерений и микрохимических анализов.

Каждый кристалл может подвергаться неоднократному растрескиванию в разные моменты роста в результате резких изменений (флуктуаций) температуры и давления и содержимое включений ранних трещинок может отличаться от поздних, что оказывается уже доступным для обнаружения экспериментальными исследованиями.

При пересечении двух внутриминерализационных трещин разного возраста более молодая из них вскрывает включения более старой уже залеченной трещины, и содержимое включений, образовавшихся в месте пересечения, будет по фазовому состоянию приблизительно отвечать перенаполненным включениям смешанных растворов (см. главу 16). Таким образом, по составу и фазовому состоянию содержимого включений в трещинах различного возраста можно судить и об изменениях, происходивших в кристаллизирующей среде, если эти изменения были существенными. Предстоящий прогресс в разностороннем исследовании микрообъектов природы позволит нам более тонко, чем теперь, улавливать эти различия в конкретном виде.

Для реальных природных кристаллов на примере кварца мы установили [22] не только дендритообразное, но и многоглавое зарастание трещин с образованием включений, возникавших в процессе роста кристаллов. Эти возможности для труднорастворимых минералов позднее были тщательно изучены А. В. Лоскутовым [48] на примере кристаллов кварца. Он установил, что залечивающие микротрещины новообразования имеют только морфологическое сходство с дендритами и что причудливые формы и взаимное расположение включений в этих трещинах определяется в конечном счете микрорельефом стенок и ориентировкой их в теле кристалла.

Полностью соглашаясь с этим выводом А. В. Лоскутова, мы в дальнейшем будем говорить не о дендритном, а о *дендритообразном зарастании трещин,* вмещающих мнимовторичные (и вторичные) включения в минералах. Кристаллизация вещества, родственного минералу-хозяину, в любой возникшей микротрещине, по его наблюдениям, строго подчиняется важнейшим поясам кварца. Преобразование обеих стенок трещины осуществляется продвижением фронтальных слоев роста, и в суженных ее местах происходит их смыкание.

По А. В. Лоскутову, на стенках плоских включений, формирующихся в микротрещинах кварца, в отраженном свете наблюдается тон-

кая скульптура их зарастания в виде штриховки (ступенчатости), параллельной ребрам, ограничивающим ромбоэдр, а также вицинальные пирамидки, которые часто имеют неискривленные грани с четкими следами роста.

Смыкание трещинок при их ступенчатом зарастании может приводить к образованию трубчатых параллельных друг другу включений растворов, а вицинальные элементы, создают при этом усложненные формы. Вакуоли всех этих включений являются, таким образом, *полостями роста.*

Если инъецировавшиеся в микротрещину растворы были недосыщенными по отношению к родственному веществу, а для кварца, например, имели щелочной характер, то могли возникать явления растворения стенок, наблюдавшиеся А. В. Лоскутовым в виде «лодочек» и негативных треугольных «пирамидок». После насыщения раствора при снижении температур в системе кристалл — раствор начинается дендритообразная перекристаллизация вещества, завершающаяся самоизоляцией растворов в микротрещине и образованием полостей *растворения.* Такой процесс, однако, более свойствен вторичным включениям.

Дальнейшее перераспределение вещества в условиях снижающейся температуры вызывает преобразование вакуолей уже изолированных включений с формированием наиболее простых граней, характерных для кристалла-хозяина. Иногда этот процесс приводит к образованию полостей негативных кристаллов, обычно располагающихся закономерно ориентированными семействами. Таким образом, явления регенерации и растворения стенок обеспечивают залечивание трещин с обязательной консервацией микропорций регенерирующих растворов.

В более крупных разверстых трещинах, особенно в тонкомозаичных кристаллах, чаще всего устанавливается образование включений растворов способом многоглавого роста. При встрече головок микрокристалликов, росших на стенках трещины навстречу друг другу, происходит замыкание капелек минералообразующих растворов, для кварца гранями ромбоэдров. Такие вакуоли включений естественно относятся к полостям роста. Наглядный пример залеченной, таким образом, трещины в турмалине приведен М. М. Сливко [62].

Таким образом, мнимовторичные включения залеченных сингенетических трещин, пересекающих разные внутренние зоны роста кристаллов, но не выходящих на их современную поверхность, могут образовываться разными способами. Сами эти трещинки появляются в различные моменты роста кристалла из-за внутренних напряжений, возникающих под воздействием изменения внешних факторов. В последующие моменты продолжавшегося роста кристалла происходит их залечивание, одновременное с образованием следующей зоны его роста или же после перерыва, в результате наращивания кристалла веществом последующей генерации (см. фототабл. XVI, *б*).

Для легкорастворимых кристаллов А. А. Штернберг провел очень важные наблюдения за развитием трещин в группах кристаллов, выращиваемых в совершенно одинаковых физико-химических условиях, но дающих разные асимметричные формы. Им было установлено, что в процессе роста в различных местах кристаллов возникают трещины и включения в них. Трещины в растущем кристалле «начинаются в зоне регенерации и затем распространяются в сторону нарастания кристалла, никогда не проникая в зародыш. Чем быстрее протекает период регенерации, тем в большем количестве кристаллов оказываются трещины» [75]. Иногда трещины не выходят на поверхность кристаллов, удлиняются скачками и следуют за непрерывно нарастающей гранью. В определенных направлениях они начинают разветвляться и скорость роста здесь по отношению к другим граням резко увеличивается.

В природных кристаллах флюорита и других минералов нами

наблюдались подобные разветвляющиеся полые трещины и не залеченные трещинки — «блестки» [19]. Их мы называли «сухими» трещинами. Однако чаще всего сингенетические трещины в природных кристаллах оказываются залеченными, так как они выходили на поверхность былых граней роста. Они выклиниваются внутри кристалла и перекрываются в торец слоем нарастания, иногда вблизи от его современной поверхности.

Для всех случаев залеченных трещин в ограненных кристаллах мы должны допустить, что в разные моменты роста развитие трещин напряжения, направленное из внутренней части наружу, достигало былой поверхности нарастающей грани кристалла. Это особенно наглядно наблюдалось нами в фантом-кристаллах, в которых залечивание трещинок внутреннего кристалла с полной очевидностью совпадало во времени с первыми моментами нарастания наружного кристалла. Следовательно, включения, расположенные в трещинах внутреннего кристалла, отвечают по составу и состоянию первичным включениям зоны наружного «одевающего» кристалла.

Природные условия минералообразования были далеки от тех идеальных условий, которые создаются при выращивании кристаллов в лабораториях. Это касается как равномерного охлаждения раствора в резервуарах-кристаллизаторах или благоприятного перепада температур в них, так и предохранения кристаллизующих систем растворов от флуктуаций термодинамических параметров. В очень сложном процессе естественного минералообразования, в котором возникновение идеальных кристаллов является редким явлением, более или менее резкие колебания температур и давлений, землетрясения еще не известного человечеству масштаба и многие другие воздействия являлись дополнительными стимулами для достижения трещинами напряжения поверхности былых граней роста. Очень многие из этих залеченных трещин возникают и развиваются в «бороде» кристаллов от места их прикрепления к субстрату, через который передаются отмеченные воздействия, особенно тектонические.

В качестве частного случая ранее отмечалось, что тангенциальное нарастание дискретных новых микрослоев на гранях кристаллов происходит не по всей площади одновременно, а ступеньками, возникающими у ребер и продвигающимися навстречу друг другу через всю грань. Моменты их образования и залечивания под ними внутренних трещинок, конечно, совпадали. Температурное состояние растворов, наращивавших кристалл и залечивавших его трещинки, было для этих моментов также одинаковым. Таким образом, мнимовторичные включения залеченных трещин, сингенетических росту кристаллов, несут, с одной стороны, признаки вторичного происхождения, так как их группы располагаются в капиллярных трещинах, пересекающих формы роста, а с другой — являются по заполнению первичными, так как залечивание трещинок осуществлялось во время продолжавшегося роста кристаллизующими растворами.

Весьма специфической характерной разновидностью включений газовых и реже жидких растворов являются инверсионные включения, образующиеся в полигональных субсингенетических трещинах $\alpha$—$\beta$-трансформации кварцев. Как было показано Ю. А. Долговым [13], растрескивание «сотовых» кварцев, ранее называвшихся сетчатыми, происходит в результате только быстрого спада температур и давлений. Они оказываются особенно характерными для крупнополостных образований камерных пегматитов Волыни, Центрального Казахстана, Забайкалья и некоторых других мест. Сотовые кварцы на этих месторождениях образуют стержневую часть крупных кристаллов морионов (см. рис. 30) и в качестве первичных включений в межтрещинных пространствах содержат затвердевшие включения остаточных расплавов-

рассолов, позднее названных нами кристалло-флюидными. Температуры их гомогенизации в жидкую фазу находятся в интервале 585—650° С [24].

Сразу же вслед за быстрой α—β-трансформацией кварца в сотовые трещинки проникали газовые (реже жидкие) растворы и залечивали их с образованием огромного количества существенно газовых включений, вторичных для сотового кварца, но отвечающих включениям следующей зоны кристаллов послеинверсионного нарастания (см. фототабл. XVI, *а*). Таким образом, для кристалла-хозяина в целом сотовые включения являются представителями типичных мнимовторичных образований.

Следует отметить очень характерную равновесную форму вакуолей этих включений в виде гексагональной дипирамиды без граней призмы с округленными ребрами. В их заполнении при комнатной температуре участвует 5—25% жидкого конденсата, а остальной их объем занят газовой фазой (см. фототабл. V, *б*, *в*).

На фотографии образца, кроме залеченных сотовых трещин α—β-трансформации, отчетливо можно видеть три веерообразные секущие трещины, которые также залечены, но уже более поздними жидкими высокотемпературными растворами. Включения в них с большим газовым пузырьком по степени заполнения приблизительно отвечают ранней морионовой зоне *4* (см. рис. 30) и законсервировались в начале ее нарастания. Однако инъецированные морионообразующие растворы в возникших трещинах смешались с газовыми растворами сотовых включений, высвободившимися при растрескивании (перенаполнение, см. главу 16). Сами сотовые включения отвечают по фазовому составу первоначальным включениям основания пневматолитовой зоны *3*, представленной бесцветным кварцем (см. рис. 30).

В обычном горном хрустале гидротермального происхождения возрастная расшифровка залеченных трещин представляет затруднения лишь в незональных кристаллах. Однако сами включения, часто располагаясь закономерными рядами, позволяют установить их взаимоотношения. Например, такое семейство трубчатых включений, представленное в фототабл. XVI, *в*, приурочено к диагональной косой микротрещине, пересекающей более древнюю залеченную трещину с мелкими изометрическими (изредка трубчатыми) включениями, располагающимися в плоскости микрофотографии.

На той же фототабл. XVI вмонтирована микрофотография пластинки из оливина I Норильска (см. главу 13), содержащего в качестве первичных раскристаллизованные включения (см. фототабл. III, *в*). Однако в диагональных трещинах этого оливина развиты стекловатые включения, часто с небольшими газовыми пузырьками, отвечающие по времени образования оливину II наружной зоны кристаллов, дорастав-ших из поздних порций расплавов в процессе быстрого охлаждения (см. фототабл. XVI, *а*). Пустые трещины, пересекающие трещины, залеченные остаточными расплавами, являются уже постгенетическими.

Нами было установлено, что в так называемых гранулированных жильных кварцах Кыштыма, являющихся прекрасным сырьем для кварцевой плавки, залечивания сотовых трещин и цементации гранул в большинстве случаев не происходило. Однако, когда оно все же имело место, в трещинках возникали жидкие, но уже вторичные включения, так как дорастания доинверсионных кристаллов кварца не происходило, а имело место лишь постгенетическое воздействие гидротерм на силекситовые (кварцевые) жилы.

Мы наиболее подробно рассмотрели генезис мнимовторичных включений сингенетических трещин в дорастав-ших ограненных кристаллах, выделив три главнейшие их разновидности (см. табл. 12), потому что

хотя эти включения оказались весьма распространенными в природе, они не всегда четко понимаются исследователями.

*Образование регенерационных включений у поверхности сколов и корродированных граней.* Образование регенерационных включений связано с восстановлением формы кристаллов, нарушенной механическими сколами, химическим растворением (выщелачиванием) или оплавлением. Особенности возникновения включений по сравнению с регенерацией трещин в кристаллах связаны с тем, что поврежденные грани кристаллов восстанавливаются в условиях дорастания в свободном пространстве. В процессе такого дорастания регенерирующейся поверхности, по И. И. Шафрановскому [71], вначале возникают грани, наиболее близкие по отношению к ней, и только затем они заменяются другими, обеспечивающими восстановление конечной равновесной формы кристалла.

Широко известны двуглавые кристаллы кварца и других минералов, в которых чаще всего вторая головка их вырастала на поверхности скола уже после отрыва минерального индивида от своего субстрата. Чаще всего при этом происходил многоглавый или скелетный рост и в пограничной зоне, у основания новых кристаллов, захватывались капли регенерирующих растворов, делающих границу регенерации более отчетливой. Естественно, что такие включения по фазовому состоянию и составу отвечают начальным моментам регенерации и в значительной мере наследуют микродефекты (неровности, впадины) на поверхности механического скола. Естественно, что при дальнейшем дорастании кристалла любым из описанных ранее способов могут возникать и первичные включения, отвечающие минералообразующей среде заключительной стадии кристаллизации.

В ряде случаев на Волыни поврежденные механическими сколами участки морионов регенерировались прозрачным дымчатым или бесцветным горным хрусталем с образованием трубчатых или конусовидных включений, ориентированных перпендикулярно или наклонно к былой поверхности скола, т. е. вытянутых в направлении дорастания кристалла.

На Памире иногда встречаются фантом-кристаллы горного хрусталя с растворенной внутренней головкой («колпачки растворения»), позднее, после перерыва в росте, восстановленной кварцем новой генерации. Изображение такого кристалла представил А. И. Захарченко [25]. Здесь можно видеть, как начавшийся при регенерации головки скелетный рост обеспечил захват очень большого количества регенерационных включений, наследующих неровности (фигуры травления) растворенной головки.

На искусственных кристаллах кварца залечивание трещин и наследование вакуолей растворения, первоначально возникших в затравочной пластине, было особенно наглядно представлено Г. М. Сафроновым [59] (фототабл. XVII). Веретенообразные и трубчатые включения, ориентированные субпараллельно и под крутым углом к протравленной поверхности затравки, располагаются в основном в пределах последней, но имеют продолжение и в наросшем новом кварце. Естественно, что по очень выдержанным фазовым отношениям и составу растворов они отвечают химической среде, кристаллизовавшей слой новой генерации, и заполнению автоклава.

В фенокристаллах кварца, лейцита и оливина иногда наблюдаются округлые внутренние зоны, переполненные затвердевшими включениями, имеющими повторение и в наружных зонах. Здесь имело место временное оплавление кристалла в материнском расплаве с позднейшей регенерацией граней и образованием первичных и регенерационных включений расплавов в зоне границы плавления и нового нарастания.

Очень редко встречаются газово-жидкие включения, образовавшиеся в полостях выщелачивания твердых включений, отвечающие им по форме. Такой случай, например, был описан В. Г. Лушниковым для горного хрусталя с Южного Урала.

В этом кристалле кварца наблюдается ромбоэдрическая полость, оставшаяся от растворения карбоната и заполненная материнским хрусталеобразующим раствором. По происхождению эта полость, расположенная под гранью призмы, не была связана с кристаллизацией вмещающей ее зоны горного хрусталя и поэтому при строгом подходе не может быть отнесена к первичным включениям. Однако следует отметить, что регенерационные включения очень близки к последним, но, как и в случаях залечивания субсингенетических трещин, фазовое состояние и состав их заполнения отвечают времени нарастания не вмещающей, а перекрывающей зоны роста кристалла. Именно поэтому они описываются нами в пределах класса мнимовторичных включений.

*Образование секреционных включений коллоидных растворов.* Этот генетический вид включений не подчиняется тем строгим законам и принципам кристаллизации и регенерации минералов, которые приводят к образованию в них обычных газово-жидких включений. Секреционные включения возникают в минералах и породах путем послойного микроритмичного отложения гелей на стенках тех или иных пустоток и трещин, сопровождающегося затем синерезисом и самоизоляцией дисперсионной среды. В известной мере сходными моделями таких включений являются агатовые жеоды в полостях газовых пузырей лав, часто сохраняющие после выделения кремнезема даже остаточную жидкость. Такие секреционные включения образуются и в дайках при проникновении в них коллоидных растворов, и в колчеданных рудах, в которых они впервые были изучены Ю. А. Долговым [14], в халцедонах и опалах агатовых месторождений [69], в крупных кристаллах кварцев Волыни [57]. Включения растворов, связанные непосредственно или даже косвенно с коллоидным минералообразованием, сопровождаются весьма специфическими условиями формирования.

*Губчатые включения* в кристаллах представляют собой ни что иное, как сгустки затвердевших гелей разнообразной, часто хлопьевидной формы, осевшие на гранях растущих кристаллов вследствие коагуляции. По существу они являются аналогами твердых хлопьевидных включений, иногда образующихся при выращивании кристаллов кварца. Такие губчатые включения располагаются в опалах в межсферолитовых пространствах часто вместе с *бахромчатыми включениями.*

Типичные крупные жидкие включения коллоидных минералов генетически были изучены нами вместе с Ф. П. Мельниковым в микротермобарометрической лаборатории кафедры полезных ископаемых МГУ из опал-халцедоновых оторочек гнезд исландского шпата в траппах месторождений Нижней Тунгуски. Эти природные включения (см. фототабл. XIII), по-видимому, ближе всего стоят к бахромчатым включениям Ю. А. Долгова [14] и возникают в силикогелях. Они существенно отличаются от описанных ранее аэрогелей (см. фототабл. VIII).

Различия между ними существенны и в какой-то мере связаны с транспортирующей способностью истинно газовых и жидких гидротермальных растворов, с одной стороны, и аэрозолей и гидрозолей — с другой. Несущая способность в отношении массы вещества газовых и жидких минералообразующих сред оказывается существенно различной. Не менее важным в связи с этим является и различный механизм формирования коллоидно-пневматолитовых и коллоидно-гидротермальных включений газовых и жидких растворов.

В формировании первых доминанта принадлежит кристаллообразующей основной минеральной форме движения материи, а для вторых наиболее наглядно проявляются условия первоначального отложения

и дальнейших преобразований коллоидного вещества, включая формирование в нем коллоидно-водных включений. Последнее не ограничено строгими законами кристаллизации вещества определенного состава и является глубоко специфическим. Однако, например, для аэрогелей, покрывающих очень тонкой пленкой вакуоли газовых включений, узор трещинок синерезиса оказывается различным для кварца и топаза, что мы объясняем влиянием подложки кристаллических стенок. По мере снижения температуры и давления происходит обезвоживание геля в стенках будущих вакуолей включений. В средней части формирующей-

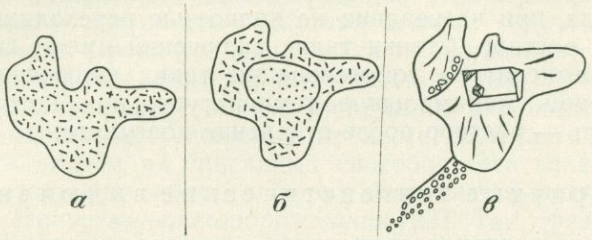



Рис. 33. Схемы образования бахромчатых включений в коллоидных минералах (по Ю. А. Долгову)

*а* — золь; *б* — гель (черточки) и обособленный золь (точки); *в* — раскристаллизованный гель и истинный раствор в негативной полости; залеченные трещины с глобулярными включениями

ся полости концентрируется очищенная от суспензоидов синеретическая жидкость, в основном уже в виде истинного раствора, водной среды, соответствующей растворителю. Обезвоженная бахромчатая кайма вакуолей занимает разный объем вокруг включений, так же как и остаточная дисперсионная среда, стерилизованная до истинного раствора и при охлаждении давшая газовый пузырек (см. фототабл. XIII, *а*, *б*, *в*). Схема образования таких включений, по Ю. А. Долгову [14], представлена на рис. 33 и дает первое объяснение формированию таких включений.

*Глобулярные включения* возникают при нарушениях герметизации крупных бахромчатых включений, из которых по радиальным контракционным микротрещинкам синерезиса проникает остаточная жидкость, остающаяся после залечивания этих трещин в виде субмикроскопических однофазовых шарообразных жидких включений. Таким образом, эти еще малоизученные включения являются вторичными, так как их образование сильно запаздывает по отношению к выделению исходных продуктов коллоидного минералообразования (дисперсной фазы и растворителя).

Иногда встречаются шарообразные включения, очень сходные с глобулярными, но не имеющие пространственной связи с бахромчатыми. Возможно они являются остаточными каплями жидких растворов, имеющими «островное» расположение в гелеобразной массе кремнезема, выделявшейся на агатовых месторождениях [69].

При развитии изолированных шарообразных включений из обособившихся капелек синеретической жидкости иногда происходило образование вокруг нее слоя микрокристаллического вещества. В дальнейшем вокруг этой «капельной оболочки» вследствие дальнейшего сокращения объема геля при старении возникала новая микросфера жидкости, из которой образовалась вторая «скорлупка», замкнувшая наружный слой раствора. Таким образом, по Ю. А. Долгову [14], возникали двухскорлупчатые включения, воспроизведенные им искусственно (см. рис. 33).

Бахромчатые, глобулярные и двухскорлупчатые включения выявлены как надежные показатели коллоидного образования и преобразо-

вания минеральных веществ, возникающие в результате вторичных процессов старения и объемного сокращения гидрогеля, его синерезиса в условиях относительной изоляции. Вследствие того, что самоизолировавшиеся в коллоидных минералах остаточные истинные растворы произошли из материнских первичных золей, в целом такие включения относятся нами к классу мнимовторичных (первично-вторичных) микрообразований.

Следует отметить, что такие включения коллоидных растворов, повидимому, мало пригодны для целей минералогической термометрии. После обособления в них на стенках вакуолей выделяется некоторое количество геля, при нагревании не полностью переходящее в остаточный истинный раствор. Стенки таких включений имеют специфическую скульптуру. Температура гомогенизации таких включений, возможно, показывает лишь минимальную температуру, при которой возникло равновесие гель — раствор после отделения коагулята.

### Вторичные эпигенетические включения

Представители распространенного в природе класса вторичных газово-жидких включений предоставляют исследователям важную информацию об эпигенетических преобразованиях минералов руд и пневматолитово-гидротермальных изменениях вмещающих эндогенные месторождения пород. В соответствии с двумя главнейшими способами постмагматического рудообразования (выполнение и замещение) нами выделяются два вида вторичных включений: 1) постгенетических трещин и 2) метасоматоза и выщелачивания.

Семейства вторичных включений первого вида консервировались в условиях, когда не было никакого дорастания или регенерации граней кристаллов, а залечивание трещин одним из описанных способов происходило в полностью оформленных кристаллах или кристаллически-зернистых агрегатах без привноса или с привносом родственного вещества постгенетическими растворами.

Семейства вторичных включений, законсервированных в результате метасоматоза и выщелачивания уже существовавших руд и пород, образуются чужеродными для них растворами или в околотрещинных зонах или в минеральных новообразованиях, заполняющих микропоры выщелачивания и замещения минералов и их межзерновых пространств.

*Вторичные включения постгенетических трещин.* В отличие от описанных представителей двух классов первичных и мнимовторичных включений вторичные включения по отношению ко всему вмещающему минералу являются эпигенетическими. Они располагаются в трещинах, пересекающих все зоны роста кристалла вплоть до самой наружной, а также те или иные границы пирамид нарастания, двойниковые швы, поверхности регенерации, индукционные грани кристаллов, границы минеральных агрегатов и, наконец, внутриминеральные трещинки, содержащие мнимовторичные включения. При этом часто разновременные постгенетические трещины в кристалле пересекают и друг друга и одновременно ограничения целого ряда кристаллов [22]. Характернейшей чертой вторичных включений, таким образом, является *отсутствие связи их с процессом роста и регенерации граней включающего кристалла.* Они образуются в трещинах, выходящих на поверхность граней и залеченных в позднейший период, этап или стадию минералообразования и метаморфизма, когда уже не происходило дорастания кристалла-хозяина (см. рис. 28), т. е. они не имеют никакой сингенетической зоны роста во включающих минералах.

Постгенетические трещины в минералах различны по происхождению. Чаще всего они обязаны механическому воздействию на кристал-

лы тектонических усилий (рассланцевание, катаклаз) (см. фототабл., XVIII, *в, г*) и реже *явлению полиморфных превращений* в кристаллически-зернистых минералах кислых интрузивов, вызывающему резкие изменения их удельного объема при изменениях температуры и давления. Этот способ образования трещин в кристаллах, как известно, был впервые разъяснен А. Е. Ферсманом на примере $\alpha$ — $\beta$-превращений кварца. В качестве одной из вероятных причин возникновения поздней трещиноватости в минералах можно назвать и термическое воздействие на них в ореолах интрузивного прогрева.

В условиях поверхности земли трещины в минералах образуются главным образом в результате *действия агентов денудации*, однако залечивание трещин в этих условиях почти не происходит и вторичные жидкие включения в них носят характер затеков [22].

Надежно изолированные внутри кристаллов вторичные включения образуются в эндогенных условиях в процессе постгенетического залечивания трещин любым из описанных способов. Это залечивание уже полностью образованных кристаллов осуществляется *растворами других периодов и этапов минералообразования* [23]. Так, трещины в пирогенном кварце обычно залечиваются пневматолитовым кварцем или кварцем гидротермального происхождения. Очень типичный случай нахождения вторичных включений в фенокристаллах пирогенного кварца из эффузивов Кавказа был впервые описан В. Ф. Лесняком [47]. Трещины в кристаллах кварца ранних генераций иногда залечиваются позднейшим кварцем другой окраски, образующим на месторождении обособленные индивиды поздней генерации и измененного габитуса.

Вторичные включения в искусственном кварце были воспроизведены Г. М. Сафроновым и В. Е. Хаджи [59] после завершения цикла через скелетное (каркасное) зарастание полузалеченных трещин, выходивших на поверхность граней кристалла перед вскрытием автоклава. Включения в таких трещинах ввиду быстрого остывания раствора, потерявшего кристаллизационную активность, в большинстве случаев даже не успевают надежно обособиться друг от друга и образуют ячеистый каркас в виде неравновесных «замороженных» форм залечивания. Форма вторичных включений и ориентировка их в полузалеченной трещине резко меняются на границе различных генераций кварца затравки и нароста (фототабл. XVIII, *а, б*).

Этот наглядный эксперимент привносит дополнительные элементы в понимание механизма самого позднего залечивания трещин и относительное время образования вторичных включений из казалось бы одной и той же, но изменившейся при охлаждении и спаде давления химической среды при вскрытии автоклава.

*Вторичные включения метасоматоза и выщелачивания.* Явления замещения, конечно, осуществляются в природе под воздействием метасоматирующих растворов на минералы пород и руд. Эти растворы сохраняются в них двояким способом: 1) в микропорах минеральных новообразований полного замещения в виде описанных первичных включений, образовавшихся в порах выщелачивания новых минеральных псевдоморфоз; 2) при не полном метасоматозе старых минералов, происходящем обычно вдоль трещин или по спайности. Для этих минералов они являются уже совсем чужеродными, вторичными микрообразованиями.

Именно эти последние включения, фиксирующие частичные для минеральной массы пород и руд метасоматические изменения, выделены нами в особый седьмой вид вторичных включений (см. табл. 12). Такие включения, к сожалению, пока привлекали к себе еще очень мало внимания и впервые в литературе были отмечены Д. С. Коржинским [37] в качестве причины мнимой пелитизации полевых шпатов.

На примере этих очень распространенных минералов имеется на-

глядная возможность проиллюстрировать значение данного вида включений.

Ясно, что метасоматоз и перекристаллизация обычно осуществляются не без участия высокоподвижных, активно преобразующих породы и руды геохимических сред. Тем не менее консерваты последних, если были проявления метасоматоза, в подавляющем большинстве случаев совершенно не используются в качестве доказательств его действительного наличия.

Конечно, в этом вопросе легче чем во многих других, затронутых ранее, можно судить о преобразованиях в минералах. Например, альбитизация, развивающаяся по микроклину, сопровождается макроскопически явным его осветвлением. Однако самый свежий (розовый или мясокрасный) микроклин пирогенного образования, содержащий первичные затвердевшие включения порождавших его расплавов, во многих работах начинает считаться вторичным метасоматическим образованием без каких либо реальных аргументов.

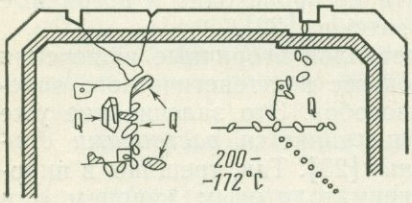



Рис. 34. Вторичные включения при растворении и метасоматозе кристалла флюорита (по Г. Г. Грушкину)

Между тем, если действительно проявлялось даже слабое воздействие метасоматирующих растворов, они непременно самоконсервировались в виде вторичных газовых или жидких включений — прямых свидетелей метасоматоза.

Вторичные включения в микропорах выщелачивания и замещения минералов для ограненных кристаллов были впервые описаны Г. Г. Грушкиным под названием «вторичные включения в пустотах растворения». Эти включения образовались при замещении флюорита кварцем и пиритом в поздние стадии рудообразующего процесса. На рис. 34 видно подчинение «слоев» замещающего кварца решетке флюорита, а температуры гомогенизации газово-жидких включений, сингенетичны замещению флюорита кварцем и пиритом. В полости залеченной трещины возникли и вторичные двухфазовые включения более низкотемпературных жидких растворов (144° С). Автор обращает внимание на зависимость формы включений растворения и ориентировки соединяющих их нитеобразных ходов от кристаллической решетки флюорита. Отметим, что такая зависимость растворения и замещения минералов наблюдается далеко не всегда.

Вторичные включения, развивающиеся при более полном метасоматозе, чем в приведенном случае, оказываются очень мелкими. В микроклине и ряде других минералов они развиваются в метасоматическом окаймлении микротрещин, пересекающих границы между кристаллами или находящихся в реакционных каемках на контактах между зернами пород и руд. Проникновению растворов в интрузивные породы содействуют контракционная и дилятационная их трещиноватость и межзерновая скважность, определяющие наряду с динамическим катаклазом места образования вторичных включений трещинного и метасоматического видов.

### *Общие выводы по генезису нормальных включений растворов и расплавов*

Подведем главнейшие итоги обсуждения вопросов генетической классификации включений. Как видно, в минеральной природе имеется большое разнообразие не только в составе и фазовых соотношениях заполнения включений геохимических сред, но и в хронологической

последовательности и способах образования и преобразования микровакуолей этих включений.

Существенная детализация нашей генетической классификации по сравнению с классификацией 1949 и 1950 гг. касается лишь видов и разновидностей нормальных включений расплавов и растворов. Семь видов выделены по генезису и связанными с ним общими закономерностями в расположении включений в минералах и их агрегатах, а диагностика разновидностей проведена по конкретному их местоположению в минеральных образованиях. Эти разновидности привязаны к генетическим видам включений и характеризуют последние в тонких нюансах формирования и преобразования кристаллических индивидов и их совокупностей в друзах и зернистых агрегатах. Относительно особое место включения занимают на самом низком уровне затвердевания неорганических веществ — в коллоидных и метаколлоидных первичных минеральных образованиях и в связи с гидротермально-метасоматическими радикальными преобразованиями первичных минералов.

Включения микропорций геохимических сред, герметизированных внутри минеральных образований, представляют собой не исключительное, а самое обычное в минеральной природе явление. Однако не только само разнообразие вещества заполнения вакуолей, но и происхождение этих вакуолей во времени и в пространстве тел минеральных индивидов и их агрегатов потребовало очень длительного осмысливания.

После работы Г. Сорби (1858 г.) — первого минералога-микроскописта — это заняло более 90 лет и к средине XX века привело лишь к обособлению трех генетических и временных классов включений: первичных, мнимовторичных и вторичных. Первые два класса при этом перестали противопоставляться друг другу. Было понято, что одиночные включения или их семейства, располагающиеся в зонах роста или во внутренних микротрещинах, по времени консервации отвечают образованию и преобразованию каждого кристалла-хозяина в целом или же синхронны одной из его зон роста (иногда самой наружной) или участку регенерации.

Семейства вторичных эпигенетических включений по характеру образования и местонахождения приурочены к секущим микротрещинам кристаллов и их агрегатов, разрывные деформации которых возникли после полного завершения образования (роста) включающих минералов. Залечивание таких микротрещин механического происхождения, обусловленных внешним воздействием (катаклаз и кливаж), или микротрещин, связанных с самопроизвольным изменением объемов минеральных организаций (контракция и делятация), происходило без дорастания кристаллов и поэтому вторичные включения не имеют сингенетической зоны роста включающих минералов.

Когда геологи, занимающиеся генетическим исследованием метаморфизма пород и руд, начнут учитывать реальное значение подвижных геохимических сред в этих преобразованиях (водные хемогенные растворы и углекислота), что уже было намечено в работах Д. С. Коржинского [39], выявятся новые уточнения в природе включений, возникнут новые контрасты.

Например, гранобласты кварца, уже содержавшие первичные и мнимовторичные включения, по микротрещинам приобретают вторичные включения метаморфизующих растворов, а в зонах дорастания кристаллобластов эти же включения являются для них первичными. Однако и те и другие характеризуют своими параметрами и составом подвижные геохимические среды, участвующие в метаморфизме.

Из опасений того, что новая многочленная генетическая классификация окажется трудной для понимания, мы пока не расчленяем обра-

зования метаморфогенных включений, связанных с обычным метаморфизмом пород, за исключением включений-свидетелей гидротермального метаморфизма, характеризующих околорудные изменения.

Эти последние включения оказались необходимыми, с одной стороны, для диагностики особенностей изменения пород в связи с рудными и нерудными стадиями минерализации, а с другой, что еще более важно, в связи с возможностями использования вторичных включений для отыскания слепых рудных тел. Таким образом, представленная генетическая классификация самих включений является несколько упрощенной для современного уровня познания образцов геохимических сред и фиксации с мерой и числом физико-химических параметров эндогенного минералообразования.

При изучении и использовании нормальных включений минералообразующих растворов и расплавов следует для каждого случая находить им место по видовой линии в двух представленных классификациях (см. рис. 23 и табл. 12). Умение совмещать эти две классификации обеспечивает надежные генетические интерпретации в исследованиях процессов и явлений эндогенного минералообразования, относящихся к далекому геологическому прошлому. Только правильная диагностика классов и видов образцов материнских сред, рассмотренных в этих двух классификациях, может служить термодинамически, химически и хронологически точному познанию генетики минеральной природы. Это становится возможным только в обязательном сочетании исследований включений с изучением геологической обстановки и парагенезисов минералов в друзах свободного роста кристаллов и в зернистых срастаниях руд и магматических пород.

При этом оказывается необходимым учитывать и исключать из исследований описываемые ниже аномальные включения не цельных систем, а лишь отдельных частей гетерогенных сред, а также включения с ненормальным эпигенетическим преобразованием вакуолей, вплоть до частичного и полного их разрушения и перенаполнения.

## Глава 16

## АНОМАЛЬНЫЕ ГАЗОВО-ЖИДКИЕ ВКЛЮЧЕНИЯ В МИНЕРАЛАХ

Исследователи при рассмотрении микровключений среды в природных минералах, особенно в начальной стадии ознакомления с ними, изредка сталкиваются с реальными явлениями нахождения таких включений, которые, казалось бы, выходят за рамки существующих представлений об их природе. Иногда в тесном соседстве с семействами многочисленных нормальных включений в минералах встречаются специфические необычные включения, которых, казалось бы, не должно быть. Такого рода включения приводят в недоумение даже самых добросовестных исследователей. Некоторые из них, не вполне уясняя многообразие явлений природы, используют факты наличия таких включений для развития сомнений в возможности использования включений в качестве надежных документов при расшифровке эндогенного минералообразования. Сомнения и кажущиеся противоречия в суждениях по данному вопросу требуют внимания и объективного выяснения природы этих особенных микрообъектов. Автор надеется, что первая систематика аномальных включений должна содействовать сокращению дискуссий, в большинстве случаев связанных со спорадическим или совсем мимолетным знакомством с указанными микрообъектами минеральной природы.

В генетическом отношении автору оказалось необходимым подразделить все включения, встречающиеся в минералах, на две группы:

*нормальные и аномальные.* Категории обычного, специфического, т. е. нормального и аномального, отклоняющегося от общих закономерностей, еще требуют серьезного дополнительного рассмотрения в диалектике природы. В какой-то мере они затрагиваются при рассмотрении категорий необходимости и случайности в природе (и обществе), но должная глубина их осмысливания применительно ко всем явлениям будет достигнута лишь при особом рассмотрении этих категорий.

По существу вся природа макро- и микрогеолого-минералогических объектов, всегда противоречивая в своих проявлениях, закономерна, а случайность в образовании аномальных включений вызвана необходимостью для каждой конкретной особой ситуации минералообразования или преобразования минералов и руд.

Кроме того, некоторые включения только представляются аномальными. Иногда это псевдоаномальные включения, образовавшиеся вполне закономерно. Например, газовые пузырьки в силекситах пегматитовых зон или в карбонатитовых образованиях являются только газовой составляющей микропорций включенных расплавов, их частью, но не цельной системой включений. Родственное вещество кремнезема или карбонатов при раскристаллизации захваченной порции остаточного расплава одинаково с вмещающими аналогичными по составу минералами и их однородно-зернистыми агрегатами. При этом легко различимыми под микроскопом остаются только газовые составляющие — обособления пузырьков в микропорциях остаточных расплавов. При формальном подходе эти газовые пузырьки можно истолковывать не как часть включений системы, а как самостоятельные газовые включения и использовать их в качестве доказательства пневматолитового происхождения силексита или карбонатита. Это не допустимо так же, как если бы мы рассматривали газовые пузырьки перлитов и обсидианов в качестве доказательства пневматолитового образования пород.

Именно поэтому в качестве особого дополнения к новой классификации нормальных включений (см. табл. 12) должна быть представлена систематика и аномальных включений (табл. 13).

Так как даже нормальные, обычные включения расплавов и растворов в магматических и метаморфических породах и рудах еще слабо изучены, рассмотрение вопроса будет касаться в основном газово-жидких включений. Однако сделаем все же несколько предварительных замечаний и по включениям магматических расплавов.

Это в первую очередь касается включений вулканического стекла, абсолютно обычных для фенокристаллов эффузивных пород. Однако они встречаются также и в эндоконтактовых зонах интрузивов гипабиссального и неглубокого становления, особенно в силлах и дайках. Такие стекловатые включения, характерные для условий закалочного режима, проявляющихся и на глубине, не являются аномальными и степень их аморфизации говорит лишь о быстром темпе охлаждения и спада давлений. Поэтому к аномальным включениям расплавов в интрузивных породах можно отнести включения, связанные с самыми последними стадиями отвердения этих пород и взаимодействием твердых фаз с остаточными порциями межзерновых расплавов. Такие расплавы обусловливают реакционные каемки вокруг уже образовавшихся минералов, самоконсервируются в этих каемках и микротрещинах кристаллов, отражая собой состав самых поздних расплавов, генерировавших интрузивов (см. фототабл. XVI, *г*).

В этот период при охлаждении магматической среды минералообразования ниже температур 1000° С легколетучие компоненты магмы, и в первую очередь компоненты воды, образуют в условиях высоких давлений молекулярные соединения остаточных жидких очень плотных растворов, еще слабо изученных.

Таблица 13

**Систематика аномальных (специфических) газово-жидких включений (составил Н. П. Ермаков, 1968 г.)**

| Классы | Виды | Разновидности |
|---|---|---|
| I. Сингенетические включения | 1) Пузырьки прилипания | 1) Газовая фаза первично-гетерогенной среды и пузырьки пара кипящих растворов |
| | 2) Полые вакуоли (пустотки) | 2) Поры под отталкивающимися гранью твердыми частицами |
| | | 3) Полости внутренних трещин («блесток»), не достигавшие поверхности росших кристаллов |
| II. Субсингенетические включения | 3) Расчлененные («расшнурованные») | 4) Неравновесные, неравнораспочкованные вакуоли |
| | 4) Перенаполненные («смешанные») | 5) Возрожденные микротрещины повторного приоткрывания |
| | | 6) Каналы пересечения залеченных трещин разного возраста и ориентировки |
| | 5) Неполно нарушенные | 7) Вакуоли с частично удаленной жидкостью по микротрещинам и с ореолом дочерних включений |
| | 6) Взорванные | 8) Разрушенные вакуоли с ореолом дочерних включений |
| III. Эпигенетические включения | 7) Диффузионные | 9) Негерметизированные включения (очень редки). С частичным или полным удалением жидкости сквозь молекулярную решетку минерала |

Поскольку магматические расплавы, кроме компонентов (ионов) воды, содержат также и множество других легколетучих минерализаторов, не входящих в кристаллические решетки интрузивообразующих минералов, обособления минерализаторов в виде газообразных флюидов, особенно при спаде давления, не должны являться редкостью, на что в свое время обратил внимание Ф. К. Шипулин [74]. Вязкая среда расплавов может удерживать газовые пузырьки в себе. Прилипая к граням растущих на глубине пирогенных минералов, они захватываются этими минералами. При изилияниях магм на поверхность пузырьки газов отлично сохраняются в перлитах и обсидианах, обнаруживая заметное содержание ювенильных газов: $N_2$, $CO_2$, CO, He, Ne, Ar, Kr, Xe, $H_2$ и паров молекулярной воды. Отмеченные жидкие и газовые включения сингенетичны или почти сингенетичны содержащим их магматическим породам и могут быть названы *псевдоаномальными* включениями. Такой особый термин приходится употреблять потому, что нормальными для минералов магматических пород являются системы включений затвердевших материнских расплавов, в то время как жидкие и газовые включения представлены лишь остатками или обособившимися частями этих систем. Поэтому классификацию действительно аномальных газово-жидких включений мы пока ограничим только областью пневматолитовых и гидротермальных дериватов магмы, т. е. производными геохимических сред так называемого постмагматического эндогенного минералообразования.

Первая систематика специфических образований газово-жидких включений представлена нами в табл. 13. Как видно из этой таблицы,

не только нормальные, но и аномальные включения отчетливо представлены во всех трех возрастных классах этих микрообъектов природы. Они могут быть *сингенетическими, субсингенетическими* и *эпигенетическими.* Однако количественное их развитие в минералах руд составляет менее 1% от нормальных включений.

Среди *сингенетических аномальных включений* большое познавательное значение имеет первый вид *пузырьков прилипания.* Последние, с одной стороны, свидетельствуют о возможностях минералообразующего действия гетерогенных геохимических сред, а с другой, — дают пищу для рассуждений противникам глубинного пневматолиза. В связи с этим приходится рассмотреть это природное явление в первую очередь и к тому же достаточно детально.

Известно, что многие инертные газы легко растворяются в жидкой водной среде. Под воздействием электростатического поля ионов растворенных газов ослабляется взаимодействие молекул воды друг с другом и обычно снижается температурная критическая точка водного раствора с этими легколетучими компонентами, в первую очередь с наиболее распространенной углекислотой и сильными кислотами.

При снижении термодинамических параметров в минералообразующем водном растворе может возникнуть эмульсия двуокиси углерода. Ее пузырьки в процессе образования тех или иных гидротермальных кристаллов иногда прилипают к былым граням их роста и консервируются в виде включений чистой углекислоты. При этом на гранях былого роста капсюлируются не только эмульсионные пузырьки углекислоты или углеводородов, но и водный раствор, а чаще всего смешанные в разных пропорциях углекисловодные природные системы. При очень нежном нарастании граней кристаллов, но при высоких давлениях в кристаллообразующей среде пузырьки углекислоты могут не только отталкиваться нарастающими кристаллическими слоями граней, но и облекаться ими с образованием включений газов, в данном случае углекислоты. Это первая возможность аномального (специфического) образования эмульсионных газовых включений.

В известной мере сходная ситуация возникает при вскипании гидротермальных растворов, происходящем вследствие резкого спада давлений, например по причине быстрого тектонического приоткрывания растворопроводящих каналов.

В такого рода случаях в жидкой среде на глубине могут возникать пузырьки пара, прилипающие к граням растущих кристаллов, экранирующие микроучастки этих граней от доступа кристаллообразующего вещества, которое в конце концов облекает эти пузырьки.

Совершенно нельзя согласиться с предположением А. Ф. Барабанова [6], что консервируются только газовые пузырьки гетерогенной среды вскипания, а окружающая жидкая гидротермальная среда, обеспечивающая нарастание граней, при этом, якобы, не консервируется. Как было показано ранее на опытах по воспроизведению минералов (соли) в кипящих растворах, в том числе на границе существования жидкой и газовой фазы, ситуация, вроде изображенной им [6, рис. 1], является надуманной и не отвечает реальным фактам.

В кипящей гетерогенной среде гидротермальных растворов в одной и той же зоне роста кристалла или залечивания его трещины мы встречаемся с одновременной консервацией пузырьков газа (пара) и микропорций жидких растворов или тех и других в разных объемных соотношениях.

Чисто газовые обособления в жидкой минералообразующей среде возникают по разному. Они могут быть обособившейся газовой компонентой, связанной с пересыщением ею раствора, могут возникать в результате его химических реакций с породами или представлять собой пузырьки газовых струй, поступивших извне, например, при субмарин-

ном рудообразовании, или, наконец, представлять собой только пузырьки пара, возникшие при резких спадах давлений (вскипание).

Специфичность этого явления, фиксирующегося во включениях, связана с тем, что в гетерогенной минералообразующей среде не может захватываться выборочно только одна из ее частей разного агрегатного состояния, а консервируется в одной и той же зоне роста или залечивающейся трещине и жидкая и газовая фазы.

Весьма любопытным, но редким случаем возникновения мнимогазовых включений являются *полые вакуоли*, которые образуются под отталкивающимися при нарастании граней твердыми частицами. Это бывает в случаях, когда жидкие минералообразующие растворы, действуя энергично в слоистом наращивании граней кристаллов, оказываются не в состоянии проникнуть в нижние полости, экранированные твердыми частицами. Последние играют как бы роль пробки, препятствующей их проникновению. В этом случае полости под твердыми включениями остаются пустыми. Такие полости выглядят темными так же, как и газовые включения, малая плотность заполнения которых обеспечивает рассеяние света, не доходящего до глаза наблюдателя. Однако такие «вакуумные» включения не могут интерпретироваться в качестве газовых включений и конечно являются аномальными.

Если же вначале жидкая минералообразующая фаза все же попала в образующуюся таким образом вакуоль, а затем доступ в нее растворов прекратился, но отталкивание частицы продолжалось, возникает аномальное газово-жидкое включение с незакономерным соотношением фаз.

Иная ситуация получается в случаях, когда в результате напряжений при росте кристаллов внутренние микротрещины не достигают поверхности нарастающих граней. В них тоже возникает неполный вакуум. Из-за суженного плоскостного пространства они при микроскопическом изучении отражают свет, падающий сбоку, и выглядят как «блестки». Такие трещинные полости были бы вместилищем мнимовторичных газово-жидких включений того или иного состава и состояния, если бы достигли взаимодействия с кристаллизующей средой соответствующего момента минералообразования.

Как видно, разъяснение всех тонкостей минералообразования и возникновения включений в паре растущий кристалл — среда оказывается очень трудным из-за многообразия природных явлений кристаллизации.

Среди *субсингенетических специфических включений* можно установить по меньшей мере два случая их аномального возникновения: *расчленение* («расшнурование») и *перенаполнение* вакуолей поздними растворами.

Минералообразующие растворы, проникшие в моменты возникновения трещин, достигших поверхности растущих граней, обеспечили вначале их неравновесное залечивание родственным веществом. Однако при последующем снижении термодинамических параметров с учетом создавшейся микрокристалломорфологии каждого из включений возникала необходимость перекристаллизации изолированных неравновесных полостей этих трещин в энергетически более выгодные вакуоли.

Трещинки в растущих минералах, нарушив нормальные взаимоотношения атомов в кристаллической решетке, определяли места наибольших возмущений в закономерном кристаллообразовании, а последующие изменения уровня термодинамических параметров активно содействовали наиболее рациональному залечиванию «раны» в кристалле. Оставшиеся во включениях каждой уже вначале регенерированной волосной трещины растворы не вели себя пассивно. Они вызывали перекристаллизацию на доступных их воздействию ближайших участках трещины. Возобновление действия уже законсервированных

растворов проявлялось особенно активно при временном повышении температуры. В этих случаях происходила перекристаллизация вещества трещин, вызывавшая образование более равновесных изометрических форм вакуолей. Разделение подвижного вещества, заполняющего пространство трещины, осуществлялось применительно к уже создавшейся первоначальной микрокристалломорфологии вакуолей включений.

Поздняя кристаллизация родственного минералу вещества в пережимах микрополостей могла изолировать друг от друга отдельные части формировавшегося включения, с установлением в них аномальных соотношений фаз (фототабл. XIX, *а*, *б*).

Расчленение («расшнурование») индивидуальных включений растворов не является большой редкостью и их отдельные разъединенные более мелкие по объему части должны рассматриваться как аномальные включения. Например, если разделение таких неравновесных вакуолей происходило в условиях быстро снижающейся температуры, уже возникший газовый пузырек мог остаться в одной части неравнораспочкованного многофазового включения, а раствор и выделившиеся из него минералы-узники — в другой части вакуоли (см. фототабл. XIX).

Другие случаи аномальных субсингенетических, перенаполненных включений бывают связаны с повторной механической реализацией напряжений в теле включающего кристалла. Каждая даже полно залеченная в нем трещина является все же ослабленной зоной, по которой наиболее легко могут произойти повторные разрывы. Если в результате нового приоткрывания они достигнут поверхности растущего кристалла, т. е. области действия минералообразующей среды, последняя заново инъецируется в возрожденную таким образом трещину. При этом растворы первой стадии залечивания микротрещин смешиваются с растворами нового поступления, а плотность тех или других отразит только какой-то средний температурный момент, не отвечающий ни первому, ни второму залечиванию трещины с такими аномальными включениями. Последние могут возникать не только в плоскости повторного приоткрывания при возрождении микротрещины, но и иметь линейное расположение в канале пересечения разновременных субсингенетических трещин, расположенных под углом друг к другу (см. фототабл. XVI, *в* и *г*).

*Эпигенетические аномальные включения* встречаются в природе нередко. Существует много причин, которые содействуют дегерметизации закономерных систем первичных и мнимовторичных включений.

Например, в экзогенных условиях севера естественное промерзание растворов гидротермальных включений и увеличение объема льда по сравнению с замкнутой в вакуолях жидкостью может вызвать при морозах растрескивание (дегерметизацию) их вакуолей. Это особенно характерно для крупных *неполно нарушенных* включений материнских гидротермальных растворов, развитых в кристаллах исландского шпата сибирской платформы.

Иногда встречаются *взорванные включения*, связанные с явлениями их природного перегрева сверх температур гомогенизации под воздействием внедрившихся после образования месторождения новых интрузивных магматических масс. Таким образом, природная декрепитация жидких включений может иметь место и в результате *переохлаждения* и в результате *перегрева* их жидкого заполнения.

В общих случаях возникновение микротрещин, нарушивших вакуоли включений, вызывает внутреннюю инъекцию в эти трещины части ранее законсервированной материнской минералообразующей жидкости и соответственное увеличение в них пузырька газа (пара) вплоть до вторичного возникновения в вакуоли целиком газового заполнения (фототабл. XX, *а*). При определении природы такого аномального

явления приходится учитывать возможности возникновения трещин не только в плоскости препарата, где они могут легко просматриваться, но и под самим включением.

Разрывы по трещинкам, с разбросом в них вещества, заполнявшего то или иное взорванное включение, вызывает в ореолах природной декрепитации образование повторно аномальных, «дочерних», включений с нарушенным соотношением фаз (пузырек пара — жидкость) в отличие от исходного первоначального включения (см. фототабл. XX). Однако чаще всего взорванные включения обнаруживаются в окружающих трещинах по «венчику» отложения в них веществ, в первую очередь гидроокислов железа.

Наконец, в природе существуют кристаллогидраты или минералы с молекулярной кристаллической решеткой, не способные длительное время удерживать во включениях химическую тоже молекулярную среду и растворенные в ней соединения. Это было очень наглядно показано А. В. Лоскутовым [49] на примере натролита из пегматитов Хибин. Газово-жидкие включения с течением времени, после извлечения этого минерала на поверхность, теряли свою жидкость,, проникавшую через кристаллическую решетку наружу, и в конце концов выглядели под микроскопом пустотелыми, такими как газовые включения. Они оказываются заполнены паром и частично воздухом.

Такие *диффузионные* («вытекшие») включения встречаются в очень редких минералах, не обеспечивающих полной герметизации, но их также нужно учитывать и рассматривать только в группе аномальных включений, не пригодных для термодинамических исследований и микрохимических анализов.

Таким образом, разносторонним трудоемким экспериментально-аналитическим исследованиям включений образцов минералообразующих сред должно всегда предшествовать тщательное изучение происхождения включений. Это необходимо и для того, чтобы уяснить их современное и прошлое фазовое состояние, время консервации по отношению к включающему минералу и его парагенезису, а также к нормальной или специфической, особой, группе аномального образования и преобразования.

Мы попытались кратко рассмотреть необходимые предпосылки любого исследования газово-жидких включений и предостеречь начинающих исследователей от возможных заблуждений и неточных интерпретаций результатов трудоемких испытаний этих микрообъектов природы — важного источника информации о процессах пневматолитового и гидротермального минералообразования.

Для этой цели было рассмотрено с разных сторон разнообразие включений минералообразующих геохимических сред, синтез которого представлен в трех классификациях (см. табл. 12, 13, рис. 23). Эти классификации по мере накопления опыта будут еще более усовершенствованы. Однако и при современном их состоянии первейшей обязанностью каждого исследователя включений является нахождение надежного места изучаемым микрообъектам в пределах приведенных классификаций. Это совершенно необходимо для правильной интерпретации результатов экспериментов и для аргументации генетических выводов, базирующихся на разностороннем учете и исследовании включений микрообразцов геохимических сред, герметизированных минеральной природой.

Показанное во втором разделе нашей монографии большое многообразие включений по их составу и фазовому состоянию является закономерным и отражает глубокие генетические различия в средах, процессах и явлениях глубинной минерализации.

Раздел третий

# МЕТОДЫ И ТЕХНИКА ИЗУЧЕНИЯ СИСТЕМ ВКЛЮЧЕНИЙ В СТАТИЧЕСКОМ СОСТОЯНИИ

---

Вот каковы земные недра, вот слои, вот прожилки других материй, кои произвела в глубине натура..., пускай примечают их разное положение, цвет, тягость, пускай употребляют в размышлении совет от математики, от химии и обще от физики.

*М. В. Ломоносов,* 1763

Включения — требуют сейчас самого настойчивого, систематического изучения. Это изучение во многом изменит наши представления об истории природных вод в более глубоких участках земной коры. После работ Сорби прошло 60 лет, и с тех пор мощность нашей научной работы более чем удвоилась. Тот, кто возьмется за эту работу сейчас, имеет перед собой область огромных и важных достижений.

*В. И. Вернадский,* 1933

Часть VI

# МАКРОСКОПИЯ, МИКРОСКОПИЯ И ИНТРОСКОПИЯ МИНЕРАЛОВ И ВКЛЮЧЕНИЙ

## Глава 17

## МАКРОСКОПИЯ ВКЛЮЧАЮЩИХ МИНЕРАЛОВ

Главная трудность кристалломорфологических задач заключается в том, что расшифровка пройденных этапов «жизненного пути» природного кристалла разворачивается как бы в обратную сторону, вспять, исходя из изучения законченной, остановившейся в своем развитии, «омертвевшей кристаллической формы».

*И. И. Шафрановский,* 1957

### *Программа макровизуального изучения включающих кристаллов и их агрегатов*

Исследователи включений микропорций минералообразующих растворов и расплавов, конечно, должны уметь определять включающие минералы и ориентироваться в кристаллографии. Сингенетические особенности строения кристаллов, элементы их внешней и внутренней морфологии, субсингенетические и эпигенетические нарушения их сплошности (дефекты), как было показано в главе 13, позволяют выяснять причины и относительное время образования включений и проводить их генетическую диагностику по классам, видам и разновидностям. Идеальные кристаллы в природе почти отсутствуют, а реальные кристаллы минералов всегда имеют те или иные внешние и внутренние дефекты роста и разрушения кристаллов. Самыми распространенными дефектами роста и регенерации последних являются включения растворов и трещины, чаще всего залеченные. Основы дефектологии промышленных минералов были представлены нами ранее в основном на примере кропотливого изучения пьезооптического кристаллосырья и особенно оптического флюорита [16]. Более детальная классификация дефектов и описание способов их изучения содержатся в обстоятельной работе Д. Б. Гогоберидзе [10]. Учение о формах природных кристаллов в зависимости от внутренней структуры и внешней порождающей их среды, образцы которой консервируются во включениях, было сформулировано И. И. Шафрановским [61], а секторальное строение кристаллов описано Г. Г. Леммлейном [38].

Места отбора минералов гранулоформной и друзовой кристаллизации обязательно документируются с фиксацией их положения в пространстве на планах, разрезах и зарисовках, а в лабораторных условиях они изучаются в определенной последовательности.

Это изучение начинается с макроскопического визуального обозрения и описания образцов минеральных агрегатов или онтографии кристаллов в том виде, в каком они поступили с месторождения. Затем из них выпиливаются (при наличии спайности выкалываются) пластины, полирующиеся с обеих сторон, или изготовляются шлифы, толще обычных в 5 раз и очень редко препараты в виде полированных сфер, применявшихся Г. Дейша [70].

Для относительно крупных ограненных кристаллов пластины изготовляются обычно в двух срезах — перпендикулярном (поперечном)

и продольном, параллельном длинной оси, необходимых для изучения фазового заполнения включений и выяснения ориентировки их в теле кристалла или в зерне минерального агрегата.

Такие пластины позволяют макроскопически, а затем под бинокуляром и микроскопом выяснить внутреннюю морфологию минералов, природу и время образования в них включений по отношению к каждой зоне кристалла или же минерального агрегата в целом, что в предварительном виде позволяет решить задачи, охарактеризованные в предыдущей части книги.

В дальнейшем, после выявления мест развития наиболее отчетливых и характерных семейств включений минералообразующих сред соответствующие участки фиксируются тушью на пластине, из которой затем и выбиваются (или выпиливаются) препараты уже для проведения экспериментальных исследований в специальных приборах (микротермокамера, криокамера и др.).

Таким образом, перед экспериментально-аналитическим разносторонним исследованием образующих минералы геохимических сред требуется пройти три-четыре этапа изучения статического состояния макро- и микрообъектов минеральной природы:

1) полевой геолого-минералогический;

2) камеральный макровизуальный (макроскопия минералов и их агрегатов);

3) минералографический—микрокристалломорфологический (обычная микроскопия стабилизированных включений в проходящем и отраженном свете);

4) физикоскопический — специальная микроскопия включений и их отдельных фаз (люминесценция, инфракрасная и ультразвуковая микроскопия, электронография, рентгеноспектральное зондирование и др.).

Без досконального познания природных объектов в их статическом виде, исходном для ретроспективного генетического исследования, совершенно невозможно восстанавливать их генетику, историю становления в координатах времени и пространстве земной коры.

Именно поэтому перед рассмотрением возможностей таких ретроспективных микротермодинамических испытаний и химико-аналитических анализов объектов включений для выяснения эволюции состава геохимических сред и изменений их физико-химических параметров при былом минералообразовании оказывается необходимым сосредоточить внимание на предварительном изучении состояния микроминеральных объектов в их статическом виде. Указанные первые три этапа изучения (четвертый не всегда нужен) являются обязательными. Методы, техника, способы их изучения частично заимствуются из сопредельных геолого-минералогических и физико-химических наук, они хорошо известны. По первому этапу полевого изучения месторождений каждый может найти необходимые сведения во многих руководствах по полевой геологии, структурам рудных полей и месторождений.

По второму этапу предварительного изучения минеральных индивидов и их агрегатов, связанному с макроскопией минералов и руд, нам представляется нужным привести некоторые рекомендации, поскольку в учебных дисциплинах и научных руководствах макроизучению минеральных объектов природы теперь почему-то уделяется слишком мало внимания.

Обычная и специальная микроскопия на третьем и четвертом этапах предварительного изучения статического состояния включений при обычной температуре являются важными для предмета наших исследований и поэтому также будут кратко охарактеризованы в этой части.

В ходе макроскопического изучения объектов исследования пред-

ставляется необходимым выявить целый ряд их особенностей, рациональная последовательность выяснения которых и объединение их по группам, охватывающим особенности различного генезиса, представлены в схеме.

### СХЕМА МАКРОСКОПИЧЕСКОГО ИЗУЧЕНИЯ ВКЛЮЧАЮЩИХ МИНЕРАЛОВ И ИХ ПАРАГЕНЕЗИСОВ

I. Сингенетические особенности строения

а) *Внешние особенности минералообразования и роста кристаллических индивидов*

1. Величина идиоморфных и ксеноморфных индивидов
2. Облик кристаллов: изометрический, вытянутый, сплюснутый (соотношения размеров в трех направлениях)
3. Габитус ограненных минералов с указанием преобладания простых габитусных форм и комбинаций габитусов в разных генерациях
4. Посадка кристаллов на субстрате или характер контакта их агрегатов с вмещающими породами
5. Парагенетические взаимоотношения минералов в друзах и кристаллически-зернистых агрегатах
6. Структуры и текстуры минеральных скоплений
7. Степень идиоморфизма изучаемых минералов в агрегатах руд и пород
8. Первичная скульптура граней: выпуклые и вогнутые фигуры роста (ступенчатость, штриховка, вицинали и др.)
9. Внешние признаки многоглавого, скелетного и спирального роста граней

б) *Внутренние особенности роста кристаллов*

1. Зональное и секториальное строение кристаллов и фантом-кристаллы (по разной окраске и включениям)
2. Первичные двойники и мозаичность
3. Твердые включения других минералов и присыпки
4. Первичные микровключения растворов и расплавов и явление негативных кристаллов
5. Объемная и зональная замутненность в теле минералов

II. Субсингенетические образования в теле кристаллов

1. Залеченные трещины (вуали), перекрытые в торец зонами последующего нарастания
2. Следы растворения и оплавления внутри кристаллов («колпачки растворения» и др.)
3. Признаки регенерации сколов кристаллов
4. Факты полиморфных превращений (в кварце — «сотовая» трещиноватость)
5. Замутнения «бороды» кристаллов
6. Явления внутриминерализационного замещения в кристаллических агрегатах

III. Эпигенетические дефекты физического и химического разрушения минералов

1. Не залеченные трещины, доходящие до поверхности кристаллов
2. Многоугольники травления и округлость граней
3. Каверны разъедания (глубокая коррозия)
4. Катаклаз и рассланцевание минеральных агрегатов
5. Явления ограниченного метасоматоза (вдоль трещин)

Способы предварительного изучения включающих минералов и их агрегатов по приведенной программе связаны с макровизуальным (с помощью лупы) осмотром и описанием кристаллов и пластин в пучке яркого проходящего и отраженного света, иногда на темном фоне и с применением протравливания для выявления мозаичности и двойниковатости. В качестве примера такого изучения ниже приведено выполненное нами макроописание кристаллов флюорита, относящееся к периоду начальной разработки генетической классификации включений (1942—1948 гг.) и дефектологии кристаллов.

### *Онтография минералов и дефектология кристаллов на примере флюорита*

Под онтографией минеральных индивидов понимается изучение их внутренней и внешней морфологии, что оказывается необходимым для выявления возрастного разнообразия включений в теле каждого кристалла.

Под дефектологией кристаллов [16] мы понимаем раздел прикладной кристаллографии, в котором выявляются все аномальные явления в кристаллах и делается попытка их объяснить или выдвинуть необходимость их объяснения, если оно невозможно на современном уровне наших знаний. Дефектология пьезо- и оптических кристаллов и ряда других технических и драгоценных минералов имеет большое практическое значение, так как многие из аномалий в форме и строении кристаллов, включения минералообразующих растворов и т. п. совпадают и с техническими дефектами различных видов кристаллосырья, нарушающими их кондиционность.

Как нам представляется, в дефектологии кристаллов чрезвычайно важно различать *дефекты сингенетические*, которые мы в дальнейшем будем называть первичными, и *эпигенетические*, вторичные. Первые дают исследователю важные данные, характеризующие процесс кристаллообразования и его особенности для данного минерала, а вторые позволяют судить о тех изменениях, которые претерпевают кристаллы в длительное геологическое время их существования. Возобновление роста после длительного перерыва или регенерация кристаллов, уже пораженных вторичными дефектами, приводят часто к сохранению дефектов или, наоборот, к их почти бесследному уничтожению. В таком случае только с помощью тонких наблюдений оказывается возможным установить целую цепь первичных и вторичных изменений, сменяющих друг друга в длительный период жизни кристаллов.

Переходя к рассмотрению конкретных кристаллов флюорита, следует отметить, что первичные дефекты в свою очередь могут быть подразделены на внешние и внутренние дефекты. К внешним относятся искаженный облик кристаллов, фигуры и впадины роста, ступенчатое строение граней и «прорези». К внутренним дефектам относятся мутность кристаллов и «облачные» включения, окрашенность, включения инородных минеральных тел и зонарность кристаллов, блестчатость, первичные и вторичные газово-жидкие включения, мохообразные и игольчатые трещинки-пустотки и «блестки», шрамы залечивания кристаллов и амебовидные включения.

Дефекты разрушения кристаллов обычно представлены трещиноватостью, фигурами травления и коррозией кристаллов, обусловленной разъеданием растворами их ребер и граней, растворением по плоскостям зональности, вплоть до образования пустотелых форм, разъеданием кристаллов по трещинам спайности, а также изъязвлениями неправильной формы.

*Внешние дефекты роста. Искаженный облик кристаллов флюорита.* Большинство кристаллов оптического флюорита из гидротермальных месторождений встречается обычно в виде довольно правильных кубов, если не с точным соотношением ребер 1 : 1, то во всяком случае очень близким к нему. Однако часто встречаются пластинчатые, уплощенные кристаллы с соотношением ребер 1 : 1 : 0,20 — 0,75; 1 : 1 : 1,25; 1,5 : 1,25 : 1 и 2,5 : 1,5 : 1 — 0,33 или же правильные квадратно-призматические, вытянутые в одном направлении и сросшиеся друг с другом с соотношением ребер 1 : 1 : 1,25 — 0,20. Редко встречающиеся кристаллы сплющенного облика с отношением ребер 1 : 1 : 0,08 или же сильно вытянутые кристаллы с отношением ребер 1 : 1 : 4 — 5 обычно не являются кондиционными по размерам. Причины таких аномальных форм, по-видимому, нужно искать в условиях их питания в процессе роста минералов. Кроме того, в некоторых случаях удается установить «соединение» двух или даже нескольких кристаллов, развивавшихся в одном направлении, и срастание их в один кристалл аномально-вытянутой формы.

*Фигуры и впадины роста.* Рост кристаллов флюорита осуществляется последовательным образованием на их гранях тончайших слоев

вещества, которые в конечные фазы кристаллизации в условиях истощения маточного раствора не нарастают полностью на всей площади граней, поэтому последние имеют в «плане» прямоугольно-фестончатый «руинный» узор. При значительной, до нескольких миллиметров, толщине слоев нарастания на гладких гранях кристаллов иногда образуются прямоугольные впадины, представляющие собой недозаросшие участки граней. Впадины других очертаний наблюдаются как

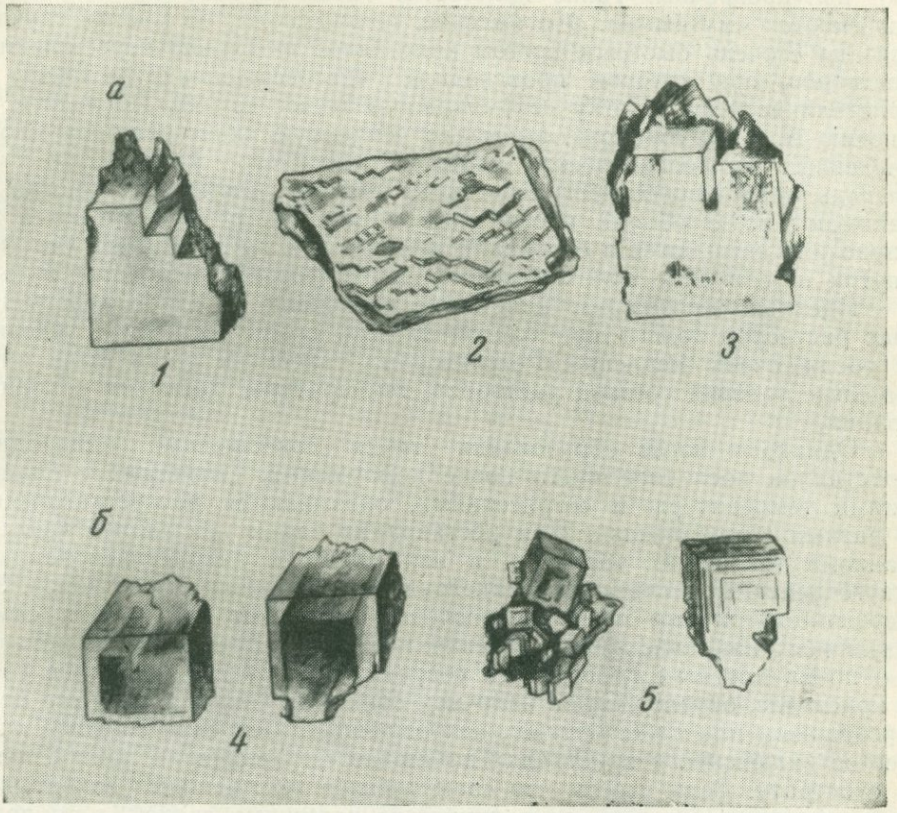



Рис. 35. Дефекты роста кристаллов флюорита. 2/3 натуральной величины (по О. А. Вильконской)

*а* — дефекты внешние: *1* — ступенчатое строение; *2* — ступенчатость; *3* — прорез-«надпил»; *б* — дефекты внутренние: *4* — фантом-кристаллы; *5* — зонарные кристаллы

контактные следы соприкосновения граней соседних кристаллов, на известном этапе препятствовавших нарастанию на изучаемый кристалл новых слоев вещества.

*Ступенчатое строение.* Кристаллы флюорита иногда имеют очень сложные многоступенчатые грани (рис. 35, *2*) или же относительно крупные «ступени» (рис. 35, *1*), которые значительно уменьшают «полезный» объем кристаллов. Такое многоступенчатое строение граней кристалла, по-видимому, можно объяснить зарождением на поверхности грани в последние моменты кристаллизации многочисленных новых зародышей — центров кристаллизации, которым субстрат-грань крупного кристалла придал правильную ориентировку по отношению друг к другу.

*Прорези.* Иногда кристаллы оптического флюорита бывают рассечены на глубину до 1 *см* очень узкой прорезью (см. рис. 35, *3*), происхождение которой связано со своеобразным нарастанием слоев, отсутствовавшим в течение длительного периода образования на месте

этой прорези. Любопытно отметить, что такие прорези в фантом-кристаллах зарастают, но во внешнем кристалле намечается как бы «шов» зарастания с мнимовторичными включениями, доходящий до поверхности наросшей грани нового «облекающего» кристалла (см. рис. 35, *4*).

*Внутренние дефекты роста и регенерации кристаллов. «Мутность» кристаллов и «облачные включения».* Значительное количество извлекаемых из минеральных флюоритовых гнезд кристаллов непрозрачны или полупрозрачны. Такие кристаллы оптических минералов обычно называются «мутными». Это явление, по-видимому, во многих случаях связано с очень быстрым ростом кристаллов из сильно пересыщенных растворов, при котором происходила «несовершенная укладка» в кристаллическую решетку «субмикронов» вещества [62]. Последнее, по мнению А. В. Шубникова, вызывало усиленную «консервацию» многочисленных микроскопических капелек маточного раствора, в свою очередь нарушавших прозрачность кристаллов. Включения иногда не занимают всего объема прозрачного кристалла, а располагаются зонарно или сгущаются в основании кристалла и на локальных участках внутри него в виде облачка неправильной формы («облачная муть»).

Идеально прозрачные кристаллы возникали из слабо пересыщенных растворов только при благоприятных, очень спокойных условиях и росли очень медленно. Регуляторами такого их роста были оптимальные условия состава растворов, температуры, давления и концентрации.

Однако и после образования таких совершенных однородных кристаллов последние часто после деформаций, связанных с колебаниями температуры и сотрясениями, оказываются растрескавшимися в разных направлениях. При реставрации таких кристаллов «залечиванием» тончайших трещинок в них остаются законсервированными многочисленные мельчайшие капельки регенерирующих растворов. Эти первично-вторичные жидкие включения поражают кристалл в самых различных направлениях, пересекая первичные формы роста кристалла, но не достигая поверхности современных граней. Рассеяние света в кристалле, обусловленное наличием этих включений, делает его полупрозрачным или даже мутным, непрозрачным. Особенно большое количество включений в кристаллах наблюдается у места их прикрепления к субстрату. Если учесть, что «замутнение» включениями захватывает здесь кристалл на всю его толщину до наружных граней, в то время как его головка или удаленная от субстрата часть сохраняется прозрачной, вторичный характер такого явления не вызывает сомнений. По-видимому, у места прикрепления кристалл испытывает значительно более резкие изменения термических и динамических условий, возникающие в породе, передающиеся на него и вызывающие наиболее интенсивные напряжения и деформации у его основания, сопровождающиеся здесь наибольшим количеством субсингенетических трещинок, позднее залеченных. Различные волнистые или ровные тончайшие трещинки, располагающиеся в удаленной от места прикрепления части кристалла и содержащие первично-вторичные газово-жидкие включения, обычно соединяются с «подошвой» кристалла. Мутность кристаллов в некоторых случаях обусловливается и захватом при росте из «загрязненного», сильно пересыщенного раствора тончайших пелитовых механических примесей.

*Окрашенность флюорита.* Несмотря на полную прозрачность некоторые кристаллы флюорита часто бывают непригодны для использования в оптической промышленности вследствие густой окрашенности в голубой, изумрудно-зеленый, аквамариновый, вишневый, сиреневый и фиолетовый цвета. В некоторых случаях наблюдается зонарное по октаэдру или кубу распределение окраски кристаллов. О причинах окраски флюорита нет строго доказанных суждений, хотя установлено,

что она не зависит от присутствия хромофоров. Относительно окрашенности флюорита в голубой цвет в литературе существует мнение о зависимости этой окраски от присутствия в кристаллах атомов свободного фтора и кальция. При этом голубой цвет обусловливается атомарным кальцием. Как показали наши микротермометрические исследования [15], в окрашенных флюоритах из Аурахмата наблюдается следующая смена окраски кристаллов по мере падения температуры их образования: густофиолетовая (164—166° С), сиреневая (155° С), зеленая (150° С), розовая (141° С). Та же причина вызывала эволюцию кристаллографической формы кристаллов от октаэдра к кубу и более редким формам (тетрагексаэдр и др.). Наблюдающаяся иногда зонарность по октаэдру в кристаллах кубического габитуса очень наглядно подчеркивает такую эволюцию. При воздействии катодных лучей флюориты любой окраски с поверхности становятся густофиолетовыми, а лучи радия в бесцветном флюорите вызывают голубую и зеленоватую окраску, проникающую внутрь кристаллов. Нагревание вызывает обесцвечивание фиолетового и зеленого флюорита. Изменения в цвете и габитусе флюорита оказываются родственными явлениями и определяются в первую очередь температурными условиями его образования. На кристаллах флюорита установлены также явления пьезохромии. Например, образец зеленого флюорита под воздействием высокого давления изменяет окраску на фиолетовую.

*Включения инородных минералов и зонарность кристаллов.* В оптическом флюорите из некоторых месторождений наблюдаются многочисленные включения мелких кристаллов сульфидов и особенно халькопирита и пирита. Эти сульфиды, кристаллизовавшиеся из раствора параллельно с флюоритом, густо нарастали на бывшие грани кристаллов, обусловливая их зонарное строение. Часто сульфиды беспорядочно рассеяны по всему объему кристаллов, как-будто не подчиняясь какой-либо закономерности. Однако нет никакого сомнения, что в свое время они попадали на бывшие грани флюорита и даже может быть некоторое время росли на них до момента консервации внутри кристалла-хозяина.

Очень редко кристалл оптического флюорита включает мелкие обломки пород (чаще известняк), оказавшиеся внутри кристалла вследствие их падения на его бывшую грань и постепенного обрастания кристаллизующимся веществом. Весьма часто у места прирастания кристаллов внутрь последних вдаются выступы и обломки известняка, а также минералы, образовавшиеся ранее (кварц, барит) и оказавшиеся «поглощенными» флюоритом.

Зонарность, часто наблюдающаяся в кристаллах флюорита, фиксирует собой некоторые периодические изменения в физико-химических условиях действия маточного раствора, влияющие на однородность или химический состав кристалла. Устанавливается несколько причин и типов зонарности, и фантом-кристаллы («кристалл в кристалле») являются одной из ее разновидностей, возникшей в результате перерыва в росте кристалла. Возникновение фантом-кристаллов обусловлено нарастанием на ранее образовавшийся кристалл нового согласно ориентированного кристалла флюорита другой генерации, отличающегося степенью прозрачности или окраской от внутреннего кристалла. Явление зонарности обусловлено или многократным повторением этого процесса, или чаще периодическим усиленным захватом капелек маточного раствора, или отложением на бывших гранях роста инородных веществ, например пелитовых частиц. Эти явления иногда приводят к образованию тончайших, параллельных граням кристалла непрозрачных «фарфоровидных» плоскостей. Иногда кристалл настолько однороден, что зонарность прослеживается в нем только по внутренним трещинкам, наблюдающимся в виде мельчайших «чешуек-зеркалец»,

приуроченных к бывшим граням роста и располагающихся параллельно современным граням. Зонарность позволяет проследить ход развития кристалла и установить важнейшие моменты нарушений в условиях кристаллизации. Сопоставление различных кристаллов из одного и того же гнезда показывает в общем почти полную идентичность развития в них зонарных зон, количество которых, во всяком случае для кристаллов одинакового размера, оказывается выдержанным и достигает нескольких десятков.

*Поры, заполненные жидкостью с пузырьками газа,* — наиболее широко распространенный дефект кристаллов флюорита. Как правило, даже в мельчайших капельках маточного раствора, заполняющих вакуоли в кристалле, наблюдаются мелкие сферические пузырьки газа (пара). Включения жидкости либо приурочены в кристаллах к сети тончайших плоских или волнисто-изгибающихся похожих на паутину залеченных трещинок, или же располагаются ориентированно по плоскостям, параллельным граням октаэдра или куба, или же по трассе роста вершин последнего. Первый тип следует относить к первично-вторичным включениям, а второй — к первичным включениям маточного раствора, капельки которого во время роста кристалла консервировались новыми слоями вещества на гранях, ребрах или вершинах кристаллов. Первичные включения дают возможность определять температуры образования зон кристаллов, а мнимовторичные — температуры, при которых происходило «залечивание» деформированных кристаллов и их дорастание.

В некоторых случаях пузырьки газа во включениях могут служить *«минералогическим ватерпасом».* На рис. 36 изображены двухфазовые газово-жидкие включения. В крупнейшем из них пузырек газа (пара) оказался размещенным в узкой вытянутой части поры. Объем этого пузырька строго пропорционален объему всей вакуоли. При охлаждении кристалла и жидкости возникший вначале маленький пузырек свободно проник через шейку верхней части поры, обращенной кверху. Дальнейшее охлаждение вызвало увеличение пузырька, и он оказался «плененным» в суженной части поры, потеряв обычную подвижность при поворотах кристалла.

Такие пузырьки, встречающиеся часто, указывают не только на положение «потолка» природного резервуара по отношению к кристаллу-хозяину, но и могут быть показателями опрокинутого залегания слоев, вмещающих месторождение, если сложные тектонические перемещения осуществились после процессов минералообразования.

*Мохообразные и игольчатые пустотки и «блестки»* иногда пронизывают внутреннюю часть кристаллов, особенно вблизи места их прикрепления. В отличие от вакуолей включений они в большинстве не заполнены жидкостью (сухие трещинки и пустотки) и часто неправильно разветвляются наподобие мха. Игольчатая пустотка изображена на рис. 36 (черное).

Блестчатость выражена в виде очень мелких чешуевидных «зеркалец трещинок», поражающих внутреннюю часть кристаллов преимущественно в плоскостях, совпадающих с совершенной спайностью или же с зональностью. Этот дефект возник, по-видимому, в связи с какими-то внутренними напряжениями в кристаллах, связанными с изменениями физических условий их существования.

*Следы залечивания и амёбовидные пустотки.* Некоторые кристаллы флюорита были деформированы или расколоты, а позднее регенерировались. Сколотые места подвергались залечиванию при последующей кристаллизации, однако граница их зарастания— «шрам» — обычно остается зафиксированной пустотками неправильных амебовидных очертаний, которые часто оказываются заполненными жидкостью с пузырьками газа. Иногда залечивание и регенерация кристаллов осу-

ществляются материалом другой прозрачности и окраски, и тогда залеченные участки выделяются очень четко в виде «заплат».

*Дефекты разрушения кристаллов. Трещиноватость.* Трещины, проходящие от наружных граней внутрь кристаллов, распространены исключительно широко. Из дефектов вторичного происхождения, возникших в флюорите после его образования, этот дефект, безусловно,

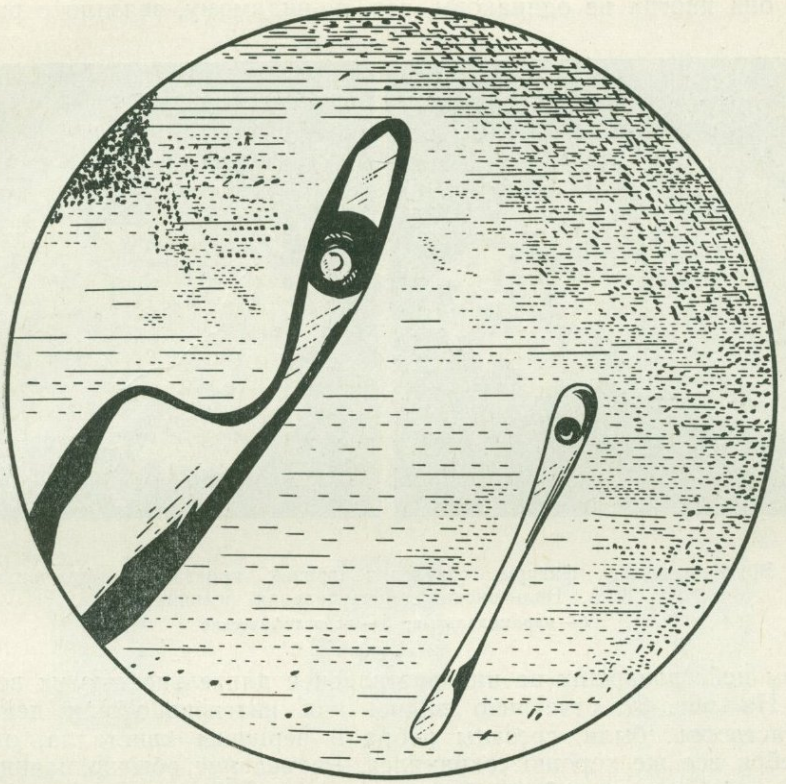


Рис. 36. Двухфазовое жидкое включение-ватерпас в кристалле флюорита. Ув. 60

является главнейшим. Своим происхождением он обязан преимущественно температурным колебаниям и сотрясениям кристаллов во время землетрясений, реже — падению кристаллов на дно природного резервуара и еще реже — тектоническим подвижкам, непосредственно раздробившим кристаллы и друзы в минеральных гнездах. Трещиноватостью наиболее интенсивно поражены кристаллы в верхней зоне месторождений. Проведенными нами горными работами было доказано, что на глубине 10—12 *м* от поверхности трещиноватость в кристаллах значительно уменьшается, это свидетельствует скорее о большой роли внешних факторов в их разрушении.

Флюорит — очень «нежный» минерал. Наблюдения автора над трещиноватостью нескольких кристаллов оптического флюорита, проводимые им в течение семи лет, показали заметное усиление трещиноватости даже в условиях незначительных колебаний комнатной температуры при отсутствии каких-либо механических воздействий на минерал. Трещиноватость развивается от поверхности внутрь кристаллов, главным образом параллельно граням октаэдра, т. е. по плоскостям их спайности. Искусственное нагревание флюорита приводит к

очень интенсивному растрескиванию кристаллов и потере в весе до 0,35% в связи с удалением содержимого жидких включений.

*Фигуры травления.* Грани многих кристаллов оптического флюорита бывают матовыми, шагреневыми, шероховатыми, корродированными, покрытыми мелкими углублениями различной величины и формы. Эти углубления представляют собой фигуры травления, образовавшиеся в результате воздействия на кристаллы гидротермальных растворов и, чаще, вадозных вод, проникших в минеральные гнезда. На месторождениях они иногда не одинаковы, что, по-видимому, связано с разным

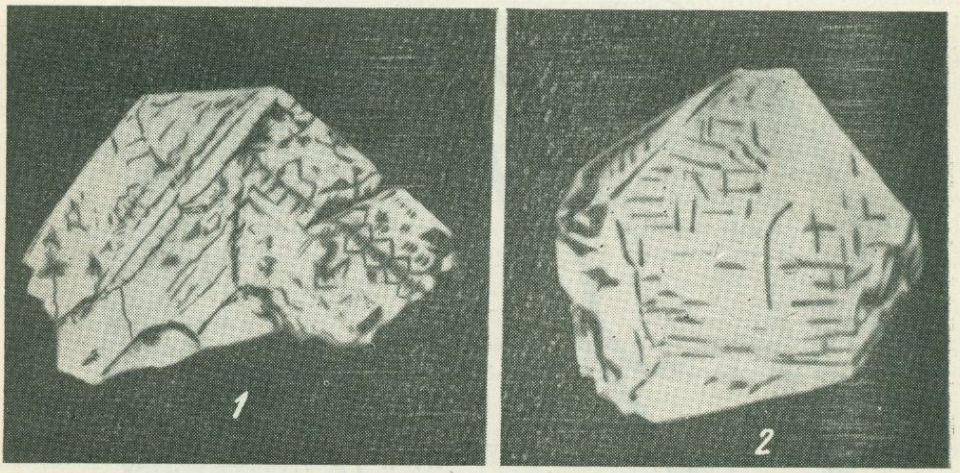



Рис. 37. Эпигенетические фигуры травления граней кристаллов флюорита (по О. А. Вильконской). Натуральная величина
*1* — пирамидальные; *2* — иероглифические

составом действовавших на них растворов и длительностью их воздействия. На рис. 37 отчетливо видно, как интенсивно при действии этих растворов были срезаны ребра и вершины кристалла, однако след ребра все же хорошо сохранился. Разъедание обычно начинается с ребер куба или граней ромбододекаэдра.

Искусственные фигуры травления на флюорите и других минералах были изучены Бекке, протравливавшим грани кристаллов растворами щелочей и кислот. При длительном воздействии щелочей и кислот на гранях возникают различные фигуры травления. Воздействие кислот на гранях куба вызывало образование углублений, сопутствующих обращенным внутрь кристалла четырехгранным пирамидам, которые при дальнейшем протравливании деформировались, становились несколько округлыми и приобретали в вершине дополнительное углубление. При воздействии щелочей возникали просто углубления, образующие шероховатую матовую поверхность. Наши опыты по протравливанию граней кристаллов из месторождения Куликолон в общем подтвердили данные Бекке. Кристаллы из некоторых минеральных гнезд Куликолона носят весьма интенсивные следы воздействия растворов в виде обращенных внутрь кристалла пирамидальных углублений, причем в вершине обращенной пирамиды развивается обычно дополнительное углубление, являющееся признаком их интенсивного воздействия. На рис. 37 изображен кристалл флюорита сиреневой окраски со своеобразными иероглифическими фигурами травления. Скорее всего они возникли в результате протравливания сети трещинок в поверхностном слое кристалла.

*Коррозия кристаллов.* Длительное воздействие растворов на кри-

сталлы вызывает иногда весьма глубокое их разъедание. Оно часто срезает ребра кристаллов или образует глубокие прорези, главным образом по спайности, параллельной граням октаэдра (рис. 38, *4*, *5*, *6*). В зонарных кристаллах наблюдается разъедание их согласно зонарности (см. рис. 38, *1*, *2*, *3*), доводящее до образования как бы скелетных пустотелых форм кристаллов. Иногда по плоскостям зонарности кристаллы флюорита при этом «замещаются» белой глинкой.

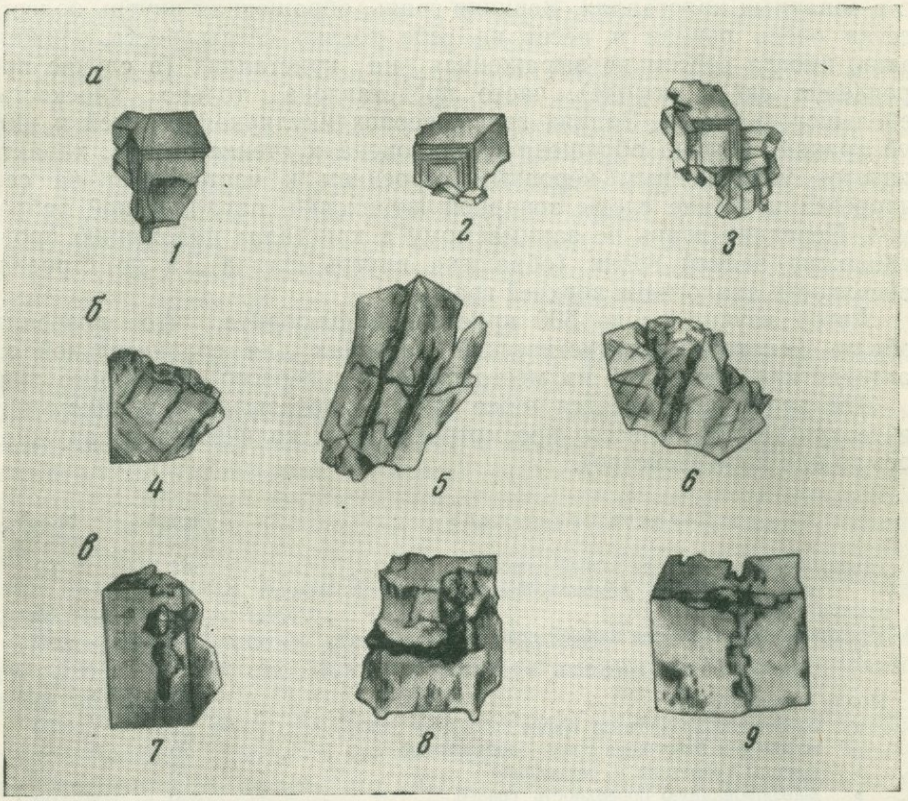



Рис. 38. Внешние вторичные дефекты глубокой коррозии оптического флюорита (по О. А. Вильконской). 1/2 натуральной величины

*а* — разъедание по зонарности; *б* — разъедание по октаэдру; *в* — разъедание неправильное

Наблюдается также значительное количество кристаллов, изъязвленных совершенно неправильными, иногда сквозными кавернами (см. рис. 38, *7*, *8*, *9*), никак не зависящими от спайности или зонарности в кристаллах.

*Сравнение кристаллов флюорита из месторождений различных типов.* В результате изучения ряда гидротермальных месторождений, содержащих прозрачные кристаллы флюорита, автором были выделены два типа этих месторождений: месторождения оптического флюорита и месторождения плавикового шпата с оптическим флюоритом. Первый тип по величине и качеству кристаллов с точки зрения минерального оптического сырья является более важным. Значительное количество кристаллов имело вес от 4 до 11 *кг* каждый. Месторождения второго типа отличаются развитием в общем мелких кристаллов. Последние находятся в минеральных гнездах и погребах в виде одиночных кристаллов, раздельно друг от друга наросших на породе, в виде друз или же, наконец, в виде плотных кристаллических сростков. Кри-

сталлы, найденные в свободном состоянии в диккитовой глинке, часто заполняющей гнезда, очевидно ранее также были наросшими одним из углов куба на потолке пустот. Позднее след прикрепления на них оказался залеченным.

Подавляющее большинство изученных кристаллов флюорита имело четко выраженный кубический и реже призматический габитус. На кристаллах оптического флюорита можно различать грани, характеризующиеся различной скоростью роста, что можно установить только в зонарных кристаллах. Верхняя грань, обращенная внутрь полости, всегда очень ровная и несет на себе только следы роста. Нижняя грань, иногда совсем не выраженная на кристаллах (в случае прикрепления ею к породе), часто представлена только плоскостью небольшого размера. Задняя грань, перпендикулярная верхней и нижней граням, обычно обращена и наклонена к стенке гнезда, характеризуется усложненным неровным строением и часто несет на себе «прорези» и четкие следы зонарной штриховки, параллельной ребрам куба. Передняя грань по занимаемому в кристалле положению противоположна задней грани (обращена внутрь гнезда), а по строению поверхности аналогична верхней грани.

Автор изучил около 500 кристаллов флюорита, что позволило собрать некоторый статистический материал для сравнительной характеристики флюорита из месторождений первого и второго типа. Эти данные приводятся ниже (цифры показывают, в каком проценте кристаллов от всего просмотренного их количества обнаруживалось то или иное свойство).

| Посадка кристаллов | Первый тип, % | Второй тип, % |
|---|---|---|
| 1. Прикреплялись к породе задней гранью | 44 | 52 |
| 2. » к породе комбинированно (задней и нижней гранями вместе) | 36 | 32 |
| 3. Прикреплялись к породе нижней гранью | 20 | 16 |
| **Поверхность граней** | | |
| 4. Имели матовые грани | 46 | 40 |
| 5. » блестящие прозрачные грани | 22 | 30 |
| 6. » матовые и блестящие грани одновременно | 26 | — |
| 7. » фигуры травления и разъедания | 76 | 30 |
| 8. » фарфоровидную поверхность граней | 6 | 30 |
| 9. » прорези | 8 | 28 |
| **Кристаллические включения и зонарность** | | |
| 10. Имели включения сульфидов, ориентированные зонарно | — | 54 |
| 11. » включения сульфидов, четко не ориентированные (в том числе вместе с зонарнорасположенными сульфидами) | 0,2 | 40 |
| 12. Имели зонарное строение (без включений сульфидов) | 26 | — |
| **Жидкие включения** | | |
| 13. Имели первично-вторичные включения, развитые по «паутинным» трещинкам | 28 | 73 |
| 14. Имели первичные включения, ориентированные параллельно граням куба или же в плоскостях, параллельных граням октаэдра (в последнем случае включения первично-вторичные, законсервированные залечиванием трещин спайности) | 42 | 60 |
| **Прочие дефекты** | | |
| 15. Имели мохообразные и игольчатые пустотки | 54 | — |
| 16. » амебовидные включения в регенерированных кристаллах | 22 | — |
| 17. Имели трещиноватость и внутреннюю «блестчатость» | 58 | 81 |

Эти данные показывают, что из внешних дефектов роста в месторождениях второго типа значительное развитие имеют «прорези», редко встречающиеся на кристаллах первого типа. Из внутренних

дефектов первичного происхождения кристаллы месторождений второго типа в отличие от кристаллов месторождений первого типа характеризуются очень широким развитием твердых и жидких включений и зонарным строением. В кристаллах месторождений первого типа при почти абсолютном отсутствии включений сульфидов значительно развиты первичные жидкие включения и особенно первично-вторичные, а также мохообразные и игольчатые трещинки-пустотки. Из вторичных дефектов на месторождениях второго типа особенно широко развита трещиноватость, а в месторождениях первого типа — фигуры травления и разъедание кристаллов.

*Обсуждение результатов.* Природные дефекты кристаллов флюорита и особенно их включения являются вехами для восстановления сложной естественной истории минерала. Как было показано, они фиксируют не только особенности современного строения кристаллов, но и позволяют выяснить некоторые стороны их развития и разрушения. В этом отношении они далеко неравноценны, что связано скорее с невозможностью достаточно обоснованного объяснения некоторых из них. Здесь еще предстоит большая работа, которая несомненно будет иметь значение для понимания образования и преобразования минералов, т. е. их онтогении и филогении.

Наибольшее значение в этом отношении имеют жидкие включения кристаллообразующих и регенерирующих сред.

Природные кристаллы без дефектов являются большой редкостью. Подавляющее большинство их, даже в наиболее совершенных кристаллах оптического флюорита, содержит дефекты в большом количестве. Все это способствует широкому практическому применению предлагаемого метода выявления истории минералов [16], неразрывно сочетающего изучение деталей внешней и внутренней морфологии кристаллов с микровизуальным и экспериментальным исследованием включений породивших их растворов.

Изучение положения кристаллов флюорита в гнездах и погребах показывает, что их посадка на субстрате вмещающих пород является беспорядочной.

При тесном расположении в друзах их рост подчиняется закону геометрического отбора. Строгая зависимость от субстрата и взаимная ориентировка кристаллов наблюдаются лишь в случаях, когда последние нарастают на гранях крупных предков-кристаллов. Это случается после перерывов в минералообразовании между различными генерациями флюорита или же в самом конце этапа его кристаллизации, когда возникают интервалы относительно быстрого падения температуры маточных растворов. В эти этапы грани крупных кристаллов не растут как единое целое, а на них возникает много центров кристаллизации, в которых и осуществляется рост небольших кристаллов флюорита, подчиненных ориентировке главного кристалла. О таком возникновении множества центров кристаллизации в конце процесса минералообразования говорят сложные многоступенчатые грани кристаллов флюорита или бугристые поверхности кристаллического, чаще розового флюорита, после перерыва в минералогенезе облекшего кристалл-предок «коркой» новообразованных кристаллов.

Как показывают крупные «руинные» узоры на поверхности кристаллов оптического флюорита, рост последних осуществляется кристаллизацией тончайших слоев, состав которых мог изменяться во времени. В последний этап роста кристалла они не покрывают всей площади граней, по-видимому, ввиду истощения «строительного материала» в растворе, и образуют своеобразные фигуры и впадины роста. «Прорези» представляют собой след не сомкнувшихся друг с другом частей кристалла, росших длительное время самостоятельно на базе единого кристалла флюорита.

Многочисленные микроскопические и субмикроскопические жидкие включения, первичные и первично-вторичные, объясняют причины «мутности» в кристаллах флюорита, обусловливающие рассеивание света. Располагаясь по бывшим граням роста кристаллов, первичные включения дают возможности выявить эволюцию кристаллографической формы от октаэдра к кубу и далее к редким формам тетрагексаэдра и гексоктаэдра. На кристаллах месторождения Аурахмат наличие зонарной окраски, параллельной граням октаэдра в кристаллах кубического габитуса, подчеркивает тот же порядок эволюции формы. Забегая вперед, отметим, что проведенные нами в 1941—1943 гг. термометрические исследования жидких включений в кристаллах флюорита, кальцита и других минералов показали, что эти изменения формы зависят и от изменений температурного режима маточных растворов в процессе кристаллизации. Только тогда, когда эти изменения ничтожны и кристаллы образуются при температурах ниже 150—160° С, они от начала до конца растут в виде куба. Это впервые было установлено на кристалле флюорита из гнезда № 36 (месторождение Куликолон), где начало кристаллизации и ее окончание характеризуются падением температуры только в несколько градусов [15]. Этими же исследованиями по месторождению Аурахмат было выявлено, что и окраска флюоритов зависит главным образом от температурного фактора. Был установлен следующий порядок смены окраски цветных флюоритов в зависимости от падения температуры образования: темно-фиолетовая, сиреневая, зеленая и розовая. Изменения в окраске флюоритов сопровождаются изменениями кристаллографических форм флюорита.

На Куликолоне и других месторождениях изучение первично-вторичных жидких включений во флюорите показало, что залечивание трещин кристаллов происходило в последние стадии формирования месторождения и в ряде гнезд было одновременным с образованием наружных слоев кристаллов. Температуры образования основной массы кристаллов флюорита оказались близкими к температурам их залечивания, так как сам процесс образования оптических разновидностей флюорита связан с очень мало изменяющимися условиями температуры гидротермальных растворов.

## Глава 18

## ОПТИЧЕСКАЯ МИКРОСКОПИЯ СИСТЕМ ВКЛЮЧЕНИЙ В МИНЕРАЛАХ

### *Макропрепараты для микроскопического изучения включений*

При экспериментальных исследованиях включений микрообразцов минералообразующих сред с целью выяснения физико-химических параметров эндогенного минералообразования каждое из них представляет собой тот микропрепарат, который служит объектом специального исследования, сопоставления полученных результатов с другими аналогичными микрообъектами иного времени образования.

Цели предварительного микроскопического изучения включений в их статическом состоянии требуют использования макропрепаратов, по возможности, наиболее полно характеризующих внутреннюю морфологию кристаллов и взаимоотношения гранулоформных минералов друг с другом.

Как уже отмечалось, наиболее полноценными препаратами для выяснения генезиса и возрастных соотношений включений являются для крупных минеральных индивидов ориентированные относительно кристаллографических элементов пластины, вырезанные перпендикулярно или параллельно длинной оси кристалла. После предварительно-

ного изучения и документации в них положения семейств включений они уменьшаются в размерах до габаритов, умещающихся в рабочем пространстве термо- или криокамеры.

В качестве препаратов для исследования в минералах с хорошей спайностью могут фигурировать пластины-выколки, например для топазов, по пинакоиду. В зависимости от необходимости применения тех или иных методов экспериментального исследования включений в минералах (термометрия, криометрия, декрепитация и др.) макропрепараты из минералов, содержащих включения, могут иметь существенные различия и варьировать от крупных пластин, измеряющихся по площади десятками сантиметров, до зерен с размерами 0,25—1 *мм* и менее. В последнем случае каждое такое зерно-осколок минерала можно также рассматривать как макропрепарат для иммерсионного выявления в нем природных индивидуализированных макропрепаратов-включений минералообразующих растворов и расплавов включений.

Во всех этих случаях при микровизуальном наблюдении и изучении включений в прозрачных минералах следует добиваться оптическими методами (диафрагмирование) максимальной контрастности (четкости различения) между заполнением вакуолей включений и вмещающей твердой средой тела включающего минерала.

Для этой цели макропрепарат часто приходится помещать для увеличения возможностей просмотра его внутреннего строения в искусственную среду — иммерсионную жидкость с наиболее подходящим коэффициентом преломления или же применять для оптически непрозрачных минералов развивающиеся в последние годы специальные физические методы изучения, например инфракрасную и ультразвуковую микроскопию.

Разные методы изучения и исследования включений требуют морфологически разных макропрепаратов, которые в схеме могут быть подразделены на три группы:

1) шлифы стандартной толщины, в которых газово-жидкие включения сохраняются редко;

2) пластины-препараты плоскопараллельные или клиновидные, отполированные с двух сторон и в несколько или десятки раз более толстые, чем шлифы;

3) обломки-препараты не отполированные, разных размеров (вплоть до песчинок).

Шлифы в подавляющем большинстве случаев в процессе изготовления не обеспечивают сохранности микрообъектов, особенно газово-жидких включений. Большинство их при толщине шлифов около 0,03 *мм* вскрывается поверхностью шлифа или же разрывается при перегреве и механических нарушениях в процессе его изготовления. В большой мере из-за широкого использования только очень тонких плоскопараллельных стандартных шлифов для изучения минеральных агрегатов пород и руд газово-жидкие включения длительное время выпадали из объектов исследований.

Осуществленная нами в 40-х годах замена обыкновенных шлифов специальными двусторонне полированными плоскопараллельными пластинами, не наклеенными на стекло, позволила проводить весь комплекс работ по оптическому изучению и экспериментальному исследованию этих микрообъектов.

Толщина таких препаратов-пластин не стандартна и зависит в первую очередь от степени прозрачности исследуемого минерала. Для высокопрозрачных объектов она не лимитируется и может составлять несколько миллиметров (обычно 1—3 *мм*). Для полупрозрачных минералов оптимальная толщина определяется опытным путем в препарате, изготовленном в виде клина, позволяющем выявить (фокусиро-

ванием объектива микроскопа на нижнюю и верхнюю поверхность) оптимальную просматриваемость включений при достаточной для сохранения последних толщине. При этом, кроме степени прозрачности включающего минерала, приходится считаться и с размерами наиболее распространенных в нем включений.

При использовании выколок по спайности в случае их шероховатой поверхности для наиболее удобного визуального изучения включений можно помещать препарат в подходящую по показателю преломления иммерсионную жидкость между двумя стеклами. Это оказывается обязательным при отыскании и изучении включений в мелких обломках минералов (вплоть до песчаной фракции) для контроля декрепитационных данных, при использовании шлихсвзрывного метода поисков [20] или при отборе для химического спектрального анализа фракции, наиболее обогащенной включениями.

Впервые такой способ изучения включений в искусственно раздробленном до долей миллиметра минеральном материале использовал Н. В. Кузнецов [35]. Он отметил, что подходящая по показателю преломления иммерсионная жидкость устраняет все нарушения в ходе луча света, вызванные неровностями поверхности зерен, и рекомендовал проводить изучение на специальном предметном стекле, имеющем углубление. Последнее позволяет создать слой жидкости необходимой толщины для полного погружения обломков минерала и, если жидкость ядовита (растворы Туле, Сушина-Рорбаха), перекрывать ее покровным стеклом, предотвращая испарение. Простота приготовления таких препаратов и возможность работы с мелкими зернами даже малопрозрачных минералов позволяет рекомендовать этот способ предварительного изучения включений в них к практическому применению.

Для визуального микроскопического изучения включений в песчаной фракции минералов (или из рыхлых руд) можно изготавливать и плоскопараллельные препараты, зацементированные в стеклянном колечке расплавленной канифолью, шеллаком, канадским базальмом или холодными растворами смол в бензоле или бензине. Такие препараты приходится обязательно изготавливать, если для поисковых целей и палеогеографических реконструкций приходится иметь дело с кварцевым песком, перенесенным на значительные расстояния, песчинки которого имеют округлую форму и матовую поверхность.

Однако основными препаратами для статического изучения включений и последующего экспериментального их испытания в широком диапазоне искусственных изменений термодинамических параметров служат плоскопараллельные минеральные пластины с двусторонней полировкой, вырезанные из кристаллов и их агрегатов, а также из аморфных минеральных образований.

Получение таких макропрепаратов очень легко обеспечивается разрезанием минералов ультразвуком или с помощью обыкновенных резальных станков, оснащенных круговыми алмазными пилами. Последние имеются во многих шлифовальных мастерских и могут быть легко изготовлены для каждой лаборатории, в которой проводится изучение включений микрообразцов геохимических сред в качестве третьего источника природной генетической информации.

В частности, такая настольная алмазная пила была изготовлена в лаборатории минералообразующих растворов Института геологии и геофизики Сибирского отделения АН СССР в Новосибирске [2].

Вырезанные препараты могут быть отшлифованы на обыкновенном шлифовальном станке или на портативном ручном полировальном станке отечественного производства.

Такой шлифовальный станок представляет собой неподвижную коробку размером 23×23×21 *см*, внутри которой на вертикальной оси, проходящей в центре дна коробки, вращается плоский металлический

диск, приводимый в движение от электромоторчика (1/4—1/2 *л. с.*) или даже от ручного привода. Скорость вращения диска должна достигать примерно 400—7000 *об/мин.* Удобные станки лабораторного и полевого типа выпускались мастерскими Геологического управления Грузинской ССР и Харьковским заводом сельскохозяйственных машин. Такой станок используется на основных стадиях шлифовки, а также для доводки и полировки пластинок из различных минералов. Поэтому он должен иметь несколько легко сменяющихся дисков, в том числе диск, обтянутый биллиардным сукном.

В качестве абразивов для шлифовки нужно использовать корундовые, но только тонкие микрошлифовальные порошки: окись хрома (зеленый крокус), алюминия, железа (красный крокус), пасту ГОИ или для доводки в окончательном виде магнезию, помещаемые на сукно медленно вращающегося диска, на стекло или просто на гладкую доску из мягкого дерева. Фракция шлифовального абразива от 14 до 5 *меш* обеспечивает минимальную глубину механических повреждений под поверхностным слоем препарата, резко сокращая в нем дегерметизацию газово-жидких включений. В обыкновенных шлифах степень дегерметизации, как отмечалось ранее, чрезвычайно велика и достигает 90—100%, за исключением ультрамикровключений, не видимых при увеличениях обычной микроскопии.

Идеальным условием для изготовления и полировки препаратов (почти шлифов), необходимых для полупрозрачных или очень слабопрозрачных минералов, является использование смоляных дисков с покрытием их канифолью и варом по методу М. Л. Эрмана, с применением тонких и тончайших абразивных материалов. В этом случае рекомендуются также автоматические полировальные станки системы Горно-геологического института УФАН СССР, обеспечивающие почти безрельефную полировку поверхностей препаратов минералов с газово-жидкими включениями.

Мы попытались дать лишь в общей форме рекомендации по изготовлению макропрепаратов, необходимых для предварительного визуального изучения, а затем экспериментального исследования включений в минералах, которые позднее будут несколько уточнены применительно к тем или иным методам исследований.

### *Оптические способы визуального изучения и распознавание природы включений*

Размеры включений минералообразующих сред в значительной мере зависят от размеров включающих кристаллов. В гигантских кристаллах морионов с Волыни, имеющих вес в несколько тонн каждый (до 10 *т*), встречались заполненные раствором вакуоли включений объемом в первые сотни кубических сантиметров. Здесь нередко встречаются включения с объемом от нескольких кубических миллиметров до 0,5 *см*$^3$. Включения такой же величины часто встречаются и в крупных кристаллах исландского шпата траппов Сибирской платформы. Такие включения легко устанавливаются невооруженным глазом и их предварительное макроскопическое изучение предусмотрено приведенной выше программой.

Однако в подавляющем большинстве случаев включения имеют микроскопические и субмикроскопические размеры от тысячных до десятых долей миллиметра.

Для их изучения пригодны самые простые биологические микроскопы и даже бинокулярные лупы, однако лучше использовать поляризационный микроскоп, совершенно необходимый для случаев развития многофазовых включений растворов и расплавов в минералах.

Наиболее обычными увеличениями в первоначальной стадии микроскопии включений являются 45-, 90-, 135-, 180- и реже 270-кратные. Сменой объективов и окуляров достигаются разные степени оптимальных увеличений от малых к большим (вплоть до 3200-кратного на микроскопе МБИ-6).

Основные задачи изучения включений в статическом состоянии при обычной температуре (20° С) сформулированы в предыдущем разделе работы. Это в первую очередь выяснение и по возможности точное измерение объемных соотношений фаз в заполнении включений при комнатной температуре и затем выяснение относительного возраста семейств этих включений, исходя из их расположения применительно к элементам внутренней первичной морфологии кристаллов, а также ее нарушений, происшедших в процессе роста.

Кроме того, на этой стадии необходимо выяснить количество и размеры первичных, мнимовторичных и вторичных включений и провести наблюдения за их индивидуальными особенностями. К ним, например, относятся микрокристалломорфология вакуолей включений и в первую очередь внутренний ультрамикрорельеф их стенок, наличие или отсутствие «ободка» родственного вещества, выделившегося из микропорций растворов и расплавов в процессе их охлаждения, и его «каймы», возникшей еще до замыкания вакуолей [17].

Одной из очень важных задач предварительного микроизучения включений является обособление среди них нормальных семейств аномальных видов и разновидностей (см. табл. 12 и 13), обычно резко бросающихся в глаза своим несоответствием с основной массой включений, наблюдающихся в теле минерала. Важными критериями при этом являются наблюдения и измерения фазовых соотношений в семействах сингенетических и субсингенетических включений и признаки эпигенетических нарушений их вакуолей (нарушение герметичности).

При некотором навыке единичные аномальные включения и даже их семейства, количественно составляющие в общей массе нормальных включений обычно не более 1%, легко опознаются и исключаются как непригодные микрообъекты для экспериментальных и микроаналитических исследований. Желательна их фотодокументация, особенно на фоне массы нормальных включений.

В обычной микроскопии включений для их визуального изучения и фотографирования в двусторонне полированных препаратах-пластинах чаще всего используется проходящий свет в светлом поле при прямом и редко косом освещении. Для затвердевших и многофазовых газово-жидких включений наблюдения проводятся в поляризованном свете, дающем возможность ориентации в разных оптических свойствах минералов-узников. Для некоторых случаев, необходимых для четкого наблюдения тонких элементов внутреннего строения кристаллов и вакуолей включений, Г. Дейша [71] первым применил освещение в черном поле, обеспечивающее вследствие явлений полного отражения, очень яркие изображения наблюдаемых микрообъектов. Такие наблюдения могут быть импровизированы на любом микроскопе путем децентрировки системы конденсора и использования диафрагмы.

Для повышения контрастности при изучении фазовых соотношений в заполнении включений и ультрамикрорельефа стенок их вакуолей используются и фазово-контрастные устройства. Для округло-объемных газово-жидких включений Э. Ингерсон [73] рекомендовал наблюдения в отраженном свете с помощью опак-иллюминатора.

В крупных пластинах первые наблюдения за включениями удобно проводить под стереомикроскопом МБС-1 при обычном освещении для ориентации в объемном распределении включений в теле кристалла.

Все эти возможности комплексного оптического изучения включений наиболее полно обеспечиваются микроскопом МБИ 6, исполь-

зующимся в микротермометрической лаборатории МГУ. Этот универсальный исследовательский биологический микроскоп МБИ-6 предназначается для визуального изучения, измерения, фотографирования микрообъектов в проходящем свете в светлом поле при прямом и косом освещении в темном поле, а также в отраженном свете в светлом и темном полях и в поляризованных лучах. Увеличение этого микроскопа при визуальном наблюдении до 2375$^{x}$.

Большим достоинством микроскопа является его осветительная система, дающая мощный и ровный свет, обеспечивающий даже при максимальных увеличениях нормальную освещенность объекта.

Большой выбор объективов для проходящего света, фазового контраста и отраженного света, а также окуляров для визуального наблюдения и измерения обеспечивает все необходимые способы наблюдений и широкое разнообразие увеличений при изучении и микрофотографировании включений в минералах.

К микроскопу придаются три съемных предметных столика: с крестообразным движением, скользящий и специальный столик для объектов с большими габаритами, включая микротермокамеру или криокамеру.

Микроскоп снабжен двумя фотоприставками: узкопленочной 24××36 *мм* с фотоаппаратом «Зоркий-4» и широкоформатной 9×12 *см*. Обе они обеспечивают получение высококачественных фотоснимков и при надобности непрерывное наблюдение за микрообъектом во время съемок на пленку.

Наличие детальной инструкции к пользованию этим универсальным микроскопом позволяет не останавливаться на его устройстве и методике работы с ним. При работе с любыми другими микроскопами, из которых удобным является МИН-8, также нужно учитывать все их возможности и использовать общие руководства по кристаллооптике и иммерсионному методу (В. Б. Татарский, С. Д. Четвериков), по минерографическим методам лабораторного исследования руд (С. А. Вахромеев, С. А. Юшко) и по микроскопической петрографии магматических пород.

Большую роль при этом играет изобразительная документация изучаемых микрообъектов в виде микрофотографий, точных и схематических зарисовок.

Методы минералогического микрофотографирования также освещены в ряде руководств. Качество фотографий включений зависит от подбора наиболее удачных объектов и надлежащей оптики (объективы-апохроматы), равномерности освещения, рационального использования диафрагм и светофильтров, опытного определения правильной экспозиции и практического навыка.

При отсутствии специальной микрофотонасадки к микроскопу (МФ-1 и др.) используются зеркальные узкопленочные фотоаппараты или для съемки на пластинки фотоаппараты с мехами (9×12 *мм*). Во всех случаях необходимо не забывать определений истинного размера включений с помощью окуляр-микрометра или объект-микрометра.

Полученные отпечатки включений могут быть, по предложению А. Н. Заварицкого, превращены в рисованные изображения путем тщательной обводки контуров тушью и графической ретуши, обеспечивающей подчеркивание наиболее важных деталей микропрепарата с сохранением необходимой точности. Это осуществляется с отпечатками включений на матовой фотобумаге с последующим отбеливанием в растворе красной кровяной соли и гипосульфита натрия.

При отсутствии условий для микрофотографирования можно осуществлять точные зарисовки включений с помощью рисовальных окуляров, аппарата Аббе РА-1 или же проекционно-рисовального устройства ФМН-2.

В микротермобарометрической лаборатории кафедры полезных ископаемых МГУ успешно используется для демонстрации и зарисовок включений на круглом экране из матового стекла (диаметр 20 *см*) так называемый хлопковый микроскоп отечественного производства.

Наконец, при наблюдении и описании микрообъектов часто требуется делать схематические зарисовки в журналах наблюдений взаимного расположения включений в изучаемых макропрепаратах и графические изображения индивидуальных микропрепаратов типичных включений с ориентировочным отображением фазовых соотношений, их морфологических форм и других особенностей заполнения вакуолей.

Все эти процедуры предварительного изучения включений минералообразующих растворов и расплавов существенно облегчаются при умелом использовании всех возможностей микроскопа, являющегося основным прибором на этой стадии ознакомления со статическими микрообъектами при комнатной температуре.

Отмеченные возможности микроскопа МБИ-6 иллюстрируют широкий диапазон вариаций для обеспечения оптимальных условий наблюдения и изучения включений. При отсутствии такого совершенного микроскопа с помощью ряда доступных дополнительных приспособлений к обычному поляризационному микроскопу практически возможно получать оптимальные условия для визуального изучения включений.

К сожалению, специальные микрокристаллооптические работы по усовершенствованию наблюдений над включениями под микроскопом и с дополнительными приборами статического изучения минерального вещества очень редки.

К ним в Советском Союзе относятся лишь работы В. Г. Фекличева [54, 55, 58], практически интересные результаты которых мы приведем здесь в сжатом изложении. Для работы в проходящем свете им рекомендуется способ понижения внутреннего микрорельефа округло-объемных вакуолей включений (в анизотропных кристаллах), затрудняющих наблюдения за их фазовым заполнением. Такой рельеф возникает иногда из-за большой разницы в показателях преломления содержимого включений и твердой иммерсионной среды кристалла, изменяющей показатель преломления в поляризованном свете с изменением ориентировки препарата. Если один из главных показателей преломления его вещества ближе к показателю преломления основного содержимого включения, то именно его нужно использовать путем соответствующей ориентации микропрепарата. В минералах с большим двойным лучепреломлением (например карбонаты) происходит раздвоение изображения граничных фаз и возникающая от этого расплывчатость изображений, особенно мешает микрофотодокументации. Применение поляризатора и в этом случае оказывается очень полезным.

При использовании иммерсионных жидкостей для снятия внешнего рельефа анизотропных макропрепаратов нужно для наилучшего эффекта просматриваемости включений выбрать эту жидкость применительно к показателю преломления одного из двух положений угасания. Наиболее интересным у В. Г. Фекличева [55, 58] является метод черно-белого и цветного оптического окрашивания газово-жидких микровключений в нормально падающем отраженном свете. Им было установлено, что в таком окрашивании включений участвуют явления полного внутреннего отражения и интерференции в тонком слое, возникающие из-за разницы в показателях преломления фаз заполнения и разницы в расстояниях между стенками включения. По его опытам, наиболее отчетливое черно-белое изображение, а на включениях микроскопической величины — цветное изображение возникают, когда

аппертура падающих на включения лучей минимальна, а аппертура лучей, поступающих обратно в объектив, максимальна. Это достигается применением объективов большой аппертуры и сильным затягиванием диафрагмы на опак-иллюминаторе. Метод оптического окрашивания оказался наиболее эффективным при изучении газово-жидких включений очень малого размера и при выявлении распределения газово-жидких включений в телах кристаллов.

В связи с тем, что практически невозможно представить весь комплекс наиболее рациональных микроскопических способов для каждого случая изучения включений мы вынуждены ограничиться некоторыми рекомендациями лишь применительно к разным классам и видам микрообъектов.

Включения магматических расплавов по существу подлежат нормальному петрографическому изучению минерального состава при очень больших увеличениях микроскопа с учетом флюидных обособлений, которым некуда было улетучиться.

Нормальная петрографическая методика может быть применена и для статического изучения минерального состава твердых фаз включений с учетом всех возможных для применения способов их диагностики.

Без изменения под микроскопом термодинамических параметров современного существования включений остаточных расплавов-растворов (характерных для минералов щелочных интрузивов) оказывается очень затруднительным отличать их от обычных газово-жидких включений. Только высокие (более 700—800° С) температуры гомогенизации, но не визуальные наблюдения таких жидких магмо-флюидов позволяют выяснить их истинную натуру. К сожалению, такие случаи не единичны.

У исследователей включений в минералах иногда возникают трудности при различении двухфазовых включений стекла от включений водных растворов, а последних — от включений углекислоты и сложных включений двух не смешивающихся жидкостей. Поэтому представляется необходимым отметить признаки и способы микроскопического различения видов этих включений, выявленные на основании личного опыта, опыта наших аспирантов и литературных данных.

Основная масса стекла в затвердевших включениях в жидком виде являлась растворителем для ряда минеральных компонентов, играя в капле капсюлированного магматического расплава ту же роль, что и водный раствор в жидких включениях. Как уже отмечалось ранее, при относительно медленном охлаждении такой капли расплава из нее успевают иногда выделиться растворенные компоненты в виде обособленных кристаллических фаз — минералов-«узников», т. е. возникают такие же многофазовые включения, какие образуются и в результате охлаждения насыщенных многокомпонентных водных растворов. В большинстве включений стекла присутствуют и сферические газовые пузырьки, а стекло так же свободно, как и водный раствор под микроскопом в проходящем свете, пропускает световые лучи. Таким образом, включения стекла и водных растворов, изотропные под микроскопом, внешне действительно могут быть очень сходными между собой.

Естественно, что каждый исследователь в первую очередь должен предположить, какие первичные включения могут встретиться в данном минерале, если геологическая позиция его известна. Если последний получен из пневматолитового или гидротермального месторождения, в кристалле нельзя предполагать наличия включений стекла и, наоборот, если изучается фенокристалл из эффузивных пород, могут присутствовать и обычно присутствуют первичные включения вулканического стекла. Однако в последнем случае, если порода претерпевала гидротермальный метаморфизм, в фенокристалле вместе с первичными

включениями стекла могут быть и вторичные включения жидких водных растворов.

Прогноз ожидаемых включений, ныне возможный на основании опыта их исследования, однако, не может иметь места для случаев, если минерал изучается в виде обломков осадочных пород или как компонент легкой фракции шлиха. В этом случае никакие предварительные предположения не должны иметь места.

Характерные признаки, позволяющие отличать под микроскопом включения водных растворов от включений вулканического стекла, мы свели в табл. 14.

Таблица 14

**Диагностические признаки включений стекла и водных растворов**

| Включения водных растворов | Включения вулканического стекла |
|---|---|
| Характерны округлые или полиэдрические очертания включений | Чаще характерны ограненные и зигзагообразные контуры с клинообразными заострениями и отходящими из концов трещинками расклинивания |
| Краевые границы включений в проходящем свете обычно относительно широкие и темные благодаря большой разнице в коэффициенте преломления минерала и заполняющей жидкости | Ограничения включений с вмещающим минералом обычно узкие, деликатные благодаря близости коэффициентов преломления минерала и стекла |
| В объемных включениях широкое их окамление сходно с окаймлением газового пузырька | Такие тонкие границы не гармонируют с большой затемненностью газового пузырька, его широким темным окаймлением и небольшим светлым рефлексом посередине |
| Газовый пузырек только один и обычно резко оконтурен, имея округлые ограничения. Он помещается в центре или во всяком случае в утолщенной срединной части включения | В одном и том же включении иногда встречается несколько или даже много газовых пузырьков менее резко очерченных. Некоторые из них как бы прижаты стеклом к стене включения (находятся в стороне) |
| Наблюдается непроизвольное движение небольшого газового пузырька, если он не зажат стенками включения. Повороты препарата и толчки вызывают его перемещение внутри включения | Газовые пузырьки неподвижны и представляются как бы окоченевшими, не изменяющими своего положения при поворотах препарата |
| Водный раствор включений бесцветен и прозрачен | Окраска включений вулканического стекла в общем сходна с окраской основной массы породы, вмещающей фенокристалл, и может быть желтоватой, зеленоватой и темноцветной |
| Срез шлифа или пришлифовки, прошедший через включение, приводит к вытеканию жидкости и исчезновению газового пузырька. Включение темнеет или, если оно вскрыто наполовину, становится почти не заметным | Срез шлифа через включение не приводит к исчезновению газового пузырька, впадина на месте которого, заполняясь канадским бальзамом, представляется в виде нежно окаймленного диска, у которого отсутствует световой рефлекс |
| Нагревание препарата вызывает заметное уменьшение газового пузырька вплоть до его полного исчезновения | Даже сильное нагревание препарата (до 700° С) не вызывает заметного изменения в объеме газовых пузырьков |

Перечисленные в табл. 14 диагностические признаки уже после небольшого навыка легко позволяют отличать включения водных растворов от включений вулканического стекла в минералах.

Двухфазовые объемные включения газов содержат очень большой (более 50% объема включения) темный газовый пузырек (см. фототабл. VI, *а*, *б*) и легко отличаются от жидких включений водных растворов, обычно содержащих относительно небольшой (меньше 40—50% объема) сферический пузырек газа со светлым полем или световым рефлексом в виде точки посередине (см. фототабл. IX, *г*).

Если двухфазовые включения газа сильно уплощены и имеют параллельные стенки (верхнюю и нижнюю), свет проходит через газ без рассеяния. Газовый пузырек в этом случае под микроскопом отличается от жидкости только по выгнутости мениска (фазовой границы) в сторону жидкой фазы (см. фототабл. XXI, *а*, *б*). Объемные включения «сухих» газов под микроскопом в проходящем свете почти целиком темные или при некотором уплощении вмещающей породы имеют широкий темный контур со светлым пятном внутри (см. фототабл. XXI, *г*). Вследствие очень малой силы преломления газа по сравнению с вмещающим веществом кристалла существенно газовые включения в отраженном свете ярко блестят (светятся). Использование концентрированного пучка света, например от короткофокусной линзы Лазо, и применение синего светофильтра облегчают выявление фазовой границы с небольшим конденсатом жидкости, концентрирующейся в концах вакуолей включений. Наличие аэрозолей во включениях фиксируется замутнением стенок вакуолей и появлением синеретического узора трещиноватости осевшей на них пленки геля (встречаются очень редко, см. фототабл. VIII).

Лишь изредка бывают трудности при различении газовых включений и включений водных растворов. В ограненных вакуолях последних плоскости иногда бывают наклонены под такими углами к линии наблюдения, что полностью или в большой мере отражают проходящий свет. Включения наподобие включений «сухих» газов представляются сильно затемненными. Газовый пузырек в них поэтому становится трудно различимым и в этом случае требуются использование отраженного света и соответствующий наклон препарата для выявления истинной природы заполнения включения. Этому помогают диафрагмирование и также изучение включения с использованием фазово-контрастных устройств, облегчающих обнаружение фазовых границ между газовым пузырьком, жидкостью и твердыми фазами минералов-узников, если таковые имеются.

При исследованиях необходимо свободно отличать двухфазовые включения углекислоты от таких же включений водных растворов. Это тем более важно потому, что те и другие встречаются иногда вместе в одном и том же кристалле и внешне бывают очень похожими друг на друга. В сообществах этих включений включения углекислоты наиболее точно различаются слабым нагреванием (до 30—31° С). Даже прикосновение пальца к препарату, приближение к нему горящей папиросы, включение конденсора или теплота от настольной лампы вызывают быстрое уменьшение или полное исчезновение жидкой фазы. В то же время такое небольшое нагревание не отражается на включениях водных растворов и они сохраняют при этом свой прежний вид.

Сложные водно-углекислые включения не смешивающихся жидкостей (водный раствор — жидкая углекислота — газ) имеют как бы *двойной* газовый пузырек. Водный раствор занимает периферическую часть вакуолей, а жидкая и газообразная углекислота — среднюю часть включения.

Получается иллюзия того, что два пузырька оказались как бы вставлены один в другой («кокардовые включения»). Иногда в таких включениях наблюдается и четвертая твердая фаза в виде кристаллика, расположенного внутри водного раствора (см. фототабл. XII).

Объемные отношения фаз в сообществах подобных сложных включений обычно сильно изменчивы.

Двухфазовые включения горючих нефтеподобных веществ (углеводородов), встречающиеся иногда в кристаллах вместе с жидкими

включениями водных растворов и углекислоты, легко отличаются от них в проходящем свете благодаря своей желтой окраске и еще легче под люминисцентным микроскопом МЛ-2.

### *Микрокристалломорфология вакуолей включений и измерение соотношений фаз*

*Размеры и количество включений.* При изучении прозрачных и полупрозрачных минералов под микроскопом легко установить, что чем большим увеличением пользуются, тем большее количество включений можно обнаружить. Все так называемые «мутные» кристаллы особенно густо насыщены первичными, мнимовторичными и вторичными включениями. В кристаллах водянопрозрачных и нетрещиноватых включения материнских растворов немногочисленны.

Включения по величине удобнее всего подразделять на три группы: *макроскопические, микроскопические и субмикроскопические.* Первые хорошо различаются невооруженным глазом и имеют размеры от 0,5 *мм* до нескольких миллиметров или даже сантиметров, размер вторых от десятых до сотых долей миллиметра, а третьи измеряются микронами и даже долями микрона.

Макроскопические жидкие включения в кристаллах уникально крупных размеров были описаны еще в прошлом веке. Так, Дэви (1822 г.) наблюдал полости с жидкостью в горном хрустале из Дофине, имеющие размеры до 1 *см* в поперечнике, Брюстер (1827 г.) в синем топазе установил правильно ограниченные полости многофазовых включений до 0,86 *см* в длину, В. Хидден (1881 г.) описал в кристаллах кварца из Каролины каверны с жидкостью, имеющие размеры до 6,2 *см* в длину и до 0,64 *см* в ширину. А. П. Карпинским (1880 г.) изучались включения углекислоты в аметистах с Урала, имеющие размеры до 2,55 *мм* в длину.

В кристаллах флюорита из Куликолона нами (1943 г.) были установлены округлые двухфазовые включения жидких водных растворов до 2 *мм* в диаметре, а в морионах Волыни более 5 *мм* в длину, в которых при поворотах кристалла даже невооруженным глазом можно было наблюдать перемещение газового пузырька в жидком водном растворе включения. А. И. Захарченко [24] в кристаллах с Памира удалось обнаружить уникальные по размерам первичные жидкие включения, объем которых достигал 1,5 $см^3$. Одно из включений занимало около 40% объема скелетного кристалла, который выглядел как бы пустотелым. Газовые пузырьки в таких включениях достигали 4 *мм* в диаметре (рис. 39). Однако наиболее крупные из всех известных включений были обнаружены в кристаллах-гигантах морионов из пегматитов Волыни. По Л. А. Приказчикову [46], их полости имели до 20 *см* в длину и до 7 *см* в поперечнике.

Совершенно обычными в минералах являются газово-жидкие включения от сотых до тысячных долей миллиметра. При этом даже во включениях размером 0,0003×0,001 *мм* еще можно при больших увеличениях микроскопа различать газовый пузырек. Такие включения иногда наблюдаются в огромных количествах. В жильном и молочно-белом ограненном кварце субмикроскопические включения, являющиеся главной причиной белого цвета минерала, по мнению Г. Сорби, находятся в количестве до 5—6 млн. на 1 $мм^3$. В кварце гидротермально измененных гранитов Саксонии Г. Фогельзанг [92] насчитал более сотни тысяч включений в 1 $мм^3$. Количество включений в 1% от объема образца встречается нередко, а в непрозрачном белом кварце они могут исчисляться цифрой порядка $10^8$—$10^9$ на 1 $см^3$. Насыщение минералов включениями в одной и той же жиле может колебаться

в пределах нескольких порядков. Уже при увеличениях в 1800 раз различается бесчисленное количество субмикроскопических включений в виде мельчайших точек, а электронный микроскоп методом реплик еще более расширяет возможности выявления следов субмикроскопических вакуолей, имеющих размеры до $2 \times 10^{-5}$ *мм*.

Форма всех этих капсюлированных мельчайших капелек растворов, как будет показано ниже, чрезвычайно разнообразна, но газовые пузырьки объемных двухфазовых включений обычно имеют форму шара. В уплощенных включениях они сплюснуты и свет проходит через них почти без рассеяния (фототабл. XXI).

*Причины разнообразия форм вакуолей включений.* Современная форма вакуолей включений, наблюдаемая под микроскопом, не является изначально образовавшейся, а представляет собой окончательный результат процесса установления равновесия между включенным материнским раствором и кристаллом-хозяином. Причудливая, с большой удельной поверхностью форма включений не устойчива и вакуоль включения при неизменном объеме капсюлированного раствора стремится приобрести форму, обладающую наименьшей поверхностной энергией. Вещество в нем переносится с выступов на входящие углы. Форма включения становится округлой, а при достижении полного равновесия может превратиться в негативный кристалл.

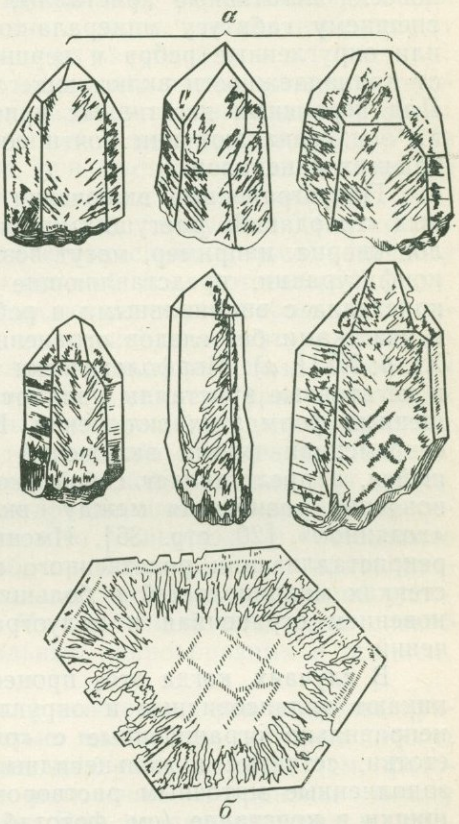



Рис. 39. Газово-жидкие включения скелетного роста в кварцах Памира (по А. И. Захарченко)
*а* — кристаллы; *б* — разрез кристалла

Разнообразие форм включений, таким образом, зависит не только от различных способов их возникновения и времени образования по отношению к вмещающим кристаллам, но и от термодинамических условий их последующего существования. Среди последних решающее значение имеют темп и величина снижения температуры до обычных условий и степень равномерности этого спада в большем или меньшем температурном диапазоне, вызывающем изменения в концентрациях замкнутых растворов.

Временные подъемы температур существования минералов и их спады особенно активизируют процессы преобразования вакуолей, заполненных жидкими или газообразными растворами, взаимодействующими с окружающей твердой фазой минерала-хозяина. Трансформация форм вакуолей, иногда вплоть до их расчленения, происходит за счет избытка поверхностной энергии. Снижения температуры вызывают раскристаллизацию стенок микрополостей за счет оказавшегося в избытке родственного вещества в капсюлированных растворах. Ее повышения могут приводить к временному растворению вещества, а затем к новой его кристаллизации на стенках вакуолей. Таким образом, с момента замыкания каждое включение начинает в известной

мере самостоятельное существование, самопроизвольно стремясь к наиболее равновесной форме, обладающей наименьшей поверхностной энергией (см. фототабл. V, *в*; VI, *а*; IX, *г*).

По форме поры, вмещающие жидкие включения, мы подразделили на три большие группы [17]: *ограненные, полуограненные и неограненные.*

Ограненные вакуоли представляют собой достигшие полного равновесия негативные кристаллы, форма которых в общем отвечает внешнему габитусу минерала-хозяина, но часто имеет притупленные или округленные ребра и вершины. Разнообразие их формы зависит от принадлежности включающего кристалла к той или иной сингонии. Для первичных негативных кристаллов, особенно в кварце, длинные их оси совпадают или почти совпадают с ориентировкой осей включающих минералов.

Полуограненные включения чаще возникают в условиях временных «голоданий» растущих кристаллов. При каркасном росте кристаллов кварца, например, могут возникать первичные включения сложной конфигурации, представляющие собой комбинации основных граней кристалла с вициналными и ребристыми фигурами, комбинированные с участками без следов ограничения (см. фототабл. V, *г*; VII, *б*; IX, *а*; XI, *б*; XXII, *а*). Морфологически такие включения весьма разнообразны и негативные кристаллы являются одной из возможно наиболее совершенных форм этих включений. Еще в 1949 г. нами отмечалось, что современная форма включений «не является изначально образовавшейся, а представляет собой окончательный результат процесса установления равновесия между включенным раствором и кристаллом-«хозяином» [20, стр. 36]. Именно этому процессу кристаллизации и рекристаллизации родственного включающему минералу вещества на стенках микрополостей в большинстве случаев обязана своим возникновением ограненная и полуограненная форма газово-жидких включений.

В случаях, когда этот процесс не получает развития, обычно возникают эллипсовидные и округло-уплощенные вакуоли, каплевидные, неправильно ограниченные с «рваными» краями и амебовидные пустотки, сетчатые и кольцевидные полости с извилистыми контурами заполненные маточным раствором или раствором, залечивавшим трещинки в кристалле (см. фототабл. VI, *г*; IX, *б*, *в*; XI, *в*; XXI, *а*, *в*; XXII, *б*). Такие почти не ограненные формы чаще всего характерны для мнимовторичных и вторичных включений. Однако и среди них иногда наблюдаются микропоры в виде негативных кристаллов, частично связанные с зарастанием трещин в результате многоглавого роста. Таким образом, форма вакуолей не является критерием первичности или вторичности включений. Однако ориентировка таких ограненных вакуолей более связана с направлением секущих трещин, чем с кристаллографическими элементами включающего минерала.

Специальные работы по изучению микрокристалломорфологии стенок вакуолей включений в бериллах были недавно выполнены В. Г. Фекличевым [58], который пришел к следующим выводам, по-видимому, общего значения.

Ограненные формы газово-жидких включений являются формами роста, а не растворения. Простые формы таких отрицательных кристаллов первичных газово-жидких включений, как правило, подобны простым формам кристаллов-носителей.

Простые формы микроскульптур роста на гранях вакуолей первичных газово-жидких включений в кристаллах, как правило, подобны простым формам микроскульптур роста на нарушенных гранях кристаллов-носителей. Это подобие простых микроформ роста является важным аргументом в пользу тождественности кристаллизационной

среды, заключенной в первичных и мнимовторичных газово-жидких включениях, и минералообразующей среды, из которой образовались включающие минералы.

Простые гранные формы в вакуолях вторичных газово-жидких включений и микроскульптуры их стенок могут и не быть подобными таковым на кристаллах-носителях.

Первичные и мнимовторичные газово-жидкие включения неправильной формы более свойственны минералам, образовавшимся при низкой температуре и в условиях быстрого роста, что свидетельствуют об отсутствии перекристаллизации стенок их вакуолей.

В дополнение обратим внимание на случаи очень сложного внутреннего ультрамикрорельефа стенок вакуолей, описанные выше в связи с консервацией аэрозолей («шагреневая кожа», см. фототабл. VIII) и обычных «сухих» газовых растворов, при быстром спаде температур и давлений, обеспечивающих «сосульковидную» кристаллизацию родственного вещества на стенках включающих вакуолей (см. фототабл. XXII, *в*). Сходный по сложности «каркасный» рельеф возникает и при вскрытии некоторых жидких включений (см. фототабл. XXII, *г*).

*Определение соотношений фаз во включениях растворов и расплавов.* Необходимость определения при комнатной температуре стабилизированных отношений фаз в газово-жидких включениях и степени их заполнения с целью суждения о плотностях и температурах замкнутых в минералах растворов требует точных измерений под микроскопом. Для этой цели мы предложили [17] три способа измерений и подсчетов, проводимых с помощью микрометрической линейки или сетки, вставленной в окуляр, или с помощью других специальных приспособлений (например, АМ9-2 или хлопкового микроскопа). Наиболее надежным является *линейный* способ, применимый для правильно-трубчатых включений, затем следует *плоскостной* для включений уплощенных, со сплюснутым пузырьком. Менее точный *объемный* способ применяется для измерения дискоидальных, шарообразных и ограненных включений.

Для линейного способа определений отношений фаз наиболее пригодны правильно удлиненные трубчатые включения, которые могут быть в поперечном разрезе округлыми или уплощенными (см. фототабл. IX, *д*, *е*). В последнем случае включения и границы между фазами в них имеют ясные очертания. При различении газа и жидкости следует руководствоваться тем, что мениск границы раздела всегда выпуклый в направлении жидкости и вогнутый в сторону газа. Трубчатые включения обычно бывают закругленными на концах и эти закругления в известной мере совпадают с округлыми границами фазового раздела между жидкостью и газом. При измерениях окуляр-микрометром (по возможности с большим увеличением объектива) необходимо определить общую длину вакуоли включения и часть вытянутого включения, занятую газовой фазой и твердыми фазами, если они есть, а затем обычным способом вычислить проценты, отнеся остальной объем на заполнение жидкостью. Отсчеты должны проводиться единообразно при параллельном положении линейки и включения. Деления микрометра нужно совмещать со средней точкой закругления конца включения и с аналогичной точкой изгиба газового мениска. Чем более вытянуто включение (с превышением длины над толщиной в десятки раз), тем точность измерений выше. Обычно ошибка таких измерений не превышает $\pm 1\%$. В наиболее ответственных случаях хорошо применять микрофотографирование включений с микрометрической линейкой, с тем чтобы по увеличенному отпечатку наиболее надежно измерить процентное соотношение фаз.

Для плоскостного способа измерений пригодны плоскопараллельные включения с геометрически правильными, прямоугольными или тре-

угольными тонкими ограничениями, а также круглые и эллипсовидные включения. Необходимым условием является резкая сплюснутость газового пузырька между верхней и нижней стенками уплощенной вакуоли (см. фототабл. в V, *г*; VI, *в*; XXI, *а*). Эта сплюснутость обнаруживается благодаря тонкому окаймлению границ газового пузырька, средняя часть которого свободно пропускает световые лучи и представляется такой же светлой, как и жидкость включения. Чем более сжат газовый пузырек, тем светлый круг внутри него больше и, наоборот, этот круг превращается в светящуюся точку при сферической форме пузырька.

В последнем случае замеры отношений фаз плоскостным способом затруднительны, даже если само включение имеет форму уплощенного эллипса или диска. Тогда объем газового пузырька вычисляется по его диаметру отдельно, а объем вакуоли требует точного определения толщины, т. е. расстояния между верхней и нижней стенками включения методом «пылинок». При этом необходимо фокусирование микроскопа на обе плоскости стенок вакуоли и определение площади включения по микрометренной сетке с последующим расчетом объемных отношений, исходя из простой пропорции.

Техника плоскостного замера при достаточно сплюснутом газовом пузырьке также требует вычисления всей площади включения (ограниченной одной простой геометрической фигурой или их комбинацией) и площади круга или эллипса, ограничивающего сплюснутый газовый пузырек. Вычисление процентного содержания газа из этих данных также не представляет затруднений. Предел ошибки для параллельных плоских включений составляет не более ±1%. Ошибка увеличивается тем больше, чем шире темный обвод газового пузырька. Для этих случаев она может составить ±1,5—5% (см. фототабл. XXI, *в*).

Хорошие плоскостные включения в кварце, флюорите и кальците встречаются чаще, чем хорошие трубчатые. Для одного и того же семейства линейно-вытянутых и уплощенных включений хорошо сопоставить результаты измерений обоими способами.

Только в случаях полного отсутствия включений той или иной формы возможно прибегать к измерениям и *правильно объемных включений*, близких по форме к шару или эллипсоиду, кубу или ромбоэдру. Объем негативных кристаллов в кварце, практически часто встречающихся, вычислять трудно, но возможно.

Точность объемного способа измерений может быть повышена только с помощью изучения включений в двух или трех перпендикулярных друг другу плоскостях проекций. Поэтому препараты для подобных измерений должны изготавливаться в виде кубика или квадратной призмы. Газовый пузырек в правильно объемных включениях сфероидален. При вычислении его объема нужно пользоваться формулой для шара или эллипсоида вращения. В типично объемных включениях свет рассеивается не только в сферическом газовом пузырьке, но и во всем включении, почему оно почти целиком выглядит темным. Световые рефлексы в нем меняются и даже очень небольшие перемещения фокуса изменяют общие очертания, как бы передвигают границы фаз. Естественно, что все это сильно затрудняет также и измерения их объемных соотношений. Только значительный опыт и применение косого освещения при наблюдении разнообразных объемных включений позволяют получать оптимальные цифры и по известным стереометрическим формулам подсчитывать относительно правильный процент газа.

Для выяснения возможных ошибок и их знака нами был взят кристалл кварца из Северо-Коневского месторождения (Средний Урал), в котором в одной и той же зоне находились генетически одновременные, уплощенно-эллипсоидальные (объемные) и типично плоскост-

ные семейства включений. Точные замеры в последних показали колебания в величине газового пузырька по отношению ко всему включению от 6,36 до 6,84% и дали среднеарифметическое значение 6,67%.

Из объемных включений были выбраны два наиболее совершенных по форме включения: эллипсовидное и шарообразное. Проверка методом нагревания подтвердила, что все плоские и объемные включения гомогенизировались одновременно при температуре 130° С. Однако способы плоскостного и объемного измерений указанных двух включений дали резко различные результаты.

1. Плоскостные замеры эллипсовидного включения показали в относительных цифрах (деления микрометра) $R_1=3{,}75$; $R_2=3{,}0$; $S_{общ}=35{,}36$ (в абсолютных цифрах 0,002253 *мм*²) и $V$ сферического газового пузырька равный 1,15, а его площадь $P=4{,}1548$; газа 11,77%. Объемные замеры этого включения, очень близкого к эллипсоиду вращения, показали: $R_1=3{,}75$; $R_2=R_3=3{,}0$, общий объем $V_0=116{,}25$ (в абсолютных цифрах 0,00005952 *мм*³), $V_1=1{,}15$; $V_2=6{,}3569$, газа 5,47%.

2. Плоскостные замеры шарообразного включения показали общую площадь $P_0=36$ (0,0023 *мм*²) и $P_{газа}=3{,}8013$, газа 10,56%. Объемные замеры при $R_1=R_2=R_3=3{,}0$ дали $V_0=113{,}10$ (0,0000579 *мм*³) и $V_2=5{,}5763$; газа 4,93%.

Таким образом, результаты плоскостных замеров в объемных включениях показали процент газа, колеблющийся от 10,56 до 11,77%, а объемные от 4,93 до 5,47%, в то время как действительный относительный объем газовой фазы составляет по надежным замерам в очень благоприятных плоскостных включениях 6,67%.

Из этих цифр видно, что невозможность учета небольших отклонений от идеальной формы шара и эллипсоида вращения дает некоторое занижение в определении процента газа, а плоскостные замеры объемных включений приводят к резкому его завышению, являясь в таких случаях явно непригодными.

Аналогичные сопоставления на более обширном материале показывают, что средний предел ошибки объемных измерений значителен (до ±5%) и поэтому их применение может быть обусловлено только крайней необходимостью.

Нужно также отметить, значительную тонкость подобных измерений вообще и то, что глаз наблюдателя приобретает необходимый опыт не сразу. Для измерений плоскостных включений также рекомендуется масштабное микрофотографирование включений с сеткой окуляра. Крупные репродукции снимков плоскопараллельных включений увеличивают точность замеров и подсчетов и могут обеспечить выявление точных соотношений фаз способом вывешивания. Для этого позитивный микроснимок двухфазового или многофазового плоскостного включения тщательно разрезается по фазовым границам, а обособленные таким образом «фазы» взвешиваются раздельно на точных аналитических весах. При этом вначале необходимо хорошо взвесить все «включение», вырезанное по контуру, а вес фотобумаги, занятой его изображением, принять за 100%. Дальнейшее вычисление процентных соотношений отдельных фаз по весу не представляет никаких затруднений. Повышение точности их весового определения может быть достигнуто использованием для фотоотпечатков толстой фотобумаги.

При использовании для интересующей нас цели рядовых объемных двухфазовых включений Г. Г. Грушкин [12] обращал внимание на необходимость учета пределов видимости глаза наблюдателя и рекомендовал использование по возможности наиболее крупных по размерам включений и больших увеличений микроскопа. Позднее он на включениях в кристаллах флюорита с помощью закона больших чисел (484 замера) показал, что генетически однотипные и близкие по вре-

мени образования включения, независимо от их формы, могут быть все же использованы для выявления объемного соотношения фаз. Для этого необходимо из кристаллов флюорита выколоть пластинки по разным направлениям спайности. Для кварца достаточно двух взаимно перпендикулярных срезов параллельно и перпендикулярно оптической оси кристалла.

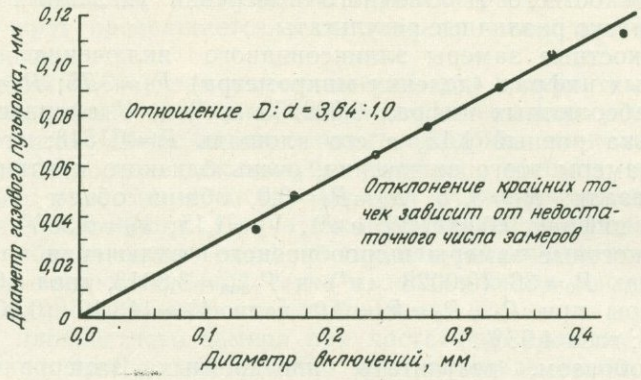



Рис. 40. График линейной зависимости между диаметром газового пузырька и диаметром всего включения при 20° С в флюорите (по Г. Г. Грушкину)

При достаточном числе замеров, сгруппированных по величине диаметра газового пузырька, он выявил четкую линейную зависимость, которая достаточно точно и более объективно, чем единичный замер, отражает отношение фаз во включениях какого-либо слоя кристалла или залеченной трещины (рис. 40). Площадь включений, как это делалось нами ранее [15], определяется полусуммой диаметров для овальных, полусуммой сторон для квадратных, полусуммой средней ширины на длину для неправильных по форме включений. Вообще метод больших чисел оказывается весьма эффективным для выявления границы, разделяющей сравнимые между собой замеры от замеров, в которых ошибка наблюдения искажает истинные величины, при определении объемных соотношений между газовой фазой и жидкостью.

Высказанные рекомендации и способы относительных измерений фаз внутри включений особенно важны для выявления агрегатных состояний растворов включений при их термодинамическом изучении и частично для суждений о концентрациях веществ в многофазовых включениях. Однако степень точности таких измерений очень важна также для развития и практического применения упрощенного визуального метода приближенного суждения о температурах гидротермальных растворов, предложенного автором.

Вообще разностороннее тщательное изучение и измерение включений под микроскопом в их статическом состоянии должно обязательно предварять все последующие экспериментальные и аналитические исследования. Для непрозрачных минералов, например некоторых сульфидов, такое изучение включений требует специальных новых физико-скопических методов изучения включений, освещаемых в предварительном виде в следующей главе.

## Глава 19

# ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ НОВЕЙШЕЙ ТЕХНИКИ В ИЗУЧЕНИИ ВКЛЮЧЕНИЙ

> Так же, как живая клетка заключает главные тайны животного и растительного царства, можно сказать, что включение составляет элементарную сущность минерального царства. Роль этой уменьшенной модели заключается в демонстрации того, что кристаллические минералы должны рассматриваться в соотношении с подвижными средами, которые их породили. Представляется исключительно важным сконцентрировать на эти объекты такие же мощные средства исследования, какими пользуется современная цитология.
>
> *Г. Дейша*, 1960

## *От увеличительной линзы до лазерного микроспектроанализатора*

Совершенно невозможно рассматривать научные возможности и перспективы в области естествознания в отрыве от развития техники и возникающих на ее базе новых методов исследований. Геологический молоток и горный компас явились и останутся очень долгое время необходимыми инструментами полевого изучения минеральных макрообъектов природы. Начала познания ее микрообъектов восходят к раннему средневековью, когда наш соотечественник ученый-энциклопедист раннего средневековья ал-Бируни (972—1048 гг.) впервые применил увеличительную линзу из горного хрусталя для рассмотрения микрообъектов включений внутри драгоценных и полудрагоценных минералов с целью оценки качества последних и получения возможностей раскрытия подделок. Примерно на восемь столетий позднее линзы были скомпанованы в виде первого микроскопа и дополнены призмами из исландского шпата, обеспечившими поляризацию света. Сейчас трудно сказать, кто первый это сделал, но выдающаяся роль Брюстера (1816 г.), Николя (1828 г.), а затем Сорби [91] в конструировании и использовании этого прибора с целью изучения газово-жидких включений в минералах выглядит очень значимой для развития геолого-минералогических наук вообще.

Сейчас невозможно установить, кто первый догадался изготавливать пластины из горных пород и минералов и назвал их шлифами. Эти препараты, впервые использовавшиеся Брюстером для изучения газово-жидких включений в кристаллах драгоценных камней, затем изготавливались из минералов и горных пород Николем, передавшим их в коллекцию Брайсона. Последний совместно с Сорби в середине прошлого века начал обстоятельное изучение включений.

Из истории науки с полной очевидностью явствует, что создание и применение поляризационного микроскопа неразрывно связано с учеными, интересовавшимися газово-жидкими включениями в минералах. Полевые геологи насмешливо предлагали им «рассматривать горы в микроскоп». А между тем конструирование микроскопических устройств, осуществленное в первой половине прошлого века, в очень большой мере было революционным для всех областей естествознания, сохраняющих необходимость точности и сознающих обязательность изучения микросоставляющих для любого макрообъекта природы.

Следующим крупнейшим шагом в познании ее минерального и органического мира было изобретение в 1895 г. рентгеноаппарата, показавшего (Лауэ, 1912 г.), что минералы, за очень редкими исключениями, конструируются природой не из молекул, а из атомов.

Вначале Брегги, а затем Н. В. Белов раскрыли перед нами удивительно закономерные и очень разнообразные системы стабилизации элементов в кристаллических решетках минералов. Плотность упаковки этих атомарных систем обеспечила полную герметизацию для подавляющего большинства случаев образования включений молекулярных в большинстве водных геохимических минералообразующих сред.

Рентгеновский и спектральный анализы оказались вполне применимыми и к изучению твердых фаз в стабилизированных при обычной температуре системах включений, а некоторые особенности использования для наших целей этих уже вполне привычных физикоскопических методов изучения структуры и элементарного состава минерального вещества попутно будут освещены ниже.

Специальные приспособления к микроскопу (термо- и криокамеры) для термодинамических исследований физико-химических микросистем включений, так же как и способы и техника их разрушения (декрепитация) и анализов состава, будут освещены в следующей нашей монографии.

Здесь мы остановимся только на кратком изложении некоторых аспектов применения новой техники, методов и методик исследования включений растворов и расплавов в их стабилизированном состоянии внутри вакуолей кристаллов. Автору это кажется необходимым потому, что применение некоторых из новейших приборов и методов может разрешить самую трудную проблему изучения состава индивидуальных газово-жидких включений и включений в непрозрачных, чаще всего рудных минералах. В общем возможное применение физикоскопических средств исследования микрообъектов к включениям в минералах может иметь разные задачи и далеко не одинаковое значение для прогресса в новой отрасли генетического познания минерального мира — термобарогеохимии эндогенных процессов. То, что оказалось наиболее пригодным для статического изучения микрообъектов из прошлого арсенала приборов, методов, методик и способов, было освещено выше. Оценка перспективности применения новых технических и методических возможностей в области изучения газово-жидких включений растворов должна быть дифференцированной в трех следующих направлениях:

1) выявление количества и состава твердых фаз включений с учетом их ультрамикроскопических размеров, а также состава компонентов растворов включений с помощью электронной микроскопии и парамагнитного ядерного резонанса;

2) выявление наличия включений, изучение их морфологии и статических соотношений фаз при обычной температуре с помощью инфракрасной и ультразвуковой микроскопии непрозрачных рудных минералов, главным образом сульфидов;

3) изучение состава включений минералообразующих растворов с помощью рентгеноспектрального микроанализа путем электронного зондирования и лазерного ультрамикроанализатора.

### *Электронография ультрамикрорельефа вакуолей включений и их твердых фаз*

Развитие электронной микроскопии было начато еще в 30-х годах на основе разработки радиочастотных источников питания электронных пушек с горячей нитью и фокусирующих или отражательных свойств электронных линз. Первый прибор был построен, по-видимому, в 1940 г. и усовершенствован в 1945 г. Очень четкое изображение поверхности образца с помощью электронного пучка было получено в сканнирующем электронном микроскопе с разрешающей способностью в несколько ангстрем только в 1955 г.

Первая работа по электронной микрографии пор, содержавших газово-жидкие включения растворов, по-видимому, принадлежат японским ученым Ивао, Акабори, Кондзуми, Минато (1953 г.), изучавшим включения в кварцевых образованиях пегматитов. То, что было недоступным для самых больших увеличений оптического микроскопа, предоставил нам электронный микроскоп.

Применительно к включениям можно указать на следующие его возможности:

1) выявление наличия, количества и характера распределения ультрамелких включений (менее 2 *мк*) в теле кристалла-хозяина;

2) изучение тончайшей топографии стенок их вакуолей, возникшей в результате выделения на них родственного вещества в процессе охлаждения микропорций растворов до обычной температуры;

3) изучение внешней ультрамикрокристалломорфологии минералов-узников;

4) изучение состава твердых фаз минералов-узников и сухого остатка растворов включений после их дегерметизации.

Работы в этих направлениях в основном стали развиваться только в 60-х годах нашего века, но они не касаются изучения подвижных газово-жидких фаз — самого главного в заполнения вакуолей. Тем не менее очевидно большое познавательное значение и необходимость дальнейшего применения электронной микроскопии к изучению включений.

Важные успехи в этом отношении были достигнуты во Франции Дейша и Селла [72], которые представили применительно к зернистому жильному кварцу способ двойного отпечатка на поверхности свежего излома образца. Первый пластический отпечаток поверхности они получали наложением пленки ацетилцеллюлозы, пропитанной в ацетоне, которая после просушивания легко отделялась от образца. Затем этот первый отпечаток покрывался пленкой углерода посредством его испарения в вакууме с одновременным оттенением платиной. После растворения ацетилцеллюлозы в ацетоне такая оттененная пленка выявляла ультратонкий обратный рельеф и давала контрастную реплику поверхности образца. Пленка изучалась в электронном микроскопе при разрешающей способности около 50 ангстрем. Таким образом, ими были выявлены полости размером от 100 ангстрем до нескольких микрон. Количество раскрытых полостей, которые делают жильный кварц молочно-белым, оценивалось авторами в пределах до 1 млрд/*мм*$^3$.

Повторив опыты Сорби [31] по выращиванию кристаллов галита из солевого раствора в химическом стакане, Г. Дейша и С. Селла [72] тем же методом реплик электронной микрографии зарегистрировали на поверхности разлома минерала зависимость количества включений («лакун кристаллизации») от темпа выпаривания раствора, т. е. от скорости роста. При достижении равновесия в системе раствор—кристалл и при очень медленном выращивании совершенно прозрачные зоны минерала оказались практически лишены включений, а мутные белые зоны переполнены ими и выявили очень сложную поверхность скола.

Применительно к изучению включений косвенный метод угольных реплик впервые был использован в нашей стране С. А. Куршевым и В. Н. Труфановым [36] на свежих сколах кварца и флюорита. В вакуолях ими был установлен сложный внутренний рельеф, связанный с кристаллизацией и отложением родственного вещества на стенках до и после вскрытия газово-жидких включений. Была показана возможность установления разнообразия формы вакуолей ультрамикроскопических размеров и, в частности, для кварца были выявлены включения; а) негативной формы, овальные, булавовидные и изомет-

ричные с размерами от 0,2 до 1 *мк*; б) дендритовидные и сложной конфигурации; в) четковидные, состоящие из цепочек мельчайших вакуолей.

Различаются первичные включения, ориентировка которых отчетливо контролируется зонами роста кристаллов, и включения, явно приуроченные к ультрамикротрещинам в них. В «сотовом» кварце такие включения располагаются в местах пересечения радиальных трещин «усадки» (фототабл. XXIII, *а*). Оказалось, что в флюорите ультрамикровключения морфологически существенно отличаются от включений в кварце. Чаще всего встречаются удлиненно-трубчатые, игольчатые и разветвляющиеся формы. Специфической их особенностью является винтообразное внутреннее строение, обусловленное ступенчато-спиральным выделением вещества на стенках вакуолей. Оказалось, что первичные включения не только располагаются по зонам роста субпараллельно друг другу, но и завиты спирально в одном направлении (см. фототабл. XXIII, *б*). В. Н. Труфанов и С. А. Куршев уделили внимание ультрамикроминералогии твердых фаз включений, впервые изучавшихся ими под электронным микроскопом. Они сообщают, что «среди твердых включений в кварце и флюорите выделяются минералы-узники и минералы-спутники. Первые выделяются из растворов внутри включений и представлены чаще всего кубиками галита и сильвина. Некоторые из них обнаруживают четко выраженное зональное строение и ступенчато-слоистое нарастание граней (см. фототабл. XXIII, *в*). Из минералов-спутников нами установлены каолинит, пирит, монтмориллонит, рутил и различные слюды. В некоторых образцах окрашенного флюорита и замутненного кварца скопления тонкодисперсных (до 30 Å) минералов-спутников являются центрами окрашивания» [36].

Методы структурной электронографии, развивающиеся уже 40 лет, так же как и разные конструкции электронных микроскопов, известны по описаниям в общих руководствах структурной кристаллографии, электронографии и рентгенографии (Белов, Уманский и др., Вайнштейн, Звягин и др.).

Чаще всего у нас в качестве электронографа используется электронный микроскоп ЭМ-5, реже чехословацкие, японские и французские конструкции этого совершенного прибора. Измерение фотометрируемых линий электронограмм осуществляется с помощью микрофотометра (МФ-4 и др.), а термическая возгонка исследуемого вещества для равномерного ее нанесения на подложку проводится в вакуумном посту ЭВП-2. Для осуществления не только качественных, но и количественных определений в последнем случае используется точно дозированное подмешивание эталонных веществ или гомологических пар (Уманский и др.).

В упрощенном виде с целью нахождения соотношений между NaCl—KCl—NaF в сухом остатке растворов микровключений и водных вытяжек эта техника и методы были использованы В. А. Калюжным и М. П. Миколайчук [31]. Для сублимации очень малого количества вещества, полученного из включений ($5 \cdot 10^{-8}$ *г*), они использовали специальный нагреватель из молибденовой проволоки диаметром до 2 *мм* с просверленными в ней лунками до 1,5 *мм* глубиной, в которые помещались микропробы. Такой препаратодержатель и нагреватель закреплялся в токоподводящих клеммах вакуумного поста, а над пробой на расстоянии 0,5—1 *см* помещалась сетка с подложкой для напыления, с которой затем получались электронограммы при напряжении 50 *кв* и экспозиции 5 *сек*. Так, ими для сухого остатка раствора жидких включений в топазе Волыни было выявлено соотношение NaCl : : KCl = 83 : 17. Результаты исследования некоторых фторидов, сульфатов, карбонатов, а также твердых фаз неизвестного состава, кристал-

лизующихся из растворов микровключений ими, к сожалению, приведены не были.

Использование явления дифракции электронов при получении электронограмм от минералов-узников включений было осуществлено В. Н. Труфановым и С. А. Куршевым двумя способами. Применение первого из них связано с улавливанием микрокристаллов-узников на свежеприготовленных сколах минерала-хозяина, нарушивших многофазовые включения. Эта процедура осуществляется наложением полистироловой или коллодиевой пленки, с которой микроминералы переносятся на угольную подложку. Затем на полученную псевдореплику наносится эталонное вещество и в режиме дифракции электронного микроскопа получаются электронограммы с избранных ультрамикрообъектов.

Во втором способе электронограммы твердых фаз «узников» и новообразований, возникших при испарении растворов включений, получаются методом отражения электронов прямо со спайных сколов минерала-хозяина. Эталонной при этом является дифракционная картина включавшего минерала (флюорит, топаз и др.), по которой рассчитывается масштаб изображения, а затем известными методами определяются по точечным рефлексам электронограмм параметры кристаллических решеток изучаемых ультрамикрообъектов с целью их диагностики.

В последнее время в лаборатории электронной микроскопии ИГЕМ АН СССР (Г. С. Грицаенко) начаты интересные работы по изучению формы вакуолей газово-жидких включений в кварцах и их агрегатах различного генезиса.

В. И. Васильевым были выявлены специфические признаки для распознавания вакуолей газово-жидких включений среди других деталей ультрамикрорельефа поверхностей сколов. Эти вакуоли имеют вид ясно выраженных ямок и фиксируются с учетом «правила теней». Поверхности их стенок часто имеют «свой» ультрамикрорельеф с более тонкой скульптурой роста, чем на сколе минерала, на котором обычно фиксируются микрослои его нарастания. Внутрипоровые «слои» кристаллизации родственного вещества, выделявшегося из капсулированных капелек материнского раствора, при его охлаждении до комнатной температуры под электронным микроскопом выглядят дискордантными. Это отчетливо можно видеть на платино-угольной реплике при увеличении в 11 000 раз (см. фототабл. XXIII, *г*), зафиксировавшей внутренний ультрамикрорельеф относительно крупного (менее 0,01 *мм*) мнимовторичного существенно газового включения в «сотовом» кварце пегматитов Волыни. Пример с изображением таких включений показателен в двух отношениях: электронография может оказаться наиболее точным методом для распознавания первичных, мнимовторичных и вторичных включений, а различия в ультратонкой скульптуре внутреннего рельефа вакуолей могут оказаться характеристическими для приблизительного выявления уровня термодинамических параметров и темпа их понижения после образования минералов. Уже к настоящему времени В. И. Васильевым (ИГЕМ) для вакуолей газово-жидких включений в рудоносных кварцах разного генезиса намечены электронографические признаки для их возрастной диагностики (табл. 15).

Таким образом, первые шаги в применении электронной микроскопии к решению задач микрокристалломорфологии стенок вакуолей и диагностике минералов-узников уже выявили важность ее использования в развитии ультрамикроминералогии твердых фаз и точной диагностики временного отношения включений по отношению к минералу-хозяину. Нет никакого сомнения и в том, что эффект дифракции электронов может быть плодотворно использован и применительно

Таблица 15

**Электронографические признаки, характерные для вакуолей газово-жидких включений в рудоносном кварце**

| Генетические типы включений | Размер, *мк* | Форма | Характер распределения | Рельефы сколов около включений |
|---|---|---|---|---|
| Первичные Внутризерновые | 0,1—12 | Разнообразные, часто отрицательные кристаллы и глобулевидные полости, реже неправильные (в низкотемпературных кварцах) | Одиночные или по зонам роста кристаллов | Гладкий |
| Межзерновые | 20—30 и крупнее | Как правило, неправильные; наиболее развиты в гребенчатых агрегатах | Группы, цепочковидные скопления, зоны скоплений по границам зерен | Гладкий или со ступенчатыми скульптурами роста, реже растворения; иногда ультрамелкие друзовидные образования |
| Мнимовторичные и вторичные | 3—8 и крупнее | Относительно неправильные, реже отрицательные кристаллы, уплощенные по одной из граней ромбоэдра или призмы | Группы и зоны скоплений вдоль залеченных трещин, часто по плоскостям спайности | Шероховатый до сильношагреневого со скульптурами роста и разъездания, с дендритами кварца и «примазками» других минералов |

к изучению кристаллических веществ в заполнении затвердевших включений расплавов в магматических породах и рудах.

### *Микрорентгеноспектроанализаторы при изучении состава твердых фаз включений расплавов и растворов в минералах*

Развитие рентгеновского локального микроанализа с помощью электронного зонда было обусловлено, с одной стороны, успехами в области рентгеновской спектроскопии, а с другой — электронной микроскопии. Соединение прибора для получения сфокусированного пучка электронов и рентгеновского спектрографа было запатентовано Хиллером еще в 1947 г., однако первый перестроенный по этому принципу электростатический электронный микроскоп для измерения возбуждаемого характеристического рентгеновского излучения был представлен французскими учеными Кастеном и Гинье в 1949 г. и усовершенствован к 1951 г. применением электромагнитных линз. Создание отечественного прибора для микрорентгеноспектрального анализа связано с параллельными и независимыми работами И. Б. Боровского и Н. П. Ильина, относящимися к началу и середине 50-х годов. В 1957 г. появились первые электронные зонды, удобные для практического использования в металлургии (идентификация включений в сплавах), а затем и в других областях науки и техники [5]. К 1961 г. появились серийные промышленные электронные зонды: в СССР — МАР, во Франции — КАМЕКА, в Японии — Хиташи-ХМА, в Англии и США — других конструкций и наименований. Однако принцип метода их работы в общем одинаков. Направленный пучок электронов, по диаметру изменяющийся в широких пределах (минимум 0,1 *мкм*), возбуждает в избранном под микроскопом пункте объекта исследования характеристическое рентгеновское излучение элементов, а кристалл-анализатор разлагает его в спектр, фиксируемый и расшифровываемый обычными способами.

Описание конструкций микрорентгеноспектроанализаторов (упрощенно электронных зондов), методов работы с ними и областей применения наиболее полно приведено в переведенной на русский язык книге

Биркса [5]. В более сжатом виде описание сделано С. Б. Масленковым во втором издании книги И. С. Волынского [9].

Наличие этих руководств позволяет нам прямо перейти к рассмотрению возможностей и некоторых особенностей использования рентгеноспектроанализатора в области изучения затвердевших раскристаллизованных и газово-жидких включений расплавов и растворов в минералах.

К настоящему времени в этой области были проведены лишь первоначальные испытания, которые дали обнадеживающие результаты в отношении изучения состава твердых фаз (минералов-узников) включений.

В. М. Валяшко и Л. Н. Когарко [8] приводят результаты рентгеновского микроанализа затвердевших включений в магматических апатитах Хибин, которые были получены с помощью электронного зонда КАМЕКА в Институте кристаллографии АН СССР В. В. Лидер и В. Н. Рожанским. Многофазовые газово-жидкие включения в кварцах были подвергнуты аналогичным исследованиям по инициативе и при участии Е. И. Доломановой и М. М. Элинсон [14].

Для изучения включений в первом случае использовался обычный макропрепарат минерала в виде пластины с очень хорошо отполированной поверхностью, который помещался в вакуум вместе с эталонами (до 40) в держателе микрозонда. Оказалось возможным отшлифовать препарат так, чтобы минеральные фазы затвердевшего включения размером в первые десятки микрон были выведены на поверхность образца. В микрополостях затвердевших включений, казалось заполненных, по наблюдениям в оптическом микроскопе и в поглощенных электронах единой «белой» фазой (фототабл. XXIV, *а* и *б*) с помощью электронного зонда сразу же были выявлены два минерала-узника, существенно различающиеся по среднему атомному номеру составляющих их элементов: содалит (гакманит) и калишпат (см. фототабл. XXIV, *в* и *г*). В первом из них (*а*) на спектрограмме* четко обнаружились Si, Al, Cl и S, а во втором (*б*) — K, Si и Al (рис. 41).

Первая твердая фаза, представляющая собой соединение элементов с более низкими атомными номерами, выглядит более светлой по сравнению с фазой, образованной более тяжелыми атомами, и, кроме того, из-за содержания серы под воздействием электронного луча она приобрела ярко-малиновую окраску.

Диагностике второго микроминерала содействовали относительные данные распределения элементов между этими твердыми фазами (см. фототабл. XXIV, *д* и *е*), так как густота белых точек пропорциональна концентрации соответствующего элемента. По различиям в содержании Si и Al между ними В. М. Валяшко и Л. Н. Когарко [8] пришли к выводу о том, что вторая фаза, по-видимому, является калишпатом. Третий изотропный минерал-узник включений красного цвета, люминесцирующий в электронных лучах голубовато-фиолетовым цветом, на микроанализаторе не показал содержания элементов с атомным весом меньше, чем у магния (см. рис. 42 *в*)**. Таким образом, выявились ограничения у этого совершенного прибора применительно к многофазовым газово-жидким включениям, часто содержащим легкие элементы. Однако, как было показано ранее, их минералы-узники поддаются другим методам диагностики, а наибольшие трудности в этом отношении вызывают ультрамикроскопические рудные фазы с «тяжелыми» металлами, имеющие размеры от микрона и более. Именно для таких мелкодисперсных микрокристаллов электронный зонд представляется наиболее совершенным оружием в определении их состава из

---

* В координатах $I$ — интенсивность характеристического рентгеновского излучения; $2\Theta^\circ$ — двойной угол Брэгга.

** По $N = 1{,}327$—$1{,}330$, т. е. ниже чем у дистиллированной воды ($N = 1{,}333$), он был определен как виллиомит (NaF).

массы вещества порядка $10^{-13}$ *г* при концентрации элементов в нем не ниже 0,1 вес. %.

Особенностью при электронном зондировании многофазовых газово-жидких включений (в отличие от затвердевших), которое проводилось во втором случае, является то, что они не могут быть вскрыты на поверхности. Это нарушило бы цельность системы и могло привести

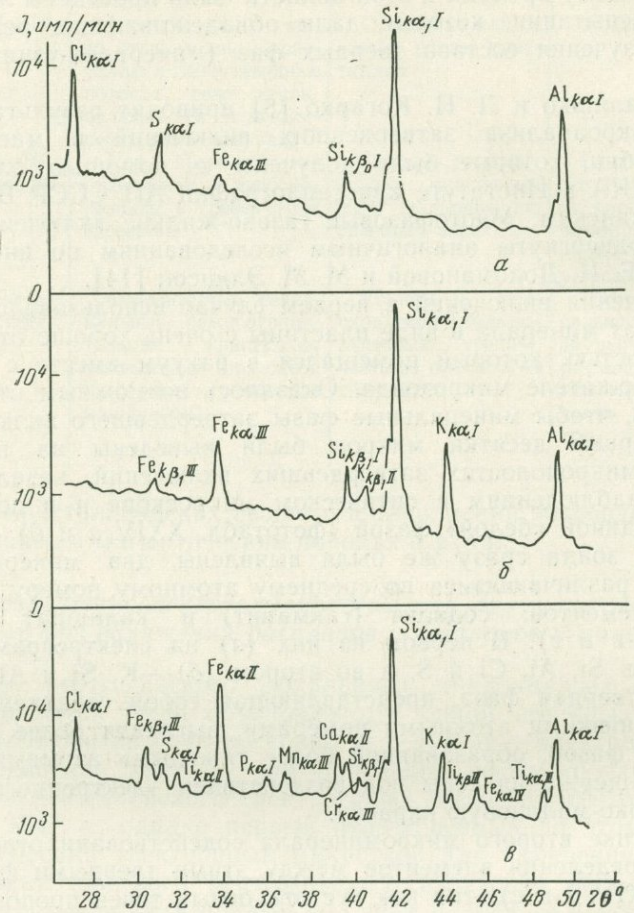



Рис. 41. Рентгеновские спектрограммы затвердевших включений в апатитах Хибин

*а* — содалита; *б* — калишпата; *в* — гомогенизированное включение

к засорению их посторонними веществами. Поэтому оказывается необходимой очень тонкая шлифовка поверхности минерала-хозяина с целью максимального приближения к ней изучаемых микрообъектов включений. Одновременно требуется оправданное повышение ускоряющего напряжения, что увеличивает глубину проникновения электронных лучей в образец. Однако лучше применять облучение включения жесткими рентгеновскими лучами, детектором для которых является сцинтилляционный счетчик. Эти лучи, характеризующиеся малой длиной волны, могут пронизывать отделяющий газово-жидкое включение от поверхности «слой» минерала-хозяина наибольшей толщины. Для разных минералов он, видимо, будет неодинаковым и здесь необходимо накопление опыта. В спектрографах микрозонда должны быть сменные кристаллы-анализаторы, а сам прибор для излучения относительно крупных (доли миллиметра) включений должен допускать применение

метода сканнирования хотя бы очень тонким механическим перемещением образца под зондом.

Е. И. Доломанова, В. В. Лидер и другие [14] изучили с помощью микрорентгеноспектроанализатора газово-жидкое многофазовое включение в препарате из мориона Шерловой горы (занорыш в жиле среди гранитов) и установили в нем среди ультрамикрокристаллических твердых фаз на стенке вакуоли (фототабл. XXV, *а*) цинк (*б*), медь (*в*), железо (*г*) и хром (*д*). При наличии во включениях галита они предположили, что Zn, Cu и Cr могли выделиться из раствора включения в виде тех или иных солей хлористоводородной кислоты. Во включении, по-видимому, из другой зоны кристалла были установлены Fe, Cr и Ca.

В одном из включений кристалла кварца из полости полевошпат-кварцевой жилы месторождения Спокойное тем же путем среди рудных твердых микроскопических фаз были установлены сочетания элементов Fe — Ti — Ca и Ti — Fe, помогающие диагностике микроминералов-узников (см. фототабл. XXV, 2).

Приведенные примеры исследований показывают, что новый рентгеноспектральный прибор должен быть принят на вооружение исследователями состава рудообразующих растворов во включениях и особенно в области развития ультрамикроминералогии их твердых фаз.

### *Специальная интроскопия для выявления включений в непрозрачных минералах*

Одним из существенных ограничений обычной оптической микроскопии газово-жидких и других включений является невозможность видения этих включений в непрозрачных и не просвечивающих в области спектра 0,4—0,8 *ммк* минералов. Поэтому до сих пор исследования включений проводились в основном в жильных минералах, находящихся часто в парагенезисе с рудными минералами. Непосредственное изучение газово-жидких включений в последних обычно ограничивалось сфалеритом, киноварью, реальгаром, касситеритом, вольфрамитом и шеелитом, в то время как множество других гидротермальных и иных минералов также нуждаются в таком изучении. Успешное развитие электроники уже теперь позволило преобразовывать электромагнитные колебания в любой области спектра в видимые глазом изображения. Это же достигнуто и в отношении высокочастотных упругих так называемых ультразвуковых колебаний, для трансформации которых в видимые изображения еще в начале 50-х годов в Ленинграде был создан ультразвуковой микроскоп.

С использованием длинноволновых инфракрасных (тепловых) лучей для непрозрачных минералов, характеризующихся небольшим их поглощением, была обеспечена техника видения с помощью инфракрасного микроскопа в двух вариантах: МИК-1 (с неподвижным столиком) и МИК-4 с вращающимся столиком. Эти микроскопы были разработаны в Институте металлургии АН СССР под руководством П. К. Ощепкова [45] и теперь выпускаются серийно. Еще до их конструирования была создана инфрамикронасадка ИМН-1 к обычному оптическому микроскопу. Эта насадка испытывалась нами совместно с П. К. Ощепковым и Ю. А. Долговым применительно к рудным минералам. Для некоторых из них (антимонит, вольфрамит и др.) она дала положительные результаты, позднее подтвердившиеся и с применением инфракрасных микроскопов, обеспечивающих увеличение до 600 раз. Описание конструкции и метода работы имеется в прилагающихся к ним инструкциях. Поэтому здесь мы представим только самые общие сведения и принципиальную схему устройства МИК. Видимая часть спектра от лампы накаливания поглощается специальным фильтром, который пропускает только инфра-

красную часть лучей, падающих на полированный макропрепарат непрозрачного минерала. Пройдя через него, тепловые лучи попадают в формирующий изображение входной объектив и далее на электронно-оптический преобразователь. На фотокатоде «тепловое» изображение трансформируется в электронный поток, который ускоряется в электрическом поле преобразователя, проходит через электростатические или магнитные линзы и фокусируется на флуоресцирующем экране, уже дающем видимое изображение. Последнее рассматривается через окуляры и может быть сфотографировано на рентгеновскую пленку с помощью обычной микрофотоприставки.

Уже при первых испытаниях мы убедились в том, что макропрепараты непрозрачных минералов должны иметь уплощенно-клиновидную форму. Для каждого из таких минералов из-за различий в степени поглощения инфракрасных лучей должна выбираться оптимальная толщина, что легко устанавливается перемещением клиновидного препарата в горизонтальном направлении. Так как «тепловое» изображение формируется входным объективом, настройка на фокус осуществляется его перемещением в вертикальном направлении с помощью обычной кремальеры. Так как толщина препарата значительно больше толщины обычного шлифа, а для антимонита может быть даже более 1 *мм*, газово-жидкие включения гидротермальных растворов и все детали внутреннего строения непрозрачного кристалла просматриваются достаточно четко. Для нас особенно важной оказалась возможность различать в них не только морфологию вакуолей и их распределение в теле рудного минерала, но и фазовые границы жидкости и газового пузырька сжатия. Естественно, что при этом могут быть измерены с помощью окуляр-микрометра и их объемные (линейные) отношения для суждений о былой температуре растворов, законсервированных в гидротермальных рудных минералах (см. главу 16). Однако проведение гомогенизации этих включений нагреванием, конечно же, оказывается невозможным, так как сам принцип инфракрасного видения не позволяет осуществлять такие испытания. В этом заключается главный недостаток инфракрасного микроскопа или насадки. Однако этот прибор является важным для статического изучения включений в непрозрачных рудных минералах. Расширение его применения для наших целей будет зависеть только от совершенства и разнообразия электронно-оптических преобразователей, которые применительно к разным непрозрачным минералам должны быть взаимозаменяемыми.

Ультразвуковая интроскопия пока не применялась для выявления и изучения газово-жидких включений в непрозрачных минералах и поэтому оценка ее возможностей в этом направлении будет преждевременной. Поэтому мы остановимся только на использовании парамагнитного ядерного резонанса для обнаружения наличия газово-жидких включений водных растворов в непрозрачных минералах.

Метод электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) — один из основных методов магнитной радиоспектроскопии — был впервые использован в электронной лаборатории факультета естественных наук Парижского университета инженером К. Аллегре [66] с целью обнаружения жидких водных включений в минералах, когда их визуальное наблюдение оказывается невозможным.

Принцип парамагнитного резонанса основан на взаимодействии веществ с радиоизлучением и связан с использованием спектроскопических радиоволн. Когда частица (электрон — «Магнитик») имеет кинетический момент (т. е. вращается вокруг оси подобно волчку) и магнитный момент $\vec{M}$, наложение внешнего радиоволнового поля $\vec{H}$ обеспечивает поворот оси собственного ее вращения с частотой $f_0$, пропорциональной полю $\vec{H}$. Такая прецессия связана с электродвижущей

силой, индуктированной в цепи, и если возбуждать частицу в переменном поле частоты $f'$, она ускоряет прецессию, которая окажется максимальной при $f'$, равном $f_0$. Когда частота вращения «волчка» совпадает с частотой радиоволны, возникает резонанс и радиоизлучение начинает поглощаться. По резонансным частотам получают информацию об исследуемом веществе весом в десятимиллиардные доли грамма.

Поскольку водородные ядра в водных растворах имеют такие свойства, их наличие в минералах можно обнаружить с помощью ЭПР.

Первые исследования для обнаружения водных включений были проведены К. Аллегре для кварцев, залегающих в породах нижнего кембрия. Образцы минерала после раздробления до фракции среднезернистого песка тщательно высушивались с целью освобождения их от всей возможной внешней влаги. Затем проба помещалась в специальную трубку и вводилась в аппарат типа «Вариан», обладающий слабой разрешающей способностью. Частота этого прибора была отретулирована так, чтобы обеспечить резонанс только протонов водорода, которые содержатся в воде включений.

При максимальной чувствительности аппарата добивались характеристической линии резонанса, которая появлялась в катодном осциллографе и вполне достоверно регистрировала присутствие в минерале жидких водных включений. Несколько подобных испытаний было произведено также и Г. Дейша. Аналогичные результаты были получены в том случае, когда количество воды во включениях гидротермальных минералов составляло не менее 0,5 вес. %. Именно в этом состоит главное ограничение метода. Его преимущество заключается в новой возможности выявления газово-жидких включений в непрозрачных минералах руд и пропаренных растворами измененных пород. Однако все же это «слепой» метод, не позволяющий различать фазовых отношений в заполнении вакуолей включений. Поэтому мы не можем рассчитывать на его существенное значение в исследованиях включений и ограничимся приведенными самыми краткими сведениями.

### *Лазерный микроспектральный анализ*

Этот микроспектроскопический метод обеспечивает информацию о строении, составе веществ посредством изучения их взаимодействия со светом, одновременно применяя микроскоп и спектральный аппарат. Развитие лазерной техники существенно дополняет метод спектрального зондирования и обеспечивает наиболее рациональное использование микроэмиссии в диапазоне ультрафиолетовых, видимых и инфракрасных лучей.

Импульсные лазеры на твердом теле выпускаются в ГДР (типа ZFL 750) с более высокой энергией импульсов, обеспечивающейся ксеноновыми импульсными лампами, которые высвечивают резонаторы длиной до 110 *мм* и являются наиболее подходящими для направленного испарения очень малых количеств материала для анализа. Такой лазер в сочетании с исследовательским микроскопом монтируется на одной оптической скамье с кварцевым спектрографом (типа Q 24).

При зажигании импульсной лампы в стержне резонатора в результате регенеративного усиления образуется плоская монохроматическая волна в виде импульса продолжительностью около 200 *мксек,* проходящая через прозрачный торец. Такое лазерное излучение далее проходит через зеркально-линзовую систему с короткофокусным расстоянием 6,3 *мм*, но со значительным расстоянием от препарата (15,8 *мм*), в фокусе которой располагается исследуемое включение. Когерентный источник лазерного света импульсного лазера на твердом теле вызывает в фокусе линзы плотность мощностью от $1{,}0^8$ до $10^{12}$ *вт/см*$^2$.

В пределах фокальной точки включения, находящегося на небольшой глубине (до 120 *мк*) от поверхности макропрепарата, происходит испарение всех химических элементов с образованием «кратера». Диаметр фокальной точки сжигания может колебаться от 10 до 30–40 *мк*, а частота импульсов может достигать трех в минуту. Полученная микроплазма, взрывообразно возникающая под воздействием сфокусированного излучения рубина, в количестве от 0,3 до 20 *мк/г* используется для спектрохимического анализа.

Пар плазмы, вырывающийся между электродами, содержит химические элементы в различных возбужденных состояниях, и при разряде дает чистый искровой спектр. Проекция последнего осуществляется с помощью кварцевого или обычных ультрафиолетовых конденсоров. С помощью кварцевого спектрографа (Q 24) может быть одновременно определено свыше 60 элементов, включая редкоземельные, причем спектры, зафиксированные при помощи лазерного зонда на фотографическом слое при выдержке $<1$ *м/сек*, очень резкие.

Микроскоп лазерного микроспектроанализатора имеет приспособление для крепления микрофотонасадки, с помощью которой каждый микрообъект (включение) может быть предварительно задокументирован. Последующая документация также фиксируется на фотопленке со спектрами всех элементов и расшифровывается обычным способом по характерным аналитическим линиям. Такой совершенный прибор был приобретен кафедрой полезных ископаемых МГУ и сейчас проходит испытания применительно ко включениям в минералах. К сожалению, наиболее обыкновенные газово-жидкие включения в прозрачных минералах не «прожигаются», так как луч света проходит через них без задержки. Ожидается лишь возможность определения элементного состава рудных минералов-узников во многофазовых включениях и использование лазерного микроспектрального анализа при изучении состава затвердевших микровключений в минералах некоторых магматических пород.

Для изучения состава включений растворов и расплавов имеет перспективы эмиссионный микроспектральный анализ с помощью нового прибора, разработанного в Государственном оптическом институте (ГОИ).

Часть VII

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВКЛЮЧЕНИЙ РАСТВОРОВ И РАСПЛАВОВ В СТАТИЧЕСКОМ СОСТОЯНИИ

> Свойства минерала не остаются для нас ничего не говорящими, мертвыми данными, напротив, каждое из них воспроизводит нам какие-нибудь моменты из его прошлого. И если имеются еще данные, которые остаются только сырым научным материалом и не освещают нам жизнь минерала, это объясняется тем, что еще не найден ключ для правильного чтения этих данных.
>
> *Я. В. Самойлов,* 1933

В очень важном разделе минералогии, охватывающем разностороннее изучение минерального вещества в его устойчиво стабильном состоянии, сохраняющемся в течение длительного времени в земной коре, до сих пор далеко недостаточно учитываются и изучаются законсервированные внутри природных минералов микропорции порождавших их геохимических сред. Между тем полноценное их изучение даже только в статическом виде (при 20° С) с помощью обычного микроскопа дает дополнительные факты и открывает глаза на очень важные вопросы генезиса включающих минералов.

## Глава 20

## ВНУТРИВАКУОЛЬНАЯ УЛЬТРАМИКРОМИНЕРАЛОГИЯ МНОГОФАЗОВЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ

> Увлекательный микромир минералов в жидких и газовых включениях еще ждет своих исследователей, так как в настоящее время ему посвящены только единичные работы.
>
> *Е. М. Лазько,* 1958

### *Начало становления методики и техники ультрамикроминералогии*

Микросистемы трех- и многофазовых включений минералообразующих растворов и расплавов, по нашим наблюдениям, могут содержать внутри каждой вакуоли до 27 твердых фаз, выделившихся после герметизации этих включений и названных минералами-узниками [18], а за границей [85] — дочерними минералами. Точная диагностика их в газово-жидких включениях представляет очень много трудностей из-за мизерных размеров этих микроминералов, однако она сулит очень большие перспективы в отношении выявления генетики минерального мира и несомненно существенно расширит количество его индивидуальных представителей, не встречающихся в иных условиях образования и сохранения.

Главной особенностью таких твердых фаз, часто растворимых при нагревании, является их нахождение внутри сохранившейся до наших дней герметически изолированной капли эндогенной материнской среды, из которой они обособились в процессе существенного снижения уровня термодинамических параметров до обычной температуры поверхности Земли и с которой они до сих пор находятся в подвижном равновесии. Таким образом, познание их состава является одновременно и позна-

нием состава былых глубинных геохимических сред, породивших включающие эндогенные минералы, породы и руды.

Присутствие в жидких включениях кристалликов, чаще всего кубической формы, не могло не привлечь внимания тонких исследователей минералов прошлого века. По-видимому, первым из них был Д. Брюстер, который в 1845 г. в жидких включениях топазов и кварцев наблюдал перемещение таких кристалликов, а в 1849 г. высказал предположение, что эти твердые фазы были углекислым кальцием( по Розенбушу и Вюльфингу). Однако первое правильное приближение к определению их состава принадлежит Г. Сорби [91], который во включениях метасоматических кварцев из грейзенов Корнуолла не только наблюдал кубические, призматические и ромбические минералы-узники (рис. 53, 54, 55, его работы), но и осуществил вытяжки из этих кварцев, показавшие наличие хлоридов, щелочей и сульфатов кальция. Он, по-видимому, правильно посчитал заключенные микрокристаллики включений за галит, сильвин и селенит. Он же в смешанных растворах легкорастворимых солей путем медленного их испарения при 100° С первый искусственно воспроизвел минералы-узники: во включениях кристаллов галита — темно-красные ромбовидные кристаллики двухромовокислой соли, бесцветные кубические — хлористого калия и шарообразные кристаллы аммиачной соли, которые кристаллизовались параллельно с возникновением газового пузырька при охлаждении галита до обычной температуры.

Кроме этих замечательных опытов Г. Сорби [91] наблюдал многофазовые пирогенные включения стекла («стеклянные пустоты») в кристаллах основного силиката из шлаков медных и никелевых руд, содержащие твердые темные фазы (вероятно закиси железа), а также полностью раскристаллизованные включения силикатных расплавов. С полным основанием он перенес эти наблюдения на природные объекты и увидел в фенокристах полевых шпатов в эффузивах Аррана включения стекла с зелеными минералами-узниками (возможно пироксена), в авгитах из лав Везувия — включения стекла с двумя морфологически различными твердыми фазами, а в авгитах из базальтов Шотландии — по меньшей мере с тремя морфологическими разновидностями микрокристалликов вместе с газовыми пузырьками, находящимися в стекле пирогенного включения.

Все эти опыты и наблюдения Г. Сорби в отношении понимания природы различных включений и их ультрамикроминералогии трудно переоценить, однако и они, как и в области термометрии, нашли признание, запоздавшее на один век. Несмотря на наличие в зарубежной литературе большого количества зарисовок и микрофотографий многофазовых включений, в том числе и в широко известных руководствах Ф. Циркеля (1893 г.), Г. Розенбуша и Е. Вульфинга (1904 г.) по петрографии и минералогии, до середины XX века дело изучения микроминералов-узников включений и разработка методов их определения практически не продвинулось вперед. Некоторые достижения в этом направлении наметились в течение последних 20 лет лишь благодаря усилиям советских ученых.

Первые в СССР исследования в области ультрамикроминералогии были нами организованы в конце сороковых годов в лаборатории термометрического анализа Львовского университета и вначале основывались только на микрокристаллооптике (включая иммерсионный метод). Они касались многофазовых жидких включений в кварцах Памира и топазах Волыни. Первыми кристаллами-узниками, которые нам удалось научиться надежно определять микроминералогическим методом, были галит, сильвин, кальцит и гематит — спекулярит (рис. 42).

В тот период (1947—1950 гг.) отработки микроскопических определений минералов-узников и развития оценки концентраций и состава

маточного раствора включений мы писали следующее. «Определение внутренних минералов включений связано еще с очень большими трудностями ввиду их очень малых размеров. Только в некоторых минералах, обладающих хорошей спайностью и содержащих относительно крупные включения, удается извлекать минералы-узники. Определение последних в этом случае с помощью иммерсионного метода не представ-

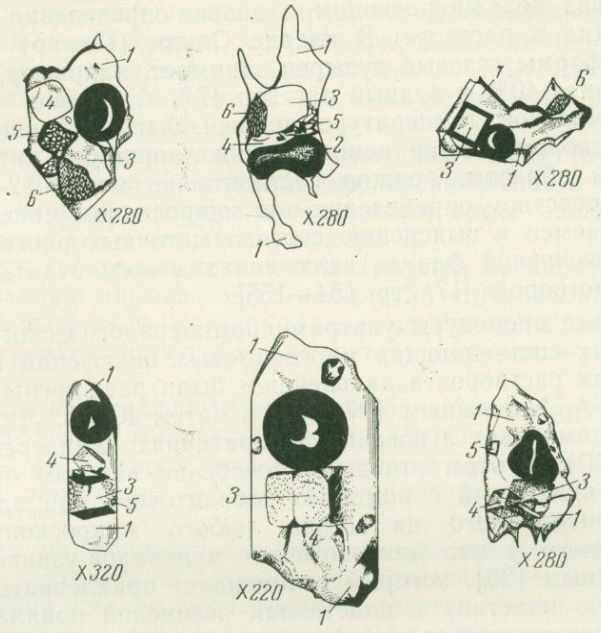



Рис. 42. Многофазовые включения в кварцах Памира и первые в СССР определения минералов-узников (1948—1949 гг.)

*1* — маточный раствор; *2* — газовый пузырек; *3* — галит; *4* — сильвин; *5* — карбонат; *6* — спекулярит

ляет очень больших затруднений. Однако чаще всего извлечь эти внутренние минералы не удается. Сделанные нами попытки освобождать их механическим разрушением включений (раздробление минерала) и затем отыскивать их в порошке минерала, помещенном в иммерсионные жидкости, оказались недостаточно надежными. Минералы-узники обычно измельчаются значительно легче, чем вмещающий минерал, и утрачивают свои кристаллографические формы. Кроме того, во вмещающем многофазовые включения минерале встречаются и мельчайшие твердые включения (минералы-спутники), которые мешают точным определениям. Только для некоторых случаев этот метод все же может дать положительные результаты.

Однако для определения минералов-узников в настоящее время следует предпочитать такую, применявшуюся в нашей лаборатории В. А. Калюжным, процедуру:

а) предварительное изучение под микроскопом формы, окраски, рельефа, изотропности и анизотропности этих минералов;

б) извлечение через два очень тонких отверстия маточного раствора и инъекции во включение иммерсионной жидкости;

в) определение обычным способом показателя преломления того или иного минерала-узника. Для этой цели с помощью монохроматора или монохроматорных пластинок следует использовать дисперсионные вариации впрыснутой во включения жидкости.

Именно таким образом в многофазовых включениях топазов Волыни и кварцев Памира для изотропных кубических кристаллов-узников были определены показатели преломления, равные 1,543±0,001 и 1,490±0,001, отвечающие галиту и сильвину.

Для трехфазовых включений правильной трубчатой формы или даже для объемных ограненных включений, содержащих твердую фазу в виде куба (обычно галит или сильвин), мы непосредственно измеряли отношения фаз под микроскопом с целью определения концентрации этого вещества в растворе. В кварце Одуди (Памир) во включении правильной формы газовый пузырек занимает, например, 13% объема, кристалл галита 40% и водный раствор 47%. Учитывая то, что последний при комнатной температуре должен быть 26-процентным насыщенным раствором, общая концентрация хлористого натрия во включении, таким образом, должна составить не менее 52—53%. Таким образом, посредством определения под микроскопом минералов-узников мы приближаемся к выяснению состава маточных растворов, а путем измерения отношений фаз во включениях можем отдать отчет о концентрации растворов» [17, стр. 154—155].

Эти первые процедуры ультрамикроминералогического метода изучения твердых составляющих многофазовых включений и суждения о концентрациях растворов в дальнейшем были расширены и усовершенствованы В. А. Калюжным [27, 29], а затем Ю. В. Ляховым [41] в основанных нами двух львовских лабораториях (Университет и Институт АН УССР). В этом отношении особенно важным оказалось просверливание включений с помощью победитового или алмазного микросверла, монтируемого на остове любого микроскопа и впервые приспособленного у нас для изучения минералов-узников включений В. А. Калюжным [30], который рекомендует приклеивать препарат на металлическую пластину с пластичной резиновой подкладкой и регулировать давление сверла на минерал микровинтом микроскопа. Наблюдение за этой процедурой проводится с помощью бинокулярной лупы, фокусирующейся на поверхность макрообъекта и на изучаемый микрообъект.

Сходное устройство для МГУ было изготовлено позднее механической мастерской ИГЕМ. Вращающийся стержень в рабочем торце позволяет сменять сверла стандартного стоматологического набора, применяемые для мягких минералов (флюорит, кальцит и др.) с относительно крупными (1 *мм* в поперечнике) включениями. Вращение стального сверла, помещенного по оси тубуса микроскопа взамен его объектива, осуществляется при этом небольшим моторчиком типа Б 37/85, обеспечивающим до 5000 *об/мин*. Если столик микроскопа (например, МБИ-1) допускает вертикальное перемещение, то необходимое давление на закрепленный на нем препарат обеспечивается тонким подъемом с помощью кремальеры. Для минералов с большой твердостью (кварц, топаз и др.) можно использовать наиболее тонкие стандартные алмазные сверла и иглы типа ТУОР 2-59-53 и ОНО 37-91-66. Подходящим для наших целей является и портативный сверлильный станок типа С-155 (до 1200 *об/мин*) с набором победитовых и специальных алмазных (в виде коронки) микросверл.

Впервые алмазное микросверло для вскрытия содержимого включений в кварцах из Франции (Дофине) и Бразилии применял еще в 1822 г. Г. Дэви. В. Ньюхауз в 1932 г. высвобождал растворы хлоридов и сульфатов металлов из включений в галенитах и сфалеритах путем раскалывания минералов по спайности с последующим микрокристаллоскопическим определением состава в выделившихся вследствие испарения жидкой фазы микрокристалликах. Однако ни в том, ни в другом случаях минералы-узники как таковые еще не определялись.

*Определения минералов-узников многофазовых газово-жидких включений*

Накопленный к настоящему времени, но все же еще ограниченный опыт позволяет нам рекомендовать следующие процедуры и их последовательность при изучении и диагностике минералов-узников.

1. Отобрать в макропрепаратах, изготовленных из прозрачных минералов, по возможности наиболее крупные многофазовые жидкие или кристалло-газовые включения, сфотографировать их или зарисовать.

2. Установить принадлежность включения к тому или иному виду и разновидности по соотношениям фаз в их заполнении и по возможности измерить их относительные объемы.

3. Выяснить в дубликатах испытуемого включения (другие макропрепараты из того же кристалла) последовательность растворения кристалликов-узников в минералообразующей среде включений путем нагревания препарата в микротермокамере.

4. Провести спектральные анализы дублетов препарата с наибольшей концентрацией многофазовых включений того же вида и разновидности для выявления состава элементов-примесей в минерале, в большинстве случаев относящихся к составу минералов-узников включений.

5. Выяснить кристаллооптически при больших увеличениях микрокристалломорфологию минералов-узников, их окраску и в поляризованном свете — изотропность или анизотропность, а также магнитность для свободно плавающих рудных минералов и люминисценцию под микроскопом МЛ-2.

6. Выявить на федоровском столике показатель преломления окружающей их геохимической среды и по отношению к ней по эффекту косого освещения или по перемещению полоски Бекке — светопреломление, в том числе и в сопоставлении их друг с другом.

7. Провести аккуратную пришлифовку и дополировку поверхности макропрепарата с тем, чтобы расстояние от нее до микрообъекта — включения составило до 0,5—0,05 *мм* (в зависимости от микротехнических возможностей и характера объектов).

8. Просверлить в противоположных концах включения (с непрерывным наблюдением под бинокуляром и промыванием спиртом) два тонких отверстия. Если раствор, находящийся под давлением выше атмосферного, начинает фонтанировать [59] или просачиваться наружу уже при первом вскрытии, следует быстро сфотографировать поверхность препарата с выделившимися вокруг отверстия (вследствие испарения жидкости) микрокристалликами и поместить их в капли индиферентной жидкости. Затем путем втягивания микропипеткой с «грушей» или поршневым приспособлением извлечь и сохранить их для дальнейшего микрокристаллоскопического изучения.

9. Извлечь с помощью той же микропипетки через проделанные отверстия жидкий раствор включения для химического ультрамикроанализа и инъецировать вместо него иммерсионную жидкость внутрь включения. При этом необходимо проследить возможность извлечения (см. пункт 8) вместе с маточным раствором и ультрамикроскопических минералов-узников, которые изучаются потом разными методами.

10. Перекрыть макропрепарат покровным стеклом и определить в иммерсионной жидкости, заполнившей вакуоль включения, светопреломление микрокристаллов-узников по способу В. Б. Татарского [50] (см. пункт 6) или путем тщательного наблюдения за направлением движения полоски Бекке в монохроматическом свете и при полном обороте столика хорошо отцентрированного микроскопа.

11. Удалить иммерсионную жидкость легколетучими органическими растворителями (бензол, ксилол или стандартный набор № 1) и

инъецировать новую жидкость с другим известным показателем преломления для повторения процедур пункта 10, в необходимых случаях сменяя жидкость несколько раз.

12. Испытать растворимость минералов-узников в вакуоли после завершающей промывки включения инъекциями дистиллированной воды и других растворителей (щелочи и кислоты).

13. После новой промывки с оставшимися микрокристалликами провести микрокристаллохимические испытания путем инъекций высокочувствительных реактивов.

Таким образом, с помощью просверливания включений даже без извлечения из вакуолей минералов-узников можно получить значительную информацию об их оптических свойствах и вероятном химическом составе. При этом некоторые трудные операции пункта 6, связанные с использованием федоровского столика, пункта 8 — с сохранением и микрокристаллоскопическим изучением продуктов испарения и пункта 9 — с извлечением и химическим ультрамикроанализом и определением pH микропорций материнских растворов включений, могут быть опущены.

Лучше процедуры по диагностике минералов-узников уже с пункта 8 ориентировать на их извлечение из вакуолей включений и изучение с помощью рентгеновского анализа (лауэграмма), рентгеноспектрального зондирования, лазерного микроспектроанализа, электронной микроскопии и даже таких обычных теперь способов, как определение твердости минералов-узников по Виккерсу с помощью прибора ПМТ-3, допускающего путем микровдавливания выявление этого важного показателя в зернах микроскопического размера.

Для осуществления всех подготовительных к этим исследованиям операций в лаборатории нужно иметь микроманипулятор (например, типа ММ-1), который при небольшом усовершенствовании обеспечивает точную и плавную подачу микроминералов в горизонтальном, наклонном и вертикальном направлениях к нужному месту их сохранения или изучения.

Для этих новых и более точных возможностей диагностики минеральных микрообъектов, извлекаемых из вакуолей газово-жидких и кристалло-газовых включений, мы продолжим рассмотрение микроопераций по их изучению, начиная с пункта 6.

В минералах с очень хорошей спайностью и многочисленными многофазовыми относительно крупными включениями (кальцит, мусковит, топаз, флюорит) можно осуществить попытку осторожного вскрытия этих включений по одной из плоскостей спайности, но это все же бывает редкой удачей и часто сопровождается выделением «кашицы» из старых, а возможно и новых соединений. Обычно следует ориентироваться на более сложную «механизированную» процедуру.

В первую очередь нужно оконтурить канавкой включение до половины его глубины с помощью специально изготовленной алмазной микрокоронки или полого в рабочей части микробура, а при отсутствии таковых — обычным остро отточенным победитовым наконечником или алмазной иглой типа ОНО 37-91-66. Промыть «кольцо» канавки дистиллированной водой и затем спиртом, перекрыть этот участок препарата двумя-тремя каплями свежеперегнанного глицерина, чистого касторового масла или иммерсионной жидкости с близким к минералу светопреломлением. Затем, действуя победитовой иглой как рычагом, при подходящем увеличении бинокуляра, сфокусированного на рабочий участок, произвести полное вскрытие включения, приподняв по спайности или сколов и сняв верхнюю часть его вакуоли. Оставшуюся нижнюю часть впадины-вакуоли с раствором и минералами-узниками, перекрытыми материнской и затворной индиферентной жидкостью, изолировать покровным стеклом.

Снять макропрепарат и поместить его на столик поляризационного микроскопа для дополнительного визуального изучения нового расположения микроминералов-узников, фотодокументации и нумерации каждого из них по признаку объема и свойств с обозначением этих же номеров на микрофотографии или зарисовке.

Можно, но не обязательно, установить наличие газов в растворе включения, которые при вскрытии могут обособляться в затворной жидкости в виде одного или нескольких газовых пузырьков, и определить их суммарный объем по диаметру шара, измеренному микрометрической линейкой. Затем микропипеткой, по возможности, точно собрать их все для последующих исследований, уже не связанных с ультрамикроминералогией *.

Извлечь из маточного раствора с помощью тонкой иглы или лучше поршневой микропипетки микроминералы-узники и поместить их в инертные жидкости или влажную камеру для надежного сохранения. Наметить и последовательно осуществить для каждого из них после наблюдений за цветом и блеском, спайностью и изломом возможности кристаллографического определения сингонии и граней на отражательном гониометре или хотя бы габитуса микрокристаллов. Провести определение их показателей преломления и двупреломления иммерсионным методом и его вариациями микротвердости и удельного веса, а для очень малых микрообъектов осуществить изучение внешней ультрамикрокристалломорфологии минералов под электронным микроскопом. Все аналитические процедуры, связанные с полным уничтожением микроминералов (индивидуальный спектральный анализ на ИСП-22 и др., растворимость в воде, кислотах и щелочах, микрореакции и т. п.), нужно отнести в самый конец их изучения и диагностики.

При возможности для более совершенного определения структур и состава минералов отмеченными старыми (получение лауэграмм и спектрограмм) и новыми методами (рентгеноспектральное изучение и лазерно-микроспектральный анализ) очень важно вскрывать не одно, а несколько одинаковых по фазовому составу и состоянию включений в макропрепаратах того же минерала и по предварительному изучению (без вскрытия) идентифицировать в них микрокристаллы-узники. Дубликаты последних необходимы и для обычных испытаний по растворимости в капле воды и растворов кислот и щелочей (по В. А. Вахрамеевой), и для проведения микрохимических реакций по И. П. Алимарину, М. Н. Петриковой [1] и другим авторам.

Все сказанное показывает, с одной стороны, очень большие сложности в изучении ультрамикроминерального мира включений, а с другой — намечает реальные возможности точного изучения его микроиндивидов с быстрым анализом очень малых количеств вещества при условии использования современной физикоскопической техники. Что представлялось совсем недоступным для познания минералогам XVIII века и первой половины XIX века, в оставшейся трети нашего века уже представляется вполне достижимым и очень важным для теоретических и практических целей геохимии, минералогии и учения об эндогенных месторождениях.

Первоначальные результаты, полученные далеко не в полном комплексе намеченных методов изучения и диагностики минералов-узников, представлены ниже для многофазовых включений в кварцах Памира, в топазах и морионах Волыни. Описания и определения семи минералов-узников в топазах Волыни (№ 6, 8, 9, 11, 12, 13, 14) осуществлены по упрощенным и не полным данным В. А. Калюжного [27, 29], а шести микрокристаллов в морионах Волыни (№ 7, 10, 15, 16, 17,

---

* Это ориентировано на определение вероятных давлений и выявление состава газов в индивидуальных включениях волюмометрическим методом.

18) — по Ю. В. Ляхову [41], кроме обычной кристаллооптики применившего рентгеноструктурный анализ. Наши дополнения или изменения, для некоторых случаев даже в названиях микроминералов, были произведены в соответствии с современными данными об их физико-химических свойствах.

Главные диагностические данные (показатели преломления) были получены иммерсионным методом на предметном стекле или в шлифе с наблюдениями за перемещением полоски Бекке и использованием способа вращающейся иглы. Однако можно рекомендовать и прием косого освещения, описанный у В. Б. Татарского [50], с применением обоймы анализатора в качестве заслонки для затемнения части поля зрения микроскопа. При показателе преломления минерала большем, чем у иммерсионной жидкости, тень видна на крае микрозерна, обращенном к заслонке, а при обратном их соотношении — с противоположной стороны. При близком показателе преломления микроминерала и иммерсионной среды возникающая цветная реакция обеспечивает для первого случая синюю окраску, а для второго — красную.

Поскольку только одни кристаллооптические данные, как это можно видеть по определениям В. А. Калюжного [27, 29], бывают недостаточными для диагностики микроминералов-узников, Ю. В. Ляхов с помощью З. И. Йорыш представил микрорентгенометрическую характеристику целого ряда микроминералов-узников из кристалло-газовых включений в морионах Волыни.

При содействии В. А. Калюжного рентгенолог З. И. Йорыш отработала важные детали для обеспечения возможностей рентгенографии очень малых (0,0001 $м^3$ и более) количеств вещества. Это мизерное количество растертого в порошок между двумя предметными стеклами минерала-узника включений наносится острой иглой ровным слоем на тонкий (0,002—0,007 *мм*) волосок из чистого стекла (без солей тяжелых элементов) длиной 7—9 *мм* и покрытый на конце (1—2 *мм*) тонким слоем белого непарфюмеризованного вазелина. Этот волосок укрепляется пинцетом на конусообразной пластилиновой подставке на стандартном металлическом кружке РКД применительно к оси коллиматора рентгеновской камеры, с центрировкой микрообъекта в наиболее интенсивной части пучка рентгеновских лучей и его вращением вокруг оси. З. И. Йорыш успешно работала на камере РКД с диаметром 57,3 *мм* при Fe-антикатоде (30 *кв*; 10 *ма*) с диафрагмой 0,5 при средней экспозиции 1—1,5 *ч*, иногда до 4—6 *ч*. В этих условиях съемки она совместно с Ю. В. Ляховым представила рентгенометрическую характеристику ряда микроминералов-узников из кристалло-газовых включений морионов Волыни, результаты которой помещены в табл. 16, 17, 18, 19, 20. Ниже приводится описание изученных минералов-узников.

1. Галит (NaCl) изотопен, $N = 1{,}543—1{,}544 \pm 0{,}001$. Кристаллы обычно кубической формы или имеют вид параллелепипеда, а иногда шестиугольника с закругленными вершинами, что для последнего случая является результатом роста в стесненных условиях плоских включений и связано со спецификой ориентировки минерала-узника, направленного одной из вершин куба к наблюдателю. Иногда на кубических кристаллах галита слабо развиваются грани октаэдра, но часто ребра и вершины куба бывают закругленными. Минерал бесцветен или окрашен в светло-желтый цвет и реже характеризуется голубовато-пятнистой окраской (в случаях присутствия во включениях сильвина). При нагревании жидких включений полное растворение галита достигается при температурах выше 150° С, а в кристалло-газовых — выше 450—500° С. Этот минерал-узник дает ясную реакцию на Na с уранилацетатом, растворим в воде, является наиболее обычным во всех многофазовых включениях и количественно преобладает над другими минералами-узниками в системах жидких включений.

2. Сильвин (KCl) изотропен, $N=1{,}490\pm0{,}001$. Его кристаллы обычно имеют вид квадратной призмы, шестиугольников, чаще кубов с сильно округленными вершинами или даже шарообразную форму вследствие очень высокого температурного коэффициента растворимости. Очень легко растворим в воде, часто бесцветен, но иногда заметна светлая желтоватая окраска. Температура растворения при нагревании жидких включений всегда значительно ниже, чем у галита и обычно не достигает даже 100° С. Ввиду значительного внешнего сходства описанных двух микроминералов мы выдвинули температурный критерий их распознавания при исследованиях включений на первый план [17].

3. Кальцит доломитизированный ($CaCO_3$), анизотропен, $Nm$ — 1,66, $Np$ — 1,49, в виде ромбовидных и неправильной формы бесцветных зерен, легко растворяющихся в соляной кислоте, иногда люминесцирует в оранжево-розовом цвете. Высокое двупреломление сочетается с ясной псевдоабсорбцией.

4. Гематит (спекулярит) ($Fe_2O_3$) анизотропен, $Nm=3{,}01$, $Np=2{,}78$; обычно тонколистоватые таблички, в проходящем свете кроваво-красной или густо-оранжевой окраски, со слабым плеохроизмом, в отраженном свете полуметаллический блеск.

5. Кварц ($SiO_2$), анизотропен, с двупреломлением 0,009, $Ne=1{,}553$, $No=1{,}544$. Встречен нами в качестве минерала-узника в виде хорошо ограненных двуглавых кристалликов во включениях растворов-рассолов во флюоритах из пегматитов Центрального Казахстана и в топазах Волыни.

6. Хлорид алюминия и цинка, еще не получивший названия, анизотропный, бесцветный, по-видимому, ромбической сингонии. На кристаллах устанавливаются грани призм, двух пирамид и, вероятно, пинакоида. По В. А. Калюжному [29], в плоских включениях топазов Волыни имеет вид слегка удлиненного восьмиугольника или квадрата со срезанными вершинами. Его $Ng=1{,}599\pm0{,}001$, $Np=1{,}585\pm0{,}002$, $+2V=50°$ (по двум выходам оптических осей). Твердость по шкале Мооса очень низкая (1—2). Легко растворим в воде, но при этом всегда наблюдается небольшое количество остатка в виде прозрачной или сероватой массы. В концентрированной $H_2SO_4$ он также растворяется неполностью, но с интенсивным кипением, а при нагревании жидкого включения целиком растворяется при температурах 70—80° С. Вскипание с $H_2SO_4$, а также реакция с образованием кристаллов AgCl при действии $AgNO_3$ и последующей перекристаллизации $NH_4OH$ убедительно указывает на присутствие иона $Cl^-$, а спектральные анализы дают линии Zn и следы Al и Si. Этот новый минерал встречается наряду с NaCl почти во всех газово-жидких включениях топазов Волыни. После дальнейшего уточнения констант и рентгеноструктурного анализа его следовало бы назвать сорбитом в честь Г. Сорби.

7. Водный хлорид двухвалентного железа ($FeCl_2\times\times2H_2O$), по Ю. В. Ляхову [41], образует шестиугольные несколько вытянутые веретеновидные кристаллы или представлен их агрегатом сложной формы. Минерал принадлежит, по-видимому, к ромбической сингонии, отличается высокой интерференционной окраской; $Ng=1{,}578\pm0{,}002$; $Nm=1{,}568\pm0{,}002$; $Np=1{,}535\pm0{,}002$, удлинение положительное, бесцветен, мягкий, легко растворяется в воде. Дает ясную реакцию на $Cl^-$ с $AgNO_3$ и на $Fe^{2+}$ с $K_3[Fe(CN)_6]$. Спектральным анализом минерала-узника установлены: Fe — много; Na и Al — следы. Результаты рентгеноструктурного анализа приведены в сравнении с эталонными данными для $FeCl_2\cdot2H_2O$, по Л. И. Миркину, в табл. 16. Этот минерал постоянно встречается во включениях морионов Волыни и занимает до 20—25% объема кристалло-газовых включений, по отно-

Таблица 16

**Сравнительная рентгенометрическая характеристика минерала-узника ($FeCl_2 \cdot 2H_2O$)**

| Минерал 4 из включения (по Ю. В. Ляхову и З. И. Йорыш) | | | По Л. И. Миркину | | Минерал 4 из включений (по Ю. В. Ляхову и З. И. Йорыш) | | | По Л. И. Миркину | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| N | $I$ | $\frac{d\alpha}{n}$ | $I$ | $\frac{d\alpha}{n}$ | N | $I$ | $\frac{d\alpha}{n}$ | $I$ | $\frac{d\alpha}{n}$ |
| 1 | 3 | (6,0) | — | — | 22 | 5 | 1,995 | — | — |
| 2 | 5 | 5,5 | 13 | 5,5 | 23 | 3 | 1,964 | — | — |
| 3 | 8 | 4,3 | 83 | 4,28 | 24 | 1 | 1,894 | 7 | 1,84 |
| 4 | 6 | 4,1 | — | — | 25 | 2 | 1,805 | 20 | 1,81 |
| 5 | 2 | 4,0 | — | — | 26 | 3 | 1,766 | 20 | 1,76 |
| 6 | 3 | 3,74 | 7 | 3,63 | 27 | 2 | 1,734 | 17 | 1,72 |
| 7 | 3 | 3,49 | — | — | 28 | 3 | 1,690 | 20 | 1,69 |
| 8 | 1 | (3,29) | — | — | 29 | 2 | 1,649 | 17 | 1,66 |
| 9 | 3 | 3,03 | 7 | 3,17 | 30 | 4 | 1,626 | — | — |
| 10 | 5 | 2,88 | 5 | 2,88 | 31 | 5 | 1,596 | 27 | 1,59 |
| 11 | 6 | 2,83 | — | — | 32 | 2 | 1,517 | 10 | 1,32 |
| 12 | 10 | 2,76 | 100 | 2,75 | 33 | 1 | 1,483 | 7 | 1,490 |
| 13 | 4 | 2,69 | — | — | 34 | 2 | 1,457 | — | — |
| 14 | 3 | 2,60 | 23 | 2,65 | 35 | 1 | 1,410 | 7 | 1,430 |
| 15 | 6 | 2,52 | — | — | 36 | 3 | 1,385 | 23 | 1,377 |
| 16 | 7 | 2,40 | 67 | 2,39 | 37 | — | — | 13 | 1,388 |
| 17 | 5 | 2,31 | 33 | 2,32 | 38 | 4 | 1,262 | — | — |
| 18 | 1 | (2,27) | — | — | 39 | 3 | 1,200 | — | — |
| 19 | 2 | 2,20 | — | — | 40 | 4 | 1,153 | — | — |
| 20 | 4 | 2,12 | 33 | 2,13 | 41 | 3 | 1,133 | — | — |
| 21 | 8 | 2,09 | 67 | 2,08 | | | | | |

шению ко многим другим твердым фазам является ксеноморфным. Это свидетельствует о его выделении из остаточного расплава-рассола включений в последнюю очередь. При нагревании до температуры около 60° С быстро растворяется. Среди эндогенных минералов ранее не описан.

8. Прозопит (?) — $CaAl_2(FOH)_8$ или шенит — $K_2Mg(SO_4)_2 \times 6H_2O$; бесцветный, анизотропный, $Ng = 1{,}476 \pm 0{,}001$, $Np = 1{,}464 \pm 0{,}002$, двуосный, положительный ($2V + 56°$), удлинение отрицательное, с прямым погасанием. Во включениях имеет форму удлиненных табличек с почти прямоугольными очертаниями и совершенную спайность в двух направлениях, параллельных наружным граням. Не растворяется в концентрированных HCl, $H_2SO_4$ и $HNO_3$. При температуре около 300° С в растворах включений частично перекристаллизовывается в тонкостолбчатый высокопреломляющийся минерал и вблизи температуры гомогенизации растворяется в них полностью. По оптическим константам и физическим свойствам минерал, по мнению В. А. Калюжного [29], близок к некоторым цеолитам (морденит), но по условиям существования (кислая среда) скорее всего является фторидом (прозопит).

9. Гемафибрит (?) $Mn_3[AsO_4][OH]_3 \cdot H_2O$ светло-желтоватые анизотропные кристаллы столбчатого или призматического габитуса, имеют неправильные или параллелепипедальные ограничения. По В. А. Калюжному [29], показатели преломления, замеренные в фосфорнометиленовых жидкостях, составляют: $Ng' = 1{,}918$, $Np' = 1{,}868$, $+2V = 56°$ (по двум выходам оптических осей), двупреломление высокое, удлинение отрицательное, погасание возможно прямое. Очень мягок и гигроскопичен. Растворяется в материнском растворе включений при температурах 40—70° С. В воде становится непрозрачным, белым (в отраженном свете), сохраняющим кристаллографические ограничения. Растворяется в 10%-ной соляной кислоте. Приведенная характеристика минерала отвечает свойствам гемафибрита, однако наличие мышьяка в пегматитах Волыни установлено не было.

10. Эльпасолит ($K_2NaAlF_6$) изотропен, $N=1{,}373—1{,}375\pm0{,}003$. Образует хорошо ограненные кубические кристаллы, часто представляющие комбинацию октаэдра и куба. Минерал-узник бесцветен и в нем спектральным анализом установлены Al и Na. Данные рентгеноструктурного анализа Ю. В. Ляхова и З. И. Йорыш приведены в табл. 17. Во включениях четко выделяется среди других твердых фаз благодаря низкому светопреломлению. При нагревании в температурном интервале 230—380° С эльпасолит претерпевает значительные изменения с образованием зернистого агрегата неправильной формы. Медленно растворяется в серной кислоте.

Таблица 17

**Рентгенометрическая характеристика эльпасолита**

| N | $I$ | $\frac{d\alpha}{n}$ | $\frac{d\beta}{n}$ | N | $I$ | $\frac{d\alpha}{n}$ | $\frac{d\beta}{n}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 5,1 | 4,6 | 15 | 7 | 1,657 | 1,502 |
| 2 | 4 | 4,7 | 4,3 | 16 | 2 | 1,581 | 1,433 |
| 3 | 2 | 4,1 | 3,70 | 17 | 3 | 1,560 | 1,414 |
| 4 | 2 | 3,71 | 3,36 | 18 | 9 | 1,434 | 1,300 |
| 5 | 1 | 3,40 | 3,09 | 19 | 1 | 1,375 | 1,246 |
| 6 | 4 | 3,26 | 2,87 | 20 | 5 | 1,283 | 1,163 |
| 7 | 10 | 2,87 | 2,60 | 21 | 3 | 1,222 | 1,108 |
| 8 | 4 | 2,58 | 2,34 | 22 | 2 | 1,197 | 1,085 |
| 9 | 1 | 2,51 | 2,27 | 23 | 5 | 1,172 | 1,062 |
| 10 | 9 | 2,35 | 2,13 | 24 | 1 | 1,147 | 1,039 |
| 11 | 2 | 2,24 | 2,03 | 25 | 1 | 1,116 | 1,011 |
| 12 | 10 | 2,03 | 1,837 | 26 | 4 | 1,093 | 0,909 |
| 13 | 2 | 1,851 | 1,678 | 27 | 2 | 1,064 | 0,965 |
| 14 | 2 | 1,815 | 1,645 | 28 | 1 | 1,054 | 0,957 |

11. Карбонат бериллия (?). Бесцветный анизотропный минерал, $Ng=1{,}530\pm0{,}001$, $Np=1{,}417\pm0{,}002$ (измерены методом вращающейся иглы), макрокристаллы имеют форму изометрического многогранника или неправильных, иногда удлиненных пластинок. Обладают очень высоким двупреломлением и вследствие этого ясной псевдоабсорбцией. Двуосный, удлинение положительное, спайность хорошая по удлинению зерен. Твердость низкая. Не растворяется в концентрированных HCl, $H_2SO_4$, $HNO_3$. Во включениях при температуре 330—370° С заметно начало процесса его растворения. По величине двупреломления ($Ng-Np=0{,}113$) и четкой линии Be на спектрограмме минерал-узник может оказаться карбонатом бериллия.

12. Караколит $PbNa_2[SO_4][OH]Cl$ бесцветный анизотропный минерал, по форме кристаллы в плоских включениях имеют вид многоугольников; $Ng=1{,}760\pm0{,}002$; $Nm=1{,}756\pm0{,}001$; $Np=1{,}744$ (вычислено). Минерал двуосный, отрицательный, $2V-60°$ (по двум выходам оптических осей). Твердость низкая, по-видимому, растворим в воде. По оптическим свойствам минерал близок к караколиту [29].

13. Гипсоподобный минерал. Анизотропные бесцветные кристаллы таблитчатого облика, форма внешних ограничений ромбическая, острый угол ромба равен 56°. Минерал двуосный отрицательный, $Ng=1{,}557\pm0{,}001$, $Np=1{,}533\pm0{,}001$, двупреломление 0,024, $2V=60°$. $Ng$ и $Np$ лежат в плоскости таблички. Нерастворим в концентрированной HCl. Минерал довольно близок к гипсу, но оптический знак и расположение $Ng$ и $Np$ противоположны гипсу (ось $Ng$ совпадает с длинной диагональю ромба).

14. Типлеит $Na_2(BO_2)Cl\cdot2H_2O$ анизотропные микрокристаллы изометрического слегка удлиненного облика. Угасание прямое, одно-

осные отрицательные, $Ng = 1{,}525 \pm 0{,}002$, $Np = 1{,}503—1{,}510 \pm 0{,}002$. Двупреломление среднее, по оптическим данным — типлеит.

15. Криолит ($Na_3AlF_6$) изотропен, двупреломление очень низкое, $N = 1{,}339—1{,}342 \pm 0{,}003$. Представлен кристаллами кубического габитуса серовато-белой окраски. Данные рентгеноструктурного анализа, по Ю. В. Ляхову и З. И. Йорыш, приведены в табл. 18. Минерал встречается в газовых и реже жидких включениях в топазе и кварце, значительно чаще — в виде твердых включений минералов-спутников, с образованием присыпок хорошо ограненных кристаллов. Некоторые из них развивались совместно с кварцем. Подобные сингенетические включения криолита обычно приурочены к основанию зоны дымчатого кварца. В растворах включений при нагревании заметно не растворяется, так как попадает в них или вырастает еще до полной герметизации вакуолей.

Таблица 18

**Рентгенометрическая характеристика криолита включений**

| N | $I$ | $\frac{d\alpha}{n}$ | $\frac{d\beta}{n}$ | N | $I$ | $\frac{d\alpha}{n}$ | $\frac{d\beta}{n}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | (5,0) | 4,5 | 13 | 8 | 2,34 | (2,12) |
| 2 | 6 | 4,5 | (4,1) | 14 | 3 | 2,27 | 2,06 |
| 3 | 10 | 4,1 | (3,75) | 15 | 3 | 2,22 | 2,01 |
| 4 | 4 | 3,89 | 3,52 | 16 | 3 | (2,14) | 1,937 |
| 5 | 6 | 3,74 | (3,39) | 17 | 2 | 2,09 | 1,898 |
| 6 | 3 | 3,47 | 3,15 | 18 | 3 | 2,02 | 1,831 |
| 7 | 3 | (3,03) | 2,75 | 19 | 9 | 1,940 | (1,758) |
| 8 | 3 | 2,90 | 2,63 | 20 | 2 | (1,725) | 1,563 |
| 9 | 9 | 2,74 | (2,48) | 21 | 4 | 1,596 | 1,446 |
| 10 | 2 | (2,58) | 2,34 | 22 | 7 | 1,567 | (1,421) |
| 11 | 2 | 2,49 | 2,25 | 23 | 3 | 1,370 | 1,242 |
| 12 | 3 | 2,43 | 2,21 | 24 | 1 | 1,314 | 1,191 |
| | | | | 25 | 3 | 1,086 | 0,985 |

16. Минерал группы манганита темно-бурый с красным оттенком, анизотропный. Представлен мелкими короткопризматическими кристалликами, по-видимому, ромбической сингонии. Часто образует сростки. Погасание прямое, удлинение отрицательное, светопреломление 1,782. Твердость $\gg 5$, в воде не растворим. Один из наиболее постоянно присутствующих в кристалло-газовых включениях минералов-узников кварца Волыни. Занимает не более 0,5% объема вакуолей. Почти всегда оказывается захваченным галитом или другими минералами-узниками. При температуре 280—290° С превращается в бесформенную черную массу, которая при последующем нагревании в материнском растворе-рассоле постепенно уменьшается, но полностью не исчезает. По данным рентгеноструктурного анализа Ю. В. Ляхова и З. И. Йорыш, ближе всего находится к минералам группы манганита (табл. 19).

17. Несквегонит (?) $MgCO_3 \cdot 3H_2O$ — бесцветный анизотропный водный карбонат магния. Представлен мелкими длиннопризматическими кристалликами веретеновидного облика. Погасание прямое, удлинение отрицательное, $Ng' = 1{,}524$, $Np' = 1{,}410$. Сильное двупреломление и сравнительно невысокие показатели преломления не исключают предположения о несквегоните.

18. Железосодержащий минерал, по-видимому из гидроокислов желтовато-бурой, иногда неравномерной окраски. Образует хорошо ограненные восьмиугольные несколько вытянутые таблитчатые кристаллы, обладающие весьма совершенной спайностью, проходящей параллельно наиболее развитым граням, по-видимому, пинакоида. Зна-

Таблица 19

**Рентгенометрическая характеристика минерала группы манганита**

| N | *I* | $\frac{d\alpha}{n}$ | $\frac{d\beta}{n}$ | N | *I* | $\frac{d\alpha}{n}$ | $\frac{d\beta}{n}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 5 | 4,1 | 3,75 | 14 | 2 | 1,557 | 1,411 |
| 2 | 4 | (3,69) | 3,34 | 15 | 4 | 1,492 | 1,352 |
| 3 | 10 | 3,35 | (3,03) | 16 | 4 | 1,437 | 1,302 |
| 4 | 4 | (2,93) | 2,65 | 17 | 5 | 1,415 | 1,283 |
| 5 | 10 | 2,64 | (2,39) | 18 | 2 | 1,316 | 1,193 |
| 6 | 6 | 2,37 | (2,15) | 19 | 1 | 1,301 | 1,179 |
| 7 | 1 | 2,30 | 2,08 | 20 | 4 | 1,212 | 1,009 |
| 8 | 1 | 2,11 | 1,911 | 21 | 4 | 1,152 | 1,044 |
| 9 | 3 | (1,934) | 1,753 | 22 | 5 | 1,091 | 0,989 |
| 10 | 10 | 1,761 | (1,597) | 23 | 4 | 1,078 | 0,977 |
| 11 | 2 | 1,716 | 1,555 | 24 | 3 | 1,058 | 0,959 |
| 12 | 4 | 1,678 | 1,521 | 25 | 1 | 1,046 | 0,948 |
| 13 | 2 | 1,588 | 1,440 | 26 | 2 | 1,035 | 0,938 |
| | | | | 27 | 2 | 1,026 | 0,930 |

чительно реже встречается в виде совершенно бесцветных кристаллов, при извлечении из включений буреющих на воздухе. При растирании минерал приобретает характерную светло-бурую окраску примерно спустя 48 *ч*, что, очевидно, является результатом окисления $Fe^{2+}$ до $Fe^{3+}$.

В плоскости спайности бо́льший показатель преломления 1,774, меньший 1,767. Спайные сколы гаснут через 90°. Плеохроичная окраска изменяется от светло-желтой до коричневой в направлении меньшего показателя. Мягкий, в воде не растворяется. В серной кислоте (1 : 4) растворяется за 5—7 *мин*. Микрохимически в значительном количестве установлено $Fe^{3+}$, по-видимому, образовавшееся за счет окисления $Fe^{2+}$ в сернокислой среде. Реакция на Cl с $AgNO_3$ отрицательна. Спектральным анализом обнаружены: Fe — много; Al — следы. Результаты рентгеноструктурного анализа, по Ю. В. Ляхову и З. И. Йорыш, приведены в табл. 20.

Минерал почти всегда обнаруживается в кристалло-газовых включениях морионов, где занимает не более 10—15% объема. При нагре-

Таблица 20

**Рентгенометрическая характеристика железосодержащего минерала (из гидроокислов?)**

| N | *I* | $\frac{d\alpha}{n}$ | $\frac{d\beta}{n}$ | N | *I* | $\frac{d\alpha}{n}$ | $\frac{d\beta}{n}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 5 | (6,2) | 5,6 | 17 | 2 | 1,780 | 1,614 |
| 2 | 10 | 5,7 | (5,2) | 18 | 1 | (1,752) | 1,588 |
| 3 | 3 | 4,3 | 3,9 | 19 | 7 | 1,699 | (1,540) |
| 4 | 2 | 4,1 | 3,75 | 20 | 4 | 1,669 | 1,513 |
| 5 | 3 | (3,18) | 2,88 | 21 | 4 | 1,626 | 1,474 |
| 6 | 1 | (3,07) | 2,78 | 22 | 5ш | 1,589 | (1,440) |
| 7 | 8 | 2,86 | (2,60) | 23 | 1 | 1,520 | 1,378 |
| 8 | 5 | 2,81 | (2,55) | 24 | 2 | 1,440 | 1,305 |
| 9 | 5 | 2,64 | 2,39 | 25 | 3 | 1,402 | 1,271 |
| 10 | 8 | 2,58 | (2,34) | 26 | 3 | 1,344 | 1,219 |
| 11 | 4 | 2,30 | 2,08 | 27 | 3 | 1,307 | 1,185 |
| 12 | 1 | (2,23) | 2,02 | 28 | 6 | 1,285 | (1,165) |
| 13 | 1 | 2,15 | 1,951 | 29 | 3 | 1,188 | 1,077 |
| 14 | 7ш | 2,03 | (1,834) | 30 | 2 | 1,097 | 0,995 |
| 15 | 2 | 1,952 | 1,769 | 31 | 4 | 1,084 | 0,983 |
| 16 | 3 | (1,867) | 1,692 | 32 | 4 | 1,069 | 0,969 |
| | | | | 33 | 4 | 1,053 | 0,954 |

вании до 350—370° С разлагается во включениях с образованием студневидной массы. К этому же температурному моменту (350—355° С) относится выделение из раствора включений хлопьеобразного вещества, которое при последующем охлаждении уже не исчезает.

При рассмотрении описаний приведенных 18 минералов-узников можно видеть, что их кропотливое изучение и его результаты в основном базируются на кристаллооптических определениях светопреломления и двупреломления, осности и удлинения с учетом их формы и окраски. Определительные таблицы по этим показателям Е. Ларсена и Г. Бермана [37], а также Я. Я. Яржемского [65] не всегда дают возможности для вполне надежной диагностики кристаллов. Однако даже и при других важных сведениях о микроминерале (лауэграммы и спектрограммы) далеко не всегда удается дать минералам-узникам известные наименования, за исключением самых обычных и распространенных во включениях Памира и Волыни 10 микроминералов.

По-видимому, новыми минералами, еще не имеющими названия, являются № 6 и 11, установленные В. А. Калюжным без рентгеновской характеристики, так же как и минералы № 12 и 14, определенные им, как караколит и типлеит, но лишенные определений главных для них элементов — свинца и бора, не говоря уже о реакциях на Na и Cl [29].

В этом отношении значительно более обоснованными выглядят, вероятно, новые железосодержащие минералы-узники № 7 и 18, охарактеризованные Ю. В. Ляховым [41] кристаллооптически, рентгенометрически, спектроскопически и путем микрохимического анализа. Его минерал № 16 еще нуждается в уточнении оптической и спектральной характеристик, а также в микрохимическом испытании, особенно на марганец.

Упомянутые авторы проделали очень важную работу и оптически доказали наличие во включениях топаза и кварца Волыни четырех микроминералов, ранее не известных во включениях: эльпазолита, криолита, караколита и типлеита. Целый ряд других изотропных и анизотропных минералов-узников, прослеженных ими в жидких, водных и кристалло-газовых включениях морионов и топазов Волыни, систематизированы в табл. 21.

Конечно, даже представленные весьма разнообразные показатели преломления дополнительно к ранее приведенным описаниям говорят о большом разнообразии минералов-узников в кварцах и топазах Волыни. Можно было бы, например, высказать предположение, что минерал № 17 (см. табл. 21) окажется риннеитом ($FeCl_2 \cdot 3KCl \cdot NaCl$), № 27 нортупитом ($Na_3Mg(CO_3)_2 \cdot Cl$), № 24 просто сидеритом, а № 28 причислить к группе карналлита. Однако одних оптических данных для этого, конечно, еще недостаточно и совершенно необходимым является продолжение исследований с акцентом на выяснение элементного состава и рентгенографию каждого из представленных дополнительно 14 минералов. Многие из них могут оказаться новыми природными микроминеральными образованиями.

Выше были описаны в гигантских кристаллах кварца Волыни самые крупные в мире включения жидких, смешанных истинных и коллоидно-водных растворов, возникшие в завершающие моменты окончательного оформления кристаллов в их современном виде. Охлаждение герметизированных крупных порций кремнеземжелезосодержащих растворов до обычной температуры обеспечило выделение на стенках этих макрополостей минералов-узников, среди которых, по Л. А. Приказчикову, поддаются микро- и даже макроопределению «различные разновидности кремнезема, гидрогематит, гётит, пирит и каолиновая масса» [46, стр. 102]. Микроминералы *группы каолинита* находились в растворе включений в виде скрытокристаллических взвесей и нуждаются еще в дополнительной диагностике. *Гидрогётит* ($HFeO_2 \cdot nH_2O$)

Таблица 21

**Сводка признаков недостаточно изученных микроминералов-узников в морионах и топазах Волыни**

| № минерала | Форма | Окраска | Показатели преломления | Растворимость | Дополнительные сведения |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Изотропные | | |
| 14* | Короткостолбчатая | Бесцветный | $N < 1{,}408$ | $H_2O$++ | Без спайности |
| 27 | Изометричная и шестигранная пластинчатая | Бесцветный или желтоватый | $N = 1{,}519$ | HCl —— $HNO_3$ —— | Хрупок и не редок |
| 31 | Пластинчатая, удлиненная, прямоугольная | Бесцветный | $N = 1{,}528$ | $H_2O$ —— HCl —— | Редок |
| 9 | Треугольная, со срезанными вершинами | » | $N = 1{,}546$ | $H_2O$ ++ | Близок к галиту ($N = \pm 0{,}005$), но может оказаться новым |
| 8 | Неправильная | Серый (?) | $N = 1{,}566$ | $H_2O$+ | $N = \pm 0{,}06$ редкий, очень мягкий |
| 4* | Ксеноморфная, неправильная | Бесцветный | $N = 1{,}585$ | KOH дает осадок $H_2O$++ | Без спайности, в кристалло-газовых включениях |
| | | | Анизотропные | | |
| 13* | Округлый сферолит | Грязно-бурый | $1{,}408 > N \gg 1{,}375$ | $H_2O$ + | Крестообразное погасание, очень редок |
| 6 | Изометричная, округленная и призматическая | Бесцветный | $Ng = 1{,}464$ $Np < 1{,}408$ | $H_2O$ ++ с остатком | Совершенная спайность, удлинение +, редок |
| 28 | Пластинчатая, расщепленная | » | 1,471 1,468 | HCl —— | Угасание $< 30°$ зональное, $2V = 68°$, редок |
| 20 | Прямоугольная, вытянутая | | $Ng' = 1{,}491$ $Np = 1{,}402$ | | Закругления вершин, редок |
| 17 | Тонкопластинчатая, прямоугольная, сильно вытянутая | » | $Ng = 1{,}597$ $Np = 1{,}588$ | | Очень редок |
| 22 | Призматическая | | $Ng' = 1{,}609$ $Np' = 1{,}576$ | | Двуосный, $2V = 90°$, погасание прямое, удлинение +, очень редок |
| 11* | Таблитчатая, сильно удлиненная | Прозрачный темно-бурый | $\gg 1{,}782$ | $H_2O$— | Спайный, погасание прямое, удлинение +, очень редок |
| 24 | Изометричная, с пирамидальной вершинкой | Бесцветный | $Ng \sim 1{,}870$ $Np = 1{,}627$ | | $Ng \pm 0{,}020$, $Np \parallel$ оси $c$, редок |

Примечания:
1. Нумерация минералов в морионах со звездочкой (по Ю. В. Ляхову), в топазах без звездочки (по В. А. Калюжному) [29].
2. Обычная точность определений показателей преломления до $\pm 0{,}003$, аномальная—в дополнительных сведениях.
3. Растворимость +; хорошая растворимость ++; нерастворимые в воде —, в концентрированных кислотах ——.

образует микрооолиты, а *гётит* ($HFeO_2$) игольчатые кристаллики, встречающиеся также и в виде минералов-спутников позднекристаллизационного заполнения камер пегматитовых тел. Что касается разновидностей кремнезема, развитых в зональных корках на стенках очень крупных вакуолей жидких включений и имеющих мощность до 7—8 *мм*, то они поддаются обычной микрокристаллооптической диагностике в шлифах и среди них мы обнаружили следующий ряд низкотемпературного кремнезема: поздний β-кварц, серый радиально-лучи-

стый *халцедон, кварцин* (удлинение +, $Ng = 1{,}542$, $Np = 1{,}532$), *кохелонг* (?), растворимый в КОН, и *опал* (гидрофан — $N = 1{,}420$). *Пирит* в жидких включениях кристаллов кварца Волыни нами обнаружен не был, но нельзя думать, что Л. А. Приказчиков [46] мог ошибиться в его определении.

Кроме Волыни, минералы-узники многофазовых включений изучались с разной степенью достоверности в топазах из пегматитов Мурзинки [64], в мусковитах Мамско-Чуйского района [32], в бериллах из разных мест [56] и во флюоритах пегматитов Центрального Казахстана [18].

В. В. Якубова [64], изучая крупные многофазовые жидкие включения в топазах Мурзинки, осуществила водные вытяжки из богатых этими включениями участков минерала (при температуре 80° С в течение 6 *ч*) и после упаривания их до небольшого объема с помощью микрохимических реакций установила наличие Na, K, Mg и небольших количеств Cl, а затем провела спектральный анализ осадка (на медных электродах), получив сильные линии бора. Наиболее крупный по объему минерал-узник включений в форме бесцветных моноклинных кристаллов, на которых хорошо различаются грани, и в форме псевдогексагональных пластинчатых призм, отнесла к буре $Na_2(B_4O_7) \cdot 10H_2O$, растворение кристаллов которой во включениях при нагревании происходило в пределах температур до 50° С и во всяком случае ниже 100° С. При нагревании кристаллов буры в водном растворе ее растворимость при этих температурах достигает 34,5 вес.% и резко увеличивается в интервале 20—50° С (до 9,5 вес.%).

Таким образом, даже не прибегая к извлечению этого минерала-узника, автор дал обоснованную и, по-видимому, правильную его диагностику. Можно только пожалеть, что не было выполнено кристаллооптических определений хотя бы некоторых констант ($Ng - Np$, $2V$), существенно отличающих буру от близких к ней борного минерала кернита $Na_2(B_4O_7) \cdot 4H_2O$, с одной стороны, и сассолина $B[OH]_3$ — с другой. Что касается других наблюдающихся во включениях Мурзинки более мелких пяти минералов-узников, то среди них скорее всего присутствуют наиболее обычные галит и сильвин и во всяком случае их нельзя относить к той же буре, что мимолетно делает В. В. Якубова [64].

Мусковиты, будучи хорошо прозрачными, являются также очень благоприятными объектами для изучения (но из-за очень совершенной спайности не для экспериментального исследования газово-жидких включений) минералов-узников и минералов-спутников даже обычными микропетрографическими (кристаллооптическими) методами без вскрытия включений. Б. Е. Карским и Г. П. Луговским [32] среди твердых включений минералов-спутников и предшественников мамского мусковита было определено свыше 20 их представителей, относящихся к сульфидам, окислам, силикатам, фосфатам и карбонатам. Наиболее интересными для нас являются определения в качестве минералов-узников рутила, кальцита и апатита, находящихся внутри уплощенно-негативных жидких включений с газовым пузырьком, занимающим около 22% объема вакуолей, достигающих размеров до 5 *мм* в поперечнике.

Анизотропные призматические и игольчатые микрокристаллы *рутила* ($TiO_2$) в проходящем свете имеют светло-зеленый оттенок и значительный рельеф. *Кальцит* ($CaCO_3$), обнаруживающий совершенную спайность ($<76°$), кристаллизовался позднее рутила, представлен таблитчатыми микроиндивидами, обладающими высоким показателем преломления, заметной псевдоабсорбцией и в скрещенных николях высокими перламутровыми интерференционными окрасками. *Апатит* $Ca_3(PO_4)_3(F, Cl, OH)$ представлен длиннопризматическими уплощенными с поперечной отдельностью бесцветными или зеленоватыми микро-

кристаллами. Другие минералы-узники многофазовых жидких включений в мусковите не были определены из-за очень мелких размеров.

Изучая бериллы из разных месторождений, В. Г. Фекличев [56] также интересовался минеральным и химическим содержимым их первичных газово-жидких включений, а в пегматитах — кристалло-флюидными включениями расплавов-рассолов с содержанием твердых фаз до 60% по объему. Базируясь на химических анализах водной и солянокислой вытяжек и твердого остатка из включений в берилле грейзенового месторождения (Д. Н. Хитаров) и пегматита (Г. Ф. Галактионова), он пишет, что «минералы-узники представлены следующими достоверно определенными веществами: галит, сильвин, кварц, *мусковит, биотит,* кальцит. Остальные минералы достоверно не определены, но по свойствам предполагаются: гематит, альбит, танталит, фенакит, турмалин и др.» [56, стр. 97].

К сожалению, автор, по-видимому, не «разбуривал» включений и тем более не извлекал из них минералов-узников. Поэтому он не привел описания методов их определений, столь необходимых для дальнейшего развития ультрамикроминералогии. Однако В. Г. Фекличев, являясь тонким специалистом в области кристаллооптического изучения, вряд ли мог ошибиться в определении первых шести минералов даже без вскрытия включений.

Таким образом, если в морионах и топазах Волыни основное внимание уделялось кристаллооптическим (с иммерсией) методам изучения минералов-узников без извлечения и с извлечением их из вакуолей включений, но почти без предваряющего спектрального изучения состава аномальных для минерала-хозяина элементов и без химического анализа упаренных вытяжек и их сухого остатка, то, изучая минералы-узники в кварцах и топазах Мурзинки (Урал) и в бериллах грейзенов и пегматитов, исследователи включений поступили наоборот. Однако те и другие выполнили очень важную для науки кропотливую работу, добавив к списку минералов-узников включений кристаллообразующих жидких растворов и рассолов те или иные ультрамикроминералы, существующие до нашего времени в окружении образовавшей их герметизированной в очень малых порциях материнской среды.

Ю. В. Ляхов [41] с помощью З. И. Йорыш дал результаты рентгеноструктурного анализа по шести минералам-узникам. Однако для большинства из них даже и этот метод не мог обеспечить определенности в названиях исследованных микроминералов из-за того, что ранее их не встречали или не дали им каких-либо определенных наименований, т. е. не зарегистрировали в числе возможных для земной природы кристаллических образований.

Следует заранее сказать, что и мы при изучении во флюоритах очень сложных флюидных систем включений [18] не смогли выдержать всей намеченной программы развития и сочетания методов ультрамикроминералогии, хотя и попытались организовать коллективные комплексные исследования твердых микрофаз кристалло-жидких многофазовых систем включений с помощью В. Ф. Алявдина, В. А. Калюжного, С. И. Лебедевой, Г. М. Попова, Э. Роддера и И. И. Шафрановского.

По нашему мнению, такого рода межлабораторное комплексирование и взаимные консультации с использованием тонких нюансов опыта между учеными разной специализации может обеспечить наиболее успешное развитие ультрамикроминералогии как одной из самых тонких ветвей минералогии и термобарогеохимии. Эта ветвь науки уже теперь приобрела большое практическое и теоретическое значение для выращивания кристаллов и плавки спецстекол из природного сырья. Излагаемые ниже результаты принадлежат не только автору, но и в той или иной мере другим упоминавшимся ученым.

При изучении целого ряда пегматитоносных полей гранитных плутонов Казахстана в кристаллах ранних минералов камерного заполнения встречаются крупные (до 1 *мм*³) кристалло-флюидные включения расплавов-рассолов и рассолов (очень крепких многокомпонентных водных растворов). Среди представителей последней разновидности $Ж_в(Г_п+К_л+К_т+К_р)$ особенно сложными оказались включения из внутренних зеленых зон октаэдрических кристаллов флюорита пегматитов гранитного массива Бектауата. В этих жидких включениях гидротермальной рапы мы встретились с большим количеством минералов-узников, обособившихся из каждой капли очень крепкого водного рудоносного раствора в процессе ее остывания от 410° С до обычной температуры.

По морфологическим и кристаллооптическим данным во включениях установлено от 24 до 27 минералов-узников, в большинстве своем плавающих в растворе. Диагностика их, однако, оказалась почти недоступной с помощью обычных микровизуальных кристаллооптических наблюдений.

Контуры большинства даже объемных многофазовых включений в флюорите при обычной температуре были очень неясными из-за высокой концентрации заключенного минералообразующего раствора. Показатель его преломления оказался равным и даже немного превышающим таковой минерала-хозяина ($N=1{,}434$), а с нагреванием и растворением микрокристаллов он еще более увеличивался, что сопровождалось «проявлением» фазовых границ между жидкостью и стенками вакуолей.

Минералы-узники включений в флюорите существуют в настоящее время в окружении кислой материнской среды. Определенное микрокалориметрически и микроэлектрометрически (с платиновым электродом) при обычной температуре pH раствора равен $5{,}6\pm0{,}1$.

Понятно, что определение характера реакции растворов включений имеет известное значение и для диагностики минералов-узников. Однако из предварительных операций очень важны спектральные анализы самого минерала, насыщенного включениями, и особенно вытяжек из последних и их сухого остатка. Для дальнейшего изучения результаты этих микрохимических и спектральных анализов, конечно, сократили возможности вариаций в определениях минералов-узников иными способами.

После извлечения ряда микроминералов из их первичного места рождения — микровакуолей включений около половины из них получили названия. Многие другие твердые фазы, несомненно, являются еще не описанными новыми минералами, возникшими в условиях «строгой изоляции» порций минералообразующих растворов в результате снижения температур последних примерно на 400° С. В такого рода герметизированных природных системах осуществлялось сочетание в кристаллических решетках элементов (атомов, ионов, радикалов), так сказать, не на свободе, а в принудительных условиях. Резкие повышения концентраций вызывали далеко не всегда обыкновенные для земной коры сочетания элементов. В таких физико-химических условиях, безусловно, происходило образование новых микроминеральных индивидов, ныне еще не познанных.

Таким образом, ни гониометрия, ни определение показателей преломления в иммерсионных жидкостях, ни другие даже узко специальные приемы кристаллооптики, ни рентгенометрия в камере РКД и определения микротвердости на приборе ПИТ-3 (пока без использования рентгеноспектрального зондирования и лазерного микроспектроанализатора) не позволили нашему коллективу надежно определить более половины микроминералов-узников.

На рис. 43 можно видеть определенные разными способами сле-

дующие минералы-узники: галит ($N'=1{,}544$), сильвин ($N=1{,}490$), гематит, *ортохлорит* (пеннин? $Ng'=1{,}573$, $Np'=1{,}568\pm0{,}001$), *альбит* ($Ng=1{,}540$, $Np=1{,}530\pm0{,}002$), кварц, *рутил* (волосатик), циркон (гиацинт ? $Ng\gg1{,}78$), *серицит, ставролит* (бекетремит?) ($Ng'=1{,}748$, $Np=1{,}739\pm0{,}002$), *сфен* ($Ng$ и $Np$ очень высокие, $\sim2$ и 1,9), *магнетит*

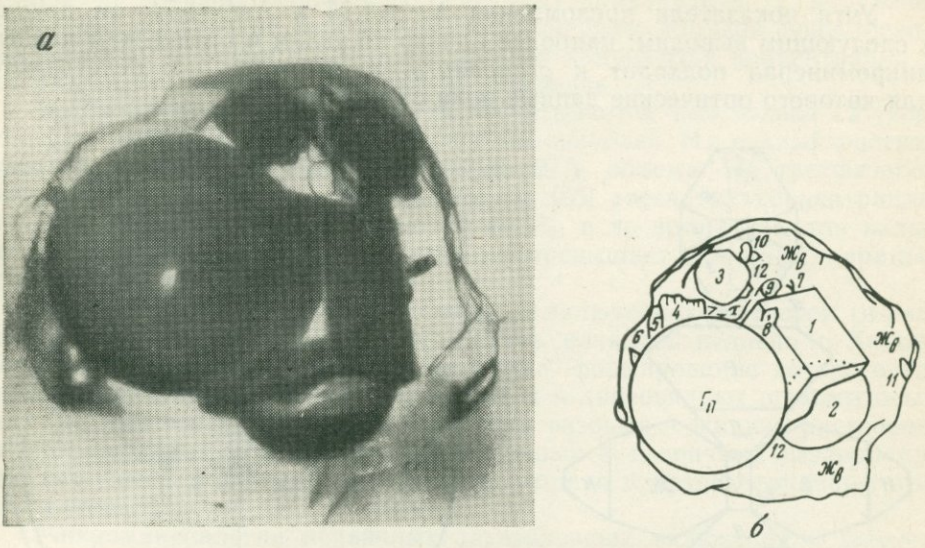



Рис. 43. Кристалло-жидкое включение в флюорите из пегматита Бектауата. Ув. 120

*а* — микрофотография; *б* — интраминералогия того же включения; *1* — галит; *2* — сильвин; *3* — гематит; *4* — ортохлорит-пеннин (?); *5* — альбит; *6* — кварц; *7* — рутил; *8* — циркон; *9* — мусковит (серицит); *10* — ставролит (?); *11* — сфен (титанит); *12* — неопределенные рудные минералы

(сильно магнитен). Среди непрозрачных рудных минералов нет сульфидов и сера в растворе включений не была обнаружена.

В образовании еще не определенных минералов-узников во включениях рассолов во флюорите, кроме ряда других элементов, уже частично использованных в микрокристаллах, должны участвовать также ионы $HCO_3^-$, $BO_3^{3-}$ и $F^-$ и такие металлы, как Ba, Cu, Pb, Zn, Mg и La, не входящие в состав перечисленных твердых фаз включений, но установленные химическими и спектральными анализами.

Из установленных с достаточной долей вероятности микроминералов-узников наибольшие трудности в определении вызвал ставролит (бекетремит), так как минералы ромбической сингонии, особенно в очень мелких индивидах, трудно диагностируются. Поэтому после его извлечения и определения показателей преломления было произведено гониометрическое измерение кристалла на двукружном гониометре. Результаты приведены в табл. 22. Развертка и общий вид минерала-узника изображены на рис. 44, его проекция на рис. 45.

В ограничении кристалла, как видно, принимают участие следующие простые формы:

1) первый тетраэдр (габитусный): сильно развитые шестиугольные грани б, е, ж, з (хорошо сохранили зеркальный блеск):

2) второй тетраэдр: менее развитые трапецевидные грани в, д, и, к (несколько протравлены);

3) пинакоид: прямоугольные грани а, г (хорошей сохранности).

Из элементов симметрии можно указать: центр и ось симметрии второго порядка, проходящую перпендикулярно граням пинакоида. Тетраэдр не относится к кубической сингонии, так как его грани составляют угол 70°30′.

В качестве исходных В. Ф. Алявдин, автор определителя кристаллов для ромбических минералов, взял следующие данные:

| $\rho_1$ | $\rho_2$ | $\rho_3$ |
|---|---|---|
| 54—56 | 36—34 | 90 |
| 35 | 54 | 90 |

Учтя показатели преломления $Ng' = 1{,}75$ и $Np' = 1{,}74$, он пришел к следующим выводам: наиболее близко по углам и оптическим данным микроминерал подходит к *ставролиту*, а по углам — к *бекетремиту*, для которого оптические данные пока отсутствуют.

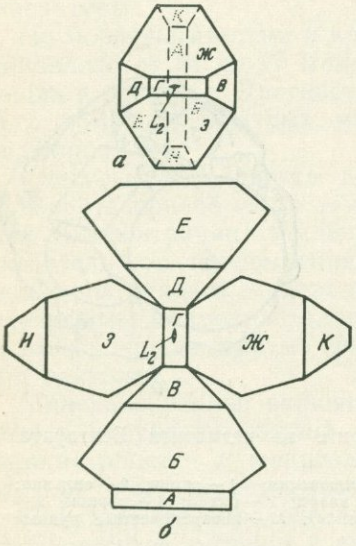



Рис. 44. Общий вид (*а*) и развертка (*б*) микроминерала-узника ромбической сингонии. Буквы на рисунке — стандартное обозначение граней кристалла

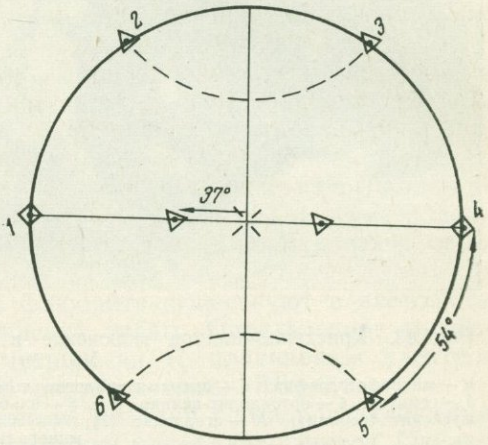



Рис. 45. Проекция микроминерала-узника

Таблица 22

**Результаты измерения углов между нормалями и гранями микрокристалла-узника на двукружном гониометре**

| 1-й пояс | | | | 2-й пояс | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Наименование граней | Углы между нормалями к граням | | Углы между гранями | Наименование граней | Углы между нормалями к граням | | Углы между гранями |
| | φ | ρ | | | φ | ρ | |
| а | 136°00′ | 90° | | а | 136°00′ | 90°00′ | |
| | | | 54°30′ | | | | 53°12′ |
| б | 190°30′ | 90° | | к | 136°00′ | 36°48′ | |
| | | | 70°58′ | | | | 70°18′ |
| в | 261°28′ | 90° | | ж | 316°00′ | 33°30′ | |
| | | | 54°32′ | | | | 56°30′ |
| г | 316°00′ | 90° | | г | 316°00′ | 90°00′ | |
| | | | 55°05′ | | | | |
| д | 11°05′ | 90° | | | | | |
| | | | 69°55′ | | | | |
| е | 81°00′ | 90° | | | | | |
| | | | 55°00′ | | | | |
| а | 136°00′ | 90° | | | | | |

В качестве дополнительных испытаний для лептохлорита С. И. Лебедевой были проведены точные измерения микротвердости, показавшие его близость к пеннину.

В изученных и еще изучаемых кристаллах флюорита из гранитных пегматитов камерного типа Центрального Казахстана от внутренней прозрачной зеленой зоны через среднюю замутненную к наружной бесцветной прозрачной зоне количество минералов-узников существенно уменьшается и, следовательно, во времени изменяются концентрация и состав жидких минералообразующих растворов.

Во включениях наружной зоны насчитывается уже только 12 твердых фаз, занимающих около 15% объема вакуолей. На водный раствор приходится 58% и на газовый пузырек 27% объема. По трехфазовой диаграмме $NaCl — KCl — H_2O$ Э. Роддер [85] рассчитал концентрацию хлоридов во включениях, равную 40 вес.%, в то время как для включений внутренних зон она несомненно превышает 50—55%, характеризуя гидротермальную рапу.

Изучение микроминерального мира во включениях растворов (и расплавов) минералов щелочных пегматитов началось недавно с Хибинского многофазового щелочного интрузива, формирование которого сопровождалось образованием гнездовидных и линзовидных пегматитовых тел. Последние подвергались воздействию газовых и жидких растворов, законсервированных в виде мнимовторичных и вторичных газово-жидких включений в эвдиалите, нефелине, эгирине и других типичных для них минералах.

Микроминералогия первичных затвердевших включений в различных разновидностях нефелиновых сиенитов освещается в конце главы. Здесь же мы коснемся изучения минералов-узников включений в эвдиалите пегматитов, осуществленного впервые С. В. Икорским в период с 1962 по 1966 г. [25].

Этот исследователь, кроме обычных двухфазовых газово-жидких включений, обнаружил сложные многофазовые системы разновидности $Ж_в + Ж_б + Г_х + Т_л > Т_б$, где «б» обозначает жидкие и твердые битуминозные вещества. По этой причине он оказался вынужден, кроме использования стандартной микроскопической аппаратуры, изучать включения в сине- и ультрафиолетовых лучах при освещении препаратов сверху. Такое изучение им проводилось с помощью люминесцентного микроскопа МЛ-2 и на обычном МИН-8 с дополнительным люминесцентным устройством. При этом С. В. Икорский применял светофильтры из стекла УФС-3 и ФС-1 для возбуждения люминесценции. В качестве запирающих для первых он использовал светофильтры из стекла ЖС-3, а во втором случае светофильтры, склеенные из стекол ЖС-18 и ЖС-19.

Закрепление очищенного в растворителях утолщенного шлифа макропрепарата на предметном стекле осуществлялось с помощью прозрачной липкой ленты. Это было необходимо для исключения при изучении под микроскопом фона люминесценции канадского бальзама. В таких же препаратах он применял для диагностики заключенных веществ методы минералогической термометрии с нагреванием под микроскопом до 580° С, а также водные вытяжки и инъекции дистиллированной воды внутрь «разбуренных» включений.

В одном из относительно крупных (доли миллиметра) газовых включений охлаждение первоначальной системы до обычной температуры обеспечило кристаллизацию серосодержащего битуминозного вещества ($C_nH_{2n+2}$, S-парафин), образовавшего на стенках вакуоли ромбовидный сетчатый узор удлиненно-ленточных пластинчатых микрокристаллов. Заметные количества серы экстрагируются из них хлороформом и при этом возникает густая маслянистая жидкость, в которой фиксируются высокомолекулярные парафины. Последние в инфракрасном свете обнаруживают, по С. В. Икорскому [25], полосы поглощения

в области 1467—1460 или 1380—1371 *см* и дублет полос в 736—720 *см*.

В эвдиалитах из пегматитовых тел 2 и 4, залегающих в среднезернистых эгириновых нефелиновых сиенитах, размеры многофазовых жидких битуминизированных включений достигали 0,08 *мм* в поперечнике. Жидкая фаза не показала явлений люминесценции в сине- и ультрафиолетовых лучах, а битумы в виде мелких люминесцирующих комочков располагались на границе этой жидкости и газового пузырька или выделялись на стенках включающих вакуолей. Кроме того, наблюдались выделения темного нелюминесцирующего вещества и розоватые изотропные уплощенные микрокристаллики, по-видимому, кубического *виллиамита,* которые при инъекции воды во включение полностью растворялись, а после ее испарения кристаллизовались снова. Подтверждением наличия в таких жидких включениях этого очень низкопреломляющего легкорастворимого фторсодержащего (NaF) минерала являются водные вытяжки из включений в эвдиалите, обнаруживающие содержание фтора до 0,0085 вес.%. Однако этот минерал оказался характерным и для затвердевших включений щелочных магматических расплавов-рассолов и более детально характеризуется ниже (см. фототабл. III, *б*).

Общий список достаточно надежно определенных минералов-узников включает у нас следующие их виды и разновидности: пирит, гематит, гидрогётит, гётит, магнетит, рутил, ставролит (бекетремит?), сфен, циркон, мусковит, серицит, биотит, ортохлорит (пеннин?), кварц, халцедон, кварцин, опал, альбит (адуляр?), бура (кернит?), апатит, кальцит, сидерит, криолит, виллиомит, эльпасомит, селенит, серосодержащий парафин и, наконец, самые обычные эндогенные микроминералы включений — галит и сильвин.

Из надежно установленных, но не имеющих названий, к этим микроминералам-узникам можно добавить еще два: водный хлорид двухвалентного железа и хлорид алюминия и цинка, который следовало бы назвать сорбитом в честь Сорби.

Другие минералы, такие как танталит, фенакит, турмалин, караколит, риннеит и нортупит, а также разные, но очень возможные кристаллогидраты — прозопит, гемафибрит, типлеит, несквегонит еще нуждаются в серьезной идентификации, так как по ним имеются в основном лишь кристаллооптические, да и то неполные константы.

Очень важны дальнейшие изучение и диагностика микроминералов газово-жидких включений из групп каолинита и карналлита, манганита и гидроокислов железа, а также гипсоподобного минерала и возможного карбоната бериллия.

То же относится и к остальным минералам-узникам (см. табл. 21), которые не могут еще получить даже предположительных названий и возможно являются сложными соединениями фторидов и хлоридов типа антарктита, кридита, гиератита, хиолита, а главное легкорастворимых хлоридов и сульфатов ряда обычных металлов, переносимых растворами в этом виде.

При рассмотрении первых результатов изучения ультрамикроминералогии включений газово-жидких геохимических сред применение ее методов касалось в основном минералов пегматитов и в небольшой степени грейзенов и гидротермальных жил. Это, по-видимому, связано с относительно крупными размерами кристалло-флюидных и газово-жидких многофазовых включений, хотя последние часто встречаются в скарновых и средне-высокотемпературных гидротермальных месторождениях. Из минералов-узников для них особенно характерны представители класса хлоридов и сульфатов, фторидов и карбонатов.

Среди достоверно установленных минералов-узников еще не выявлены представители типа сульфидов, за исключением пирита, и близких к ним минералов. В пегматитах относительно широко представлен

класс силикатов, частично боратов и фосфатов и очень широко тип галоидов (фториды, хлориды), причем окислы и силикаты были до охлаждения полностью растворены в концентрированных солевых водных растворах и рассолах.

*Изучение микроминералов во включениях затвердевших расплавов*

Совсем недавно начавшееся изучение микроминерального состава затвердевших полнораскристаллизованных и частично оставшихся стекловатыми включений может проводиться в шлифах и аншлифах с выведением включений на их поверхность путем полировки и тонкой дошлифовки. Требуются, по возможности, только самые большие увеличения обычного поляризационного, минераграфического (МИН-6, МИН-9) или металлографического микроскопа для изучения микрополикристаллических агрегатов таких включений.

При определении рудных минералов-узников включений наиболее подходящими для наших целей являются микроскопы отечественного производства МИН-7 и МИН-8, обеспечивающие возможности наблюдения микропрепаратов (шлифов и пластин) в светлом и темном полях в отраженном и поляризованном свете.

Все необходимые операции для диагностики минералов в проходящем свете известны из многих руководств по петрографии и кристаллооптике. Обычные методы определения физико-химических свойств и констант рудных минералов и многие специальные методы их изучения наилучшим образом освещены в отечественных руководствах С. А. Юшко [63] и И. С. Волынского [9].

Однако несмотря на высокую техническую и методическую степень подготовленности к микроскопическому наблюдению затвердевших включений в прозрачных и непрозрачных минералах магматических пород и руд мы все еще встречаемся с очень слабой изученностью таких включений. Более того, многие из них принимаются до сих пор за обычные акцессории или агрегаты обычных акцессорных минералов без учета специфики их генезиса и даже без возрастного разделения микроминералов-предшественников и спутников (см. главу 10) и микроминералов-узников затвердевших включений, возникших уже после кристаллизации каждого минерала-хозяина (см. главу 11).

При проведении массовых, часто очень дорогостоящих протолочек интрузивных пород все эти разные по времени и генезису акцессорные микроминералы сваливаются в одну кучу и изучаются не столько с генетических, сколько с формальных позиций фиксации их наличия в разновидностях гранитов и различных других интрузивных пород.

Между тем еще в середине прошлого века минералоги и петрографы начиная с Г. Сорби [91] научились отличать обыкновенные твердые акцессории изверженных пород от «каменных пустот» затвердевших раскристаллизованных и стекловатых включений под обыкновенными самыми простыми микроскопами. Однако в настоящее время, несмотря на очень высокую техническую вооруженность, появление электронных и инфракрасных микроскопов, микрорентгеновского анализа с помощью электронного зонда, оптического эмиссионного микроанализа и, наконец, лазерного микроспектрального анализа, мы все еще не имеем возможности привлечь широкое внимание к большой петрологической проблеме познания полного состава магм через их консерваты, сохраненные во включениях. Как отмечалось нами еще в 1950 г., информативность таких затвердевших включений для познания магматических расплавов несравненно более высока, чем широко и безудержно распространенные дорогостоящие силикатные анализы магматических пород, уже при кристаллизации утративших генетически очень

важные подвижные компоненты, плененные только в целостных системах включений в минералах этих пород.

Как показало первоначальное изучение кристалло-газовых включений, герметизирующихся в переходной среде остаточных расплавов-рассолов к гидротермальной рапе, содержащей силикатные и рудные (металлические) компоненты, мы и в самых обычных затвердевших включениях минералов интрузивных пород сможем встретить необычные сочетания микроминералов-узников, несравненно ближе стоящие к составу материнской магмы, чем сами горные породы. Это утверждение тем более правильно, что внутри таких включений сохраняются до наших дней легкорастворимые галоиды, а между интерстициями минералов-узников — газовые и жидкие компоненты магм. Эти петрологически многофазовые природные микросистемы допускают при повышении параметров (нагревание выше 1000° С) реставрацию капель первичной, гомогенной жидкой магмы и явления ликвации в ней, а также дают возможность проследить порядок плавления и нового рождения минералов-узников. Однако все эти возможности, даже статическое изучение и определение последних, все еще плохо используются. Мы можем здесь привести лишь отрывочные фрагменты изучения и определения объектов внутрикристальной петрологии и ультрамикроминералогии затвердевших включений в некоторых минералах щелочных, кислых и основных интрузивных пород, чтобы избежать столь нежелательного пропуска в этой отрасли петрографии и минералогии. Изучение таких включений пока проводилось в основном в лаборатории геологического факультета МГУ, Института геологии и геофизики СО АН СССР, в институтах кристаллографии и ГЕОХИ АН СССР. Во включениях минералов хибинских руд и щелочных пород в качестве минералов-узников затвердевших включений были выявлены виллиомит, содалит, калишпат и эгирин.

*Виллиомит* (NaF) был установлен в нефелинах [25] и апатитах Хибин [8] в качестве характерного минерала-узника для затвердевших и газово-жидких включений агпаитовых щелочных пород. Он образует округлые и ограненные кубические розовато-красные микрокристаллы с ребром до 0,06 *мм*. Его показатель преломления оказался ниже, чем у дистиллированной воды (1,333) и даже несколько меньше, чем у метилового спирта (1,329). Для виллиомита, по-видимому, характерен $N = 1{,}327—1{,}328$, он изотропен, в воде растворяется очень быстро, в течение 2—3 *сек*. Люминесцирует в голубовато-фиолетовом свете. В водной вытяжке мономинеральной фракции нефелина этот микроминерал обеспечивает содержание $F^-$ до 0,023 вес.%.

*Содалит* (гакманит) $Na_8(AlSiO_4)_6(ClS)_2$ — изотропный минерал-узник заполнения затвердевших включений в апатитах хибинских руд — установлен [8] с помощью микрорентгеновского электронного зонда, показавшего в нем наличие Si, Al, Cl, S, Fe, и кристаллооптически ($N \approx 1{,}488$). Под воздействием электронного луча он приобретает ярко-малиновую окраску что, по-видимому, связано с содержанием в нем сероорганических кислот. Наличие в микроминерале значительного количества серы позволяет его отнести к разновидности содалита — гакманиту.

*Калевый полевой шпат* (или нефелин ?) встречается в затвердевших включениях апатита с горы Юкспор совместно с содалитом (гакманитом). У него больший показатель преломления, чем у последнего, но меньший, чем у минерала-хозяина. В проходящем свете в минералах-узниках видны обособления газов (см. фототабл. XXIV, *а*). На электронном микроанализаторе четко выявляется наличие в минерале Si, Al, K и Fe, и он выглядит в поглощенных нейтронах более темным, чем содалит, от которого на рентгенограмме и спектрограмме отличается отсутствием Cl.

*Эгирин* ($NaFeSi_2O_6$) встречается часто в виде темноцветного минерала-спутника в комбинированных с каплями затвердевшего расплава включениях (апатиты горы Кукисвумчорр). Рентгеноэлектронный зонд показывает четкое наличие Si и Fe. В минералах-спутниках кристаллооптически определяется вполне достоверно, а в микроминералах-узниках, встречающихся не часто, может предоставить выбор в названии между акмитом и федеровитом, что уже относится к сфере дальнейшего развития методов ультрамикроминералогии.

В петрологическом отношении привлекает к себе внимание изучение и экспериментальное исследование образцов кислых магм, полно или частично раскристаллизовавшихся в микровакуолях кварцев и полевых шпатов гранитов и имеющих наибольшее распространение в земной коре. Для многих месторождений, органически связанных с кристаллизацией разнообразных руд из основной и ультраосновной магмы, такие затвердевшие включения особенно интересны (см. фототабл. III, *в*), так как содержат и сульфидные минералы, главные для промышленных залежей магматического происхождения (Норильск и другие месторождения).

Породообразующие минералы кислой магмы обычно содержат в своих вакуолях первичные затвердевшие включения с целым рядом микроминералов-узников, по составу сходных с главными и акцессорными, иногда рудными минералами гранитоидов.

Впервые в СССР эти включения привлекли внимание В. Ф. Лесняка, изучавшего под нашим руководством Эльджуртинский интрузив порфировидных биотитовых гранитов (Северный Кавказ) в связи со скарновым оруденением. В кварце этих юрских «холодных» гранитов малой глубины становления (до 0,5 *км*) оказались распространены неполно раскристаллизованные с серовато-белым стеклом затвердевшие включения, в которых газовая фаза занимала примерно до 25—30% объема, и несколько более поздние, многофазовые кристалло-газовые включения, в которых жидкость наблюдалась только по краям и в интерстициях между микрокристалликами, а газовый пузырек имел деформированную форму. В последних включениях различалось до девяти разных твердых фаз кубической, параллелепипедальной, дискообразной, челнокообразной, игольчатой, пластинчатой и неправильной формы, которые почти полностью (на 80—90%) заполняли вакуоли включений. Просвечивающие красным цветом пластинчатые кристаллы были определены в качестве *гематита*, а кубические минералы-узники были приняты им за *пирит* (?). Тщательная диагностика других микрокристаллов им не осуществлялась.

Более обстоятельная в этом отношении работа была выполнена в нашей лаборатории (МГУ) геологом А. В. Громовым, который в затвердевших включениях кварцев и частично полевых шпатов Кентского полифазного гранитного интрузива (Центральный Казахстан) в тщательно отполированных шлифах толщиной 0,003—0,005 *мм* определил восемь микроминеральных составляющих этих включений расплавов.

*Кварц* в качестве минерала-узника высаживается на стенках вакуолей с захватом собственных ультрамикрогазовых включений. Он наследует оптическую ориентировку кварца-хозяина или по углу угасания отличается от него на 3—5°. В наиболее ранних гранитах основной фазы внедрения в гипидиоморфнозернистых раскристаллизованных включениях кислых расплавов (см. фототабл. III, *г*) его относительное количество отвечает содержанию в породе. В поздних гранитах и включениях его объем достигает 60—80% объема вакуолей (см. фототабл. III, *д*) и этот кварц-узник в присутствии легколетучих, находящихся во включениях, иногда проявляет даже зонарный рост.

*Полевые шпаты,* калиевый и натриевый, являются также существенными минеральными составляющими раскристаллизованных вклю-

чений и иногда встречаются совместно, но чаще отдельно друг от друга.

*Микроклин* образует хорошо ограненные таблитчатые, не сдвойникованные кристаллы-узники размером в длину до 0,05 *мм* и характеризуется пелитизацией.

*Альбит* в виде вытянутых таблитчатых кристаллов до 0,07 *мм* в длину тяготеет к краям затвердевших включений и иногда обнаруживает полисинтетическую двойниковатость.

*Биотит,* довольно обычный микроминерал-узник включений затвердевших кислых расплавов, образует ксеноморфные чешуйки до 0,04 *мм* в поперечнике, чаще всего тяготеющие к центральной их части. Характеризуется стандартными кристаллооптическими показателями.

*Акцессорные* минералы кентских гранитов — *циркон, флюорит, сфен, апатит* и *рудные минералы,* а также некоторые неопределенные бесцветные, прозрачные, анизотропные и изотропные минералы — оказываются часто приуроченными к кристаллическому заполнению затвердевших включений и несомненно попадают в протолочки пород. В большой мере их хорошая огранка (идиоморфность) связана со свободной кристаллизацией из замкнутых в виде включений капель расплавов. Циркон встречается в виде дипирамидально-призматических микрокристалликов с очень высокими показателями преломления. Флюорит часто встречается в округлооктаэдрическом как бы оплавленном и реже кубическом виде как обычный акцессорий и в качестве изотропного минерала-узника включений. Он имеет показатель преломления немного ниже, чем у стекла, и поэтому как бы имитирует однофазовые включения последнего, особенно при наличии округлой формы.

Те или иные оптические константы указанных минералов-узников определялись в сопоставлении с нормальными акцессорными минералами гранитов с использованием больших увеличений поляризационного микроскопа (1800 раз). А. В. Громовым совместно с Е. М. Крестиным в оливинах из трапповых никеленосных интрузивов Курейского района были при тех же условиях определены во включениях основных рудоносных расплавов *пироксен, плагиоклаз* и *рудный минерал* (?), а в раскристаллизованных включениях внутри плагиоклазов из этих же пород выявлены *оливин, ромбический и моноклинный пироксены* (в проходящем свете), а также халькопирит, пирит и пирротин (?) (в отраженном свете) (см. фототабл. III, *в*).

Таким образом, в вакуолях включений расплавов разного состава к настоящему времени надежно определено 20 минералов-узников, а ряд других ожидают более полной, чем теперь, физической и химической характеристики. Изучение и экспериментальное исследование микроминералов-узников кристаллического заполнения вакуолей затвердевших включений в дальнейшем позволит детально изучить эволюцию магматических расплавов и определить их состав и температуры, что представляется наиболее важным для месторождений магматически кристаллизационного и ликвационного типов.

Освещенные методики и операции по минералогическому методу даже с пропусками некоторых микропроцедур, в частности ультрамикрохимического анализа маточного раствора, позволяют получить большую информацию для диагностики минералов-узников включений, состав которых помогает уточнять состав минералообразующих сред. Эта информация может быть при современных новых технических средствах значительно более полной, хотя и не гарантирует в ряде случаев надежной идентификации минералов-узников включений с уже известными минералами, входящими в состав пород и руд земной коры. Последние образовались в «свободных» условиях негерметизированных эндогенных и экзогенных геохимических сред, из которых

организация самостоятельных кристаллических решеток минералов происходит выборочно, так как другие сочетания оказываются менее подходящими. В условиях более открытых, чем замкнутых, систем удаляются и рассеиваются, без фиксации в виде минералов очень многие транспортирующие и кристаллизующие соединения элементов. Это в первую очередь относится к легкорастворимым веществам, образующим минералы солей, временное существование которых обеспечивается лишь низкими параметрами температур и давлений, характерными для экзогенных условий минералообразования.

В полностью герметизированных системах включений ювенильных растворов и расплавов в результате приведения их к обычным температурным и другим условиям при полной герметизации происходило принудительное сочетание элементов в кристаллических решетках минералов-узников с необычными физическими и химическими их свойствами, например хлоридов железа, алюминия, свинца, цинка и других металлов. Короче говоря, они представляют собой частично новые минералы, еще не известные в обычных условиях земной коры и ее поверхности, но существующие только в виде реальных микрообъектов, определяющих необходимость развития ультрамикроминералогии включений в качестве особой ветви генетической минералогии. Термобарогеохимия и эта новая ветвь минералогии имеют очень большое будущее для познания физической химии природных эндогенных растворов и расплавов, законсервированных во включениях, и минеральной природы вообще.

Никому, даже самым педантичным минералоописателям прошлого и нашего века, мы не можем бросить упрека в отсутствии должного внимания к минералам-узникам систем включений геохимических сред, так как остается еще много непознанных *минеральных макрообъектов* земной коры, о чем свидетельствует, например, регистрация все новых и новых минералов. Без должного развития наук о минералах и рудах в их статическом состоянии невозможно было надеяться и на развитие термобарогеохимии, на выявление генезиса эндогенных рудных месторождений металлов и неметаллов в обязательной триаде: геологическая обстановка — минералообразующая среда — парагенезисы руд.

В оставшуюся треть XX века, который в социальном и научном отношениях будет выдающимся в истории человеческих дерзаний, несомненно и в этой частной проблеме естествознания будет достигнуто органическое слияние и взаимодействие данной триады при углубляющемся познании минерального мира Земли. Гарантией этого является все большее совершенствование технических средств и нарастающее понимание новых методов исследования микро- и ультрамикрообъектов неорганической природы для полноценного использования данных, полученных в сфере третьего канала генетической информации.

## Глава 21

## МИНЕРАЛОГИЧЕСКАЯ ТЕРМОМЕТРИЯ ГЛУБИННЫХ ПРОЦЕССОВ РУДООБРАЗОВАНИЯ

### *Основные направления развития геологической и минералогической термометрии*

Взаимосвязанные термодинамические параметры — температура и давление, обусловливающие изменения состава, концентрации и фазового состояния глубинных растворов, настолько существенно регулируют ход процессов пневматолитово-гидротермальной минерализации, что при развитии науки о рудообразовании давно были предприняты

попытки оценки этих данных и определения их относительных и истинных величин.

В области термометрии глубинных процессов более ста лет назад определились и начали развиваться три основные направления исследований:

1) прямые измерения температур лав, газовых фумарол и жидких термальных источников, а также косвенные суждения о температурах магм по степени оплавленности ксенолитов в магматических породах и ококсованию углей на контактах с интрузивными породами;

2) использование природных минералов и их парагенезисов для суждения о температурах на основе изучения морфологии кристаллов, их структур, физических и химических свойств, а также использование экспериментальных данных по выращиванию кристаллов в искусственных средах с известными физико-химическими параметрами;

3) термометрия глубинных процессов и режимов рудообразования по газово-жидким включениям в минералах.

Первое направление, заключающееся в непосредственном измерении температур эндогенных сред минерализации, прорывающихся на поверхность Земли, несомненно, является наиболее точным. Однако в условиях резкого спада давления расплавы и растворы действуют иначе, чем на глубине, и образуют часто аморфные, а не кристаллические массы минеральных веществ.

При движении вверх рудообразующие растворы сбрасывают значительную часть своего минерального груза и выходят на современную поверхность существенно обедненными, не способными образовывать сколько-нибудь значительные рудные скопления. В то же время на значительной глубине в условиях постепенных изменений в подвижном равновесии температуры и давления происходит в подавляющем большинстве случаев не быстрое, а последовательное, *постепенное выделение* рудоминеральных веществ.

Именно вследствие очень резкого нарушения подвижного равновесия между взаимосвязанными температурой и давлением результаты измерений температур растворов, осуществленные на поверхности земли, несмотря на их очень большой общенаучный интерес, имеют ограниченное значение для понимания глубинного рудообразования.

Косвенные методы геологической термометрии, основанные на экспериментальном плавлении пород с добавками минерализаторов и сопоставлении полученных данных со степенью метаморфизма и оплавленности ксенолитов в интрузивах, дают приблизительное представление о температуре магм, кристаллизовавшихся на глубине. Интрузии, проникшие в угленосные толщи по трещинам, вызывают на контактах превращение углей в кокс и по степени ококсования, выявляемой химическими анализами, создается возможность объективно судить о примерных температурах внедрявшейся магмы.

Это первое направление термометрических исследований, включающее изучение равновесных соотношений фаз в интрузивных и метаморфических породах и непосредственное измерение температур экзогенных геологических процессов на поверхности земли (солеотложения, выветривание и др.), относится к области так называемой *геологической термометрии.*

Два других направления термометрических исследований, основанные на использовании самих минералов как показателей возможных температур и на экспериментальных исследованиях остатков минералообразующих сред, сохранившихся в минералах в виде газово-жидких и затвердевших включений, были объединены нами под названием *минералогической термометрии* [17] (1950).

Методы минералогической термометрии, как видно из схемы, очень разнообразны сами по себе и предоставляют исследователям разные

**Методы минералогической термометрии**

| Использование минералов и их парагенезисов | | | Использование включений остатков минералообразующих сред | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Минералографический | Экспериментально-физический | Геохимический | Микротермометрический | Визуально-вычислительный | Декрептометрический |
| Морфология и ассоциация минералов: эволюция габитусов, эвтектики, перекристаллизация; парагенезисы на месторождениях | Физические свойства: полиморфные превращения, плавление и разложение, электропроводимость, фотоупругий эффект, распад твердых растворов, плотность минералов | Химический состав и синтез: содержание примесей, распределение альбита, изотопия элементов, температуры синтеза | Гомогенизация включений нагреванием: измерения относительных температур, определения истинных температур | Соотношение фаз во включениях: эмпирические кривые, логарифмические формулы, уравнения и диаграммы | Взрывание (декрепитация) включений: оптическая фиксация, акустическая регистрация, батиметрические записи |

возможности измерений температуры или косвенных суждений о ней.

Наличие обобщающих работ по интересующему нас предмету Н. Боуэна [69], Г. Зейферта, автора [17] и Э. Ингерсона [74], а также книги Ф. Смита [88], посвященных геологической термометрии по включениям в минералах, и работы Г. Кулеруда [77] о сульфидных системах как геологических термометрах позволяет представить лишь основные мотивы минералогической термометрии.

В первой группе методов и методик (см. схему), базирующихся на использовании самих минералов и их парагенезисов на месторождениях, могут быть выделены три главных метода:

1) *минералографический,* использующий морфолого-кристаллографические особенности минеральных образований, вариации габитусов кристаллов одного и того же минерала и особенности срастаний минералов;

2) *экспериментально-физический,* основанный на установлении и использовании физических свойств минералов;

3) *геохимический,* опирающийся на аналитические определения химического состава, изотопию элементов и на экспериментальное воспроизведение минералов в параметрах искусственно созданной среды.

Суждения о температурах по самим минералам и рудам относятся в большинстве случаев к косвенным методам глубинной термометрии и встречаются еще с очень большими трудностями. Выделение твердых фаз из минералообразующих расплавов или растворов обусловливается не только одним температурным параметром, но одновременно и рядом других важнейших физико-химических факторов — давлением, концентрацией и составом, кислотностью и щелочностью растворов, — накладывающих отпечаток на те или иные свойства минералов и их парагенезисов, которые привлекаются к оценке температуры. В то же время эти разнообразные факторы в природном процессе минерализации еще не могут оцениваться по самим минералам с должной степенью достоверности.

Геохимический метод, относящийся как к природным, так и к синтетическим объектам, представляется перспективным и по значению близко стоит к группе методов, основанных на использовании газово-жидких включений. Эти методы позволяют получать цифровые значения относительных и истинных температур глубинного рудообразования. Более того, здесь выявляются новые возможности для дальнейшего развития минералогии и геохимии процессов эндогенного рудообразования, а также для введения поправок и взаимной корреляции данных по

термодинамическим параметрам, выявляющимся по газово-жидким включениям в минералах.

Ко второй группе методов минералогической термометрии относятся методы, при которых используются включения растворов и расплавов:

1) *микротермометрический метод,* основанный на гомогенизации включений нагреванием, — наиболее важный для минералогической термометрии глубинных процессов рудообразования;

2) *визуально-вычислительный метод,* связанный с измерениями и вычислениями соотношений объемов газовой и жидкой фаз в низкотемпературных растворах включений;

3) *декрептометрический метод,* основанный на взрывании газово-жидких включений путем их перегрева сверх температур гомогенизации и фиксации температур разрывов их вакуолей с помощью той или иной техники и методики.

В каждом из кратко охарактеризованных шести методов мы встречаемся с определенной спецификой в подходе к суждениям и измерениям температур глубинного минералообразования и с разными ограничениями в их оценке.

*Минералографический метод.* Еще в 1914—1935 гг. В. Маухером [80] и Г. Кальбом [75] отмечалось, что минералы одинакового состава в разных генерациях из различных месторождений далеко не всегда имеют одинаковый облик. Затем было установлено, что изменения форм кристаллов одного и того же минерала в процессе роста так или иначе регистрируют изменения физико-химических параметров природной среды кристаллизации, в том числе и температуры.

Однако до сих пор надежная корреляция между формой кристаллов и температурой их образования еще отсутствует. Все же смена габитусов кварца, флюорита и ряда других минералов фиксирует относительные изменения от высоко- до низкотемпературных образований, хотя и не дает возможности определять цифровые значения температур природных процессов миералообразования.

Такое положение сохранится впредь до установления влияния на форму кристаллов других связанных с температурой факторов, также регулирующих взаимодействие в системе среда — кристалл.

Структуры эвтектики, иногда встречающиеся в природе, могут в общем виде представить только максимальные значения температуры формирования каждой данной ассоциации минералов, но при их использовании всегда требуется доказать, что они не связаны с перекристаллизацией, замещением или иными явлениями, которые могли протекать при температурах, совершенно отличных от температур первичных прорастаний.

Некоторые самородные металлы при нагревании претерпевают перекристаллизацию: самородное серебро при 200° С, а медь при 400—450° С. Если при нахождении этих и других самородных металлов в природе не устанавливается признаков перекристаллизации, приходят к справедливому выводу о том, что их образование происходило при каких-то более низких температурах и содержащие их руды не претерпевали позднейшего прогревания до известных температур перекристаллизации.

Использование минеральных парагенезисов гипогенных месторождений для оценки порядка температур рудообразования — высокой, средней и низкой — в общем эмпирически оправдано.

Таким образом, первый метод полезен только для суждений о порядках температур минералообразования, но не для определения каких-либо их цифровых значений.

*Экспериментально-физический метод* установления и использования различных физических свойств минералов пригоден для суждений

о тех или иных пределах температур, часто далеких от условий природного минералообразования.

Наиболее важны *температуры полиморфных превращений* в энантиотропных парах, уже давно привлекшие внимание в отношении минералогической термометрии. Однако они требуют осторожного подхода, так как их истинное значение сильно зависит от давления, геохимической среды кристаллизации и примесей в минералах. Практически наиболее важная точка инверсии $\alpha \rightarrow \beta$ кварца испытывает колебания в интервале давлений от 1 до 3000 *атм* при 80° С, а при давлении 7500 *атм* превращение осуществляется при 734,5° С. Кварц, выращенный в присутствии германия, претерпевает превращение на 40° С выше, а в присутствии лития и алюминия — на 120° С ниже температуры превращения кварца без примесей. Таким образом, наличие примесей в минералах руд существенно понижает или повышает температурные точки их инверсии.

Среди рудных минералов наиболее важными для минералогической термометрии являются параморфозы халькозина, сульфидов и теллуридов золота и серебра; ограничения в их использовании были освещены нами ранее [17].

Экспериментально определенные *точки плавления* многих гидротермальных минералов находятся часто выше температур их образования на 500—1000° С. Только изредка температуры плавления низкотемпературных гидротермальных минералов, например самородного висмута, могут быть близкими к реальному верхнему температурному пределу их выделения в рудных парагенезисах.

*Температуры диссоциации и разложения* минералов, в очень большой мере зависящие от неизвестных нам величин давлений, при которых они выделялись в природе, могут указывать лишь на то, что возможная температура минералообразования была существенно ниже температуры точки разложения этих минералов.

Изменения некоторых физических свойств минералов (термолюминесценция и окраска), как установлено, относятся не столько к условиям их образования, сколько к наличию в них примесей хромофоров или к последующим температурным и лучевым воздействиям. Хотя между окраской минералов и изменениями температурных условий кристаллизации, например во флюорите, иногда существуют сингенетические связи, последние пока недостаточно изучены.

Тем более они не могут быть увязаны с цифровыми значениями температур. Это еще в большей мере относится к явлениям люминесценции минералов, пород и руд.

В *пиритовом геотермометре,* основанном на электропроводимости, зависящей от разной степени совершенства кристаллической решетки минералов, не учитывается влияние на их структуру состава растворов, изменений температур и скорости роста кристаллов. Поэтому не только абсолютные значения температур, но даже их относительные величины не могут определяться измерением термоэлектрических потенциалов.

*Фотоупругий эффект,* выражающийся в виде гало* повышенной интерференционной окраски вокруг твердых минералов-спутников, заключенных в некоторых высокотемпературных минералах (алмазы, гранаты, полевые шпаты и кварцы), связан с различиями в коэффициентах сжимаемости пар минералов (спутников и хозяина) при охлаждении и термическом расширении. Этот новый способ суждения о вероятных температурах представляется интересным, но остается еще экспериментально не подтвержденным. Необходимо накопление дан-

---

* Ореол изменения оптических свойств в минерале-хозяине, возникающий в результате упругих напряжений вокруг твердых включений минералов.

ных, получаемых этим методом, и их сопоставление с данными по освоенным методам минералогической термометрии.

*Температуры распада* первично возникших твердых растворов, если таковые доказаны, указывают на минимально возможные температуры минералообразования. Температура гомогенизации нагреванием пары минералов, обособившихся после кристаллизации, наоборот, является для них максимальной температурой образования. Следует иметь в виду, что температуры распада зависят от количественных соотношений двух компонентов, а любой третий будет изменять температуру гомогенизации такой, становящейся более сложной системы. При этом необходимо изучать влияние давления на температуру распада и длительность нагревания.

Из кратко рассмотренных методов, использующих физические свойства минералов, наиболее интересными являются использование точек обратимых превращений минералов и температур распада и гомогенизации твердых растворов. Оценка температур образования минералов по изменениям свойств остается пока не обоснованной.

*Геохимический метод* использования особенностей химического состава минералов, их синтеза и изотопного состава входящих в них элементов отличается значительным разнообразием подходов к решению вопроса и основан на качественных показателях.

*Состав смешанных кристаллов* (изменения в содержании примесей) как показатель температуры их выделения наиболее основательно рассмотрен для железосодержащих сфалеритов, находящихся в равновесии с пирротином и пиритом, а также для пары пирротин и пирит по содержанию серы. Он существенно зависит от давлений, которые остаются неизвестными. Кривая Кулеруда, построенная по искусственным сульфидам, вероятно, может быть использована только для относительно низкотемпературных сфалеритов примерно в пределах до 8—10% содержания сульфида железа, так как более высокие их значения плохо увязываются с испытаниями по другим методам и общими представлениями о температурах гидротермального процесса.

На изучаемой зависимости изоморфизма в минералах от фактора температуры основан так называемый двухполевошпатовый геологический термометр, предложенный Т. Бартом [67]. Он базируется на точном определении составов равновесно сосуществующих полевых шпатов и на связи температуры магматической кристаллизации с *распределением альбитовой молекулы* между ортоклазом и анортитом. Мольные доли альбитового компонента наносятся на диаграмму изотерм равновесного его распределения и затем с помощью термодинамического расчета по фазовым равновесиям указанных полевых шпатов судят о природных минимальных температурах образования изверженных и метаморфических полевошпатовых пород.

Несмотря на влияние факторов давления и неизвестной скорости охлаждения пород, состава межпоровых флюидов, размеров полевошпатовых зерен использование указанной диаграммы при равновесных ассоциациях полевых шпатов представляется оправданным для интервала температур 500—700° С, но, к сожалению, неприменимо к месторождениям гидротермально-пневматолитового генезиса.

*Использование изотопии некоторых химических элементов в составе минералов,* по-видимому, имеет хорошие перспективы в минералогической термометрии низких и умеренных температур. Метод основан на расчете фракционирования изотопов некоторых легких элементов, в первую очередь кислорода, углерода и серы. Проведенные в СССР первые опыты в этом направлении дали удовлетворительную сходимость с результатами гомогенизации газово-жидких включений, находившихся в тех же низкотемпературных минералах (кальцит).

Наибольшая перспектива намечается в связи с использованием

ряда элементов в самих растворах и минералах-узниках газово-жидких включений. Однако фракционирование изотопов отчетливо уменьшается с повышением температур гидротермальных растворов, и в этом будут заключаться главные ограничения в использовании этой методики для целей термометрии глубинных процессов.

*Гидротермальные синтезы минералов* представляют собой важные данные для проведения аналогии с природными процессами, но пока еще ни одна искусственная гидротермальная система не разработана по отношению к какому-либо минералу для всей серии наиболее вероятных природных составов, концентраций, температур и давлений минералообразующих растворов, из которых данный минерал мог кристаллизоваться. Сочетание всех этих параметров в природе могло сильно отличаться от созданных в лабораториях искусственных систем кристаллизации. Поэтому определенные цифры температур, полученные на основании синтеза, нельзя приписывать природным минералам, встреченным на месторождениях. Искусственные кристаллы не могут служить также и достаточно надежными опорными температурными эталонами для градуирования некоторых физических величин, например термоэлектрического потенциала для пирита и, вероятно, для химических сопоставлений с природными кристаллами (примеси).

Обращаясь к оценке геохимического метода со всеми его методиками, необходимо прежде всего отметить, что он основан на мере и числе, на точных анализах минеральных систем и синтезе минералов, но требует еще дополнительного обоснования.

### *Визуально-вычислительные методы*

Визуальное изучение и измерение фаз включений под микроскопом позволяет для гидротермальных минералов иметь только приблизительные объективные суждения о температурах минералообразующих растворов. Первые наиболее важные попытки в этом отношении принадлежат Г. Сорби [31]. Среди множества его научных достижений основание петроминералогической микроскопии и проблема использования микровключений растворов и расплавов в минералах, породах и рудах стоят на первом месте.

Подбор кристаллов с включениями правильной формы проводился нами в течение ряда лет и затем с помощью Р. Ф. Сухорского были выполнены тщательные трудоемкие измерения соотношений фаз газ — жидкость в кристаллах кварца Полярного и Среднего Урала, Алдана, Алтая, Волыни, Салаира и других мест.

Опорные точки закономерно расположились в координатах температура — объем газа так, что позволили вычертить правильную кривую отношения температур (отложены по ординате) и процентного содержания газовой фазы во включениях (отложено по абсциссе). Было важно проверить пригодность этой кривой (рис. 46, *I*) для оценки возможных температур кварцеобразования. Проверка проводилась так, что один наблюдатель, точно измерив фазовые отношения во включении (или группе включений), воспользовавшись выведенной кривой, определял возможную температуру, а другой — независимо определял эту температуру непосредственным измерением момента гомогенизации в термокамере. Результаты подобных испытаний сведены в табл. 23.

Таким образом, ряд проверок этой кривой дал для низкотемпературной стадии образования гидротермального кварца (до 200° С) удовлетворительные результаты. Однако в высокотемпературных кварцах вследствие влияния больших давлений и концентраций растворов нами не было установлено такой согласованности результатов. Тесная взаимосвязь между отношениями фаз и температурой здесь утрачивается

еще и потому, что газовый пузырек сжат вследствие сокращения объема включений в результате выделения родственного вещества на их стенках. Исследования усложняются и тем, что они должны проводиться с учетом поправок на состав и концентрацию растворов, а также соотношений объемов не только жидкой и газовой, но и различных твердых фаз минералов-узников.

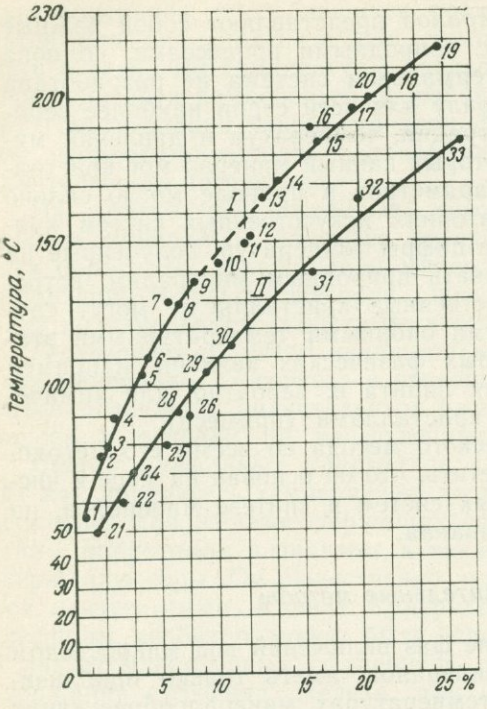



Рис. 46. Кривые для визуального определения температур образования гидротермального кварца (*I*) и кальцита (*II*) (по Н. П. Ермакову и Р. Ф. Сухорскому). Цифры на кривых — номера точек

Для кальцита эмпирическая кривая была выведена на основании материалов из месторождений исландского шпата Средней Азии, свинцово-цинковых месторождений ДВК и сравнительно высокотемпературных образцов исландского шпата из месторождений в траппах Якутии. Эта кривая представляется нам менее достоверной, чем для кварца, так как измерения объемных отношений в кальцитах ввиду обычно неправильной формы включений еще более затруднительны, чем в кварце. В наиболее удачных включениях с помощью В. Ф. Лесняка были измерены процентные содержания газа и температуры гомогенизации (табл. 24).

Как видно, полученные точки оказались несколько разбросанными на диаграмме температура — объем газа во включениях (см. рис. 46, кривая *II*), но несмотря на это они расположились в общем правильно. Это позволило нам получить в первом варианте среднюю кривую для кальцита.

Причины отклонения полученных для кварца и кальцита точек от выведенных средних кривых связаны не только с некоторой неточностью замеров под микроскопом, но и с различными коэффициентами

Таблица 23

**Сопоставление температур по эмпирическим кривым и методу гомогенизации для кварцев**

| Номер и место взятия образца | % газа (пара) | Температура, полученная по кривой, °С | Температура гомогенизации того же включения, °С | Разница, °С |
|---|---|---|---|---|
| 6, Волынь | 2,50 | 80 | 80 | — |
| 1, Барнавадж (Памир) | 6,20 | 120 | 113 | 2 |
| 5, Парнук (Полярный Урал) | 6,45 | 122 | 120 | 2 |
| 27, Ойон (Алдан) | 14,63 | 171 | 170 | 1 |
| 5, Парнук (Полярный Урал) | 15,80 | 175 | 180 | 5 |
| Забайкалье | 21,00 | 200 | 200 | — |
| 20, Кочкарь (Средний Урал) | 21,50 | 202 | 206 | 4 |
| 5, Парнук (Полярный Урал) | 26,7 | 224 | 233 | 9 |

Таблица 24

**Соотношение объем газа — температура гомогенизации в жидких включениях кальцита**

| № точки на кривой | Место взятия образца | Объем газа, % | Температура гомогенизации, °С |
|---|---|---|---|
| 21 | Средняя Азия | 1,5 | 50 |
| 22 | » » | 3,3(?) | 60 |
| 24 | » » | 3,67 | 70 |
| 25 | Якутия | 6,3 | 80 |
| 26 | ДВК | 8,0 | 90 |
| 28 | Средняя Азия | 7,2 | 92 |
| 29 | Якутия | 9,0 | 105 |
| 30 | » | 11,0 | 115 |
| 31 | ДВК | 16,6 | 140 |
| 32 | Якутия | 20,0 | 165 |
| 33 | » | 27,0 | 185 |

температурного расширения и сжатия самих минералов и включенных растворов. Кроме того, здесь могли сказываться различия в концентрации этих растворов и в величине гидростатического давления. Влияние последнего по крайней мере для кальцита мы старались исключить тем, что отбирали образцы из месторождений заведомо малой глубины образования. Однако точные определения концентраций включенных растворов не были тогда доступны. Можно утверждать только то, что в двухфазовых включениях низких температур заполнения имеются относительно слабоконцентрированные растворы, но количество растворенного вещества в них все же должно несколько варьировать. Именно поэтому нам встречались случаи одинакового отношения фаз в двухфазовых включениях одного и того же минерала, показавшие несколько различные температуры гомогенизации.

Одной из важных причин расхождения температур гомогенизации включений, находящихся в разных минералах, но имеющих одинаковые отношения фаз, является различие в термическом расширении (и сжатии) этих минералов. Разница в объемном расширении некоторых минералов, в том числе кварца и кальцита, видна из табл. 25.

Таблица 25

**Величины объемного расширения минералов при нагревании (в %)**

| Минерал | Температура, °С | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 50 | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 | 600 |
| Кварц | 0,17 | 0,36 | 0,56 | 0,78 | 1,03 | 1,27 | 1,56 | 1,87 | 4,50 |
| Флюорит | — | 0,16 | — | — | — | — | — | — | — |
| Кальцит | — | 0,08 | — | 0,21 | — | — | — | 0,60 | 1,14 |
| Берилл | — | 0,061 | — | 0,079 | — | — | — | — | — |
| Топаз | — | 0,03 | — | 0,09 | — | — | — | 0,20 | 0,35 |
| Ортоклаз | — | 0,12 | — | 0,34 | — | — | — | 0,76 | 1,23 |

Из этих данных можно видеть, что если в кварце и кальците при одинаковой температуре законсервирован во включении раствор одинаковой концентрации, то при охлаждении до комнатной температуры объем газового пузырька в кальците будет больше, чем в кварце настолько, насколько меньше температурный коэффициент расширения (и сжатия) у кальцита по сравнению с кварцем.

Отсюда ясно, что одинаковые относительные объемы газового пузырька в кварце и кальците фиксировали различные температуры момента консервации гидротермального раствора, более высокие для кварца. На диаграмме кривых зависимости степени наполнения и температур гомогенизации включений в кварце и кальците, находящихся в сравнении с кривыми для воды и 10%-ного раствора солей (рис. 47), показаны три достаточно точных измерения величины газового пузырька и температуры заполнения в флюорите из Куликолона: точка 34 — объем газа 7,3%, температура гомогенизации 105° С, точка 35 — 8,7% и 118° С, точка 36 — 9,6% и 125° С. Как видно, намечающаяся эмпирическая кривая для флюорита, по-видимому, расположится между кривыми, выведенными для кварца и кальцита (ближе к кальциту). Это отвечает промежуточному положению величины объемного расширения флюорита между соответствующими величинами для кальцита и кварца.

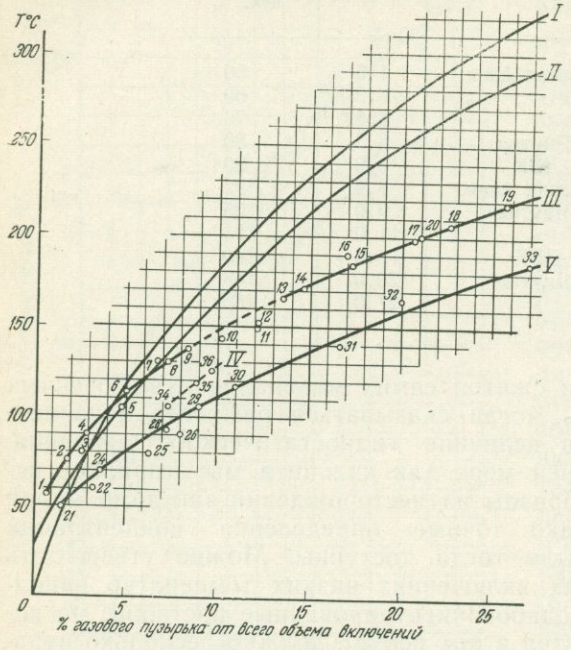



Рис. 47. Кривые зависимости степени наполнения и температур гомогенизации включений в кварце, кальците и флюорите в сравнении с кривыми для воды и 10%-ного раствора солей

*I* — кривая 10%-ного NaCl или KCl; *II* — кривая $H_2O$; *III* — кривая по включениям в кварце; *IV* — намечающееся направление кривой для флюорита; *V* — кривая по включениям в кальците.

Опорные точки для кварца: *1, 2, 4, 6, 9, 11* — Полярный Урал; *7, 15, 18* — Средний Урал; *5* — Салаир; *10* — Волынь; *12* — Алтай; *20* — Забайкалье; опорные точки для кальцита; *26, 27, 31* — Тетюхе; *21, 22, 24, 28* — Средняя Азия; *23, 25, 29, 30, 32, 33* — Вилюй; точки *34, 35, 36* — для флюорита (Куликолон)

Таким образом, далеко еще не полные данные показывают зависимость величины газового пузырька сжатия в жидких включениях минералов не только от температур заключенных растворов, но и от температурных коэффициентов объемного расширения (и сжатия) разных минералов. Однако, несмотря на удовлетворительные совпадения определений температур гомогенизации с данными, полученными применением эмпирических кривых, мы не считаем метод достаточно совершенным для точного определения истинных температур даже до 200° С.

Различия в концентрациях заключенных растворов, влияющих на коэффициенты их объемного расширения и разные, хотя и очень малые количества вещества, выделившегося на стенках вакуолей, могут вызывать отклонения от истинных температур минералообразования. Эти отклонения будут тем больше, чем больше будет разница между низкой (принятой за среднюю) концентрацией растворов во включениях, давших опорные точки нашим кривым, и концентрацией в тех включениях, которые служат для новых температурных определений. Мы приблизились к возможностям относительно просто определять концентрации веществ в заключенных растворах и путем воспроизведения искусственных включений в синтетическом кварце и других минералах выявим взаимное влияние всех трех интенсивных параметров ($T$—$P$—$X$) на плотность (удельный объем) замкнутого во включении раствора ($V$).

При этом величина $V$ будет измеряться относительным размером газового пузырька сжатия.

К настоящему времени выведенные кривые пригодны лишь для приблизительных определений температур заполнения жидких включений. Для случаев, когда не имеется под рукой этих кривых или микрокамеры для проведения гомогенизации, можно рекомендовать использование несложных формул для ориентировочного выявления температур заполнения жидких включений в кварце и кальците.

Эмпирические формулы для расчета вероятных температур гомогенизации включений в кварце и кальците основаны на простом математическом анализе полученных экспериментальных кривых. Были взяты логарифмы координат для процентов газа ($g$) и температуры (t° C). Затем по оси $x$ были отложены полученные значения логарифмов для соответствующих определенным точкам процентов газа — $\lg g$ и по оси $y$ — соответствующие им логарифмы температур $\lg t°$ C. Как показано на рис. 48, соединение опорных точек дает прямую линию как для кварца, так и для кальцита.

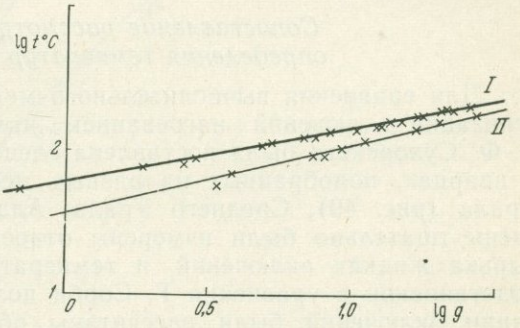



Рис. 48. График логарифмического выражения эмпирических кривых для кварца (*I*) и кальцита (*II*)

Исходя из уравнений наших кривых, можно оценивать температуру по процентному содержанию газа во включениях по следующим формулам: для кварца $t = 58{,}69\ g^{0{,}39}$, для кальцита $t = 37{,}25\ g^{0{,}47}$ *.

Величина содержания газа в процентах выявляется измерением (под микроскопом) относительного объема газового пузырька с помощью микрометрической линейки или сетки. Подставляя эту цифровую величину в ту или иную формулу, простым расчетом получают значение вероятной минимальной температуры заполнения жидкого включения.

Вычисленные по формулам температуры совпадают с температурами гомогенизации тех включений, точки которых располагаются в пределах кривой. Существенные отклонения, обычно в пределах до 10° C, дают точки не совпавшие с эмпирической кривой. Возможную ошибку в вычислении температур гомогенизации по этим формулам мы оцениваем ±5%. Однако точность определения температур по кривым и с помощью вычисления сильно зависит от степени точности измерения процентного содержания газовой фазы во включениях. Метод совершенно не применим для многофазовых включений водных растворов и сложных включений двух несмешивающихся жидкостей. Главное его значение, как и метода Г. Сорби, заключается не столько в возможности облегченного определения температур по газово-жидким включениям, сколько в том, что он дает возможность уяснить ряд важных теоретических вопросов, касающихся использования таких вклю-

---

* Кривая, полученная нами с А. А. Шапошниковым [15], для флюоритов не оказалась математически закономерной. Только в самое последнее время В. С. Поликовский (устное сообщение) получил для этого минерала график логарифмического выражения экспериментальной кривой, характеризующий зависимость между температурой гомогенизации жидких включений и объемом газового пузырька сжатия: $t°\,C = 25,073\ g^{0,6}$. По его данным, сопоставление расчетных температур $C\,t_1^0$ с температурами гомогенизации ($t_2^0$) показывает, что $\Delta t°\,C = t_1^0 - t_2^0$ находится в пределах 0,24—9,32 и относительная ошибка в оценке температур составляет 0,03—3,5%.

чений, как саморегистрирующих термометров. Кроме того, он послужил основой для разработки новой методики выявления агрегатного состояния минералообразующих растворов, заключающейся в измерении фазовых отношений не в стабильном их положении при комнатной температуре, а в мобильном состоянии, обусловленном восстановлением исходного состояния заключенных растворов. Эта методика, выявившая разные типы гомогенизации минералообразующих растворов, была кратко освещена нами ранее [17, 22]. Относительно подробное рассмотрение расчетного и визуального методов нам представляется в качестве необходимого введения для обоснования проблемы микротермометрии по газово-жидким включениям.

### *Сопоставление рассмотренных методов определения температур по включениям*

Для сравнения вычислительного метода Г. Сорби с методом гомогенизации включений нагреванием нами еще в 1948 г. с помощью Р. Ф. Сухорского была поставлена специальная работа по включениям в кварцах, подобранных из разных мест. По кварцам из Полярного Урала (рис. 49), Среднего Урала, Алдана, Салаира, Волыни, Алтая очень тщательно были измерены относительные объемы газового пузырька жидких включений и температуры их гомогенизации, затем подстановкой в уравнения Г. Сорби полученных температур гомогенизации включений были рассчитаны объемы газовых пузырьков для чистой воды, 10%-ного раствора хлористого калия и 25%-ного смешанных солей для давления 1, 250, 500 и 750 *атм*.

Для наглядного графического сравнения эмпирической кривой [22], полученной для гидротермальных кварцев, с кривыми, вычисленными по формулам Г. Сорби, Р. Ф. Сухорским было использовано уравнение (5). Исходя из эмпирических температур гомогенизации отдельных точек нашей кривой мы обозначили $B$ и $C$ — константы чистой воды, 10%-ного раствора KCl и 25%-ного раствора смешанных солей ($KCl + NaCl + NaHSO_4$), а давления выразили в метрах вышележащих пород. Таким образом, мы получили 12 кривых. Для упрощения на графике не показаны кривые давлений, отвечающих 1000 и 2000 *м* пород. Они располагаются, конечно, между кривыми давлений нормального и 3000 *м* (см. рис. 49).

Сравнение показывает, что расхождения между нашей эмпирической визуальной кривой и вычисленными кривыми по формулам Г. Сорби [уравнение (5)] незначительны только для самых низких температур гомогенизации (до 100° С).

Выше этой температуры расхождения быстро возрастают, достигая при 15% объема газового пузырька почти 60° С. Столь большие расхождения нельзя объяснить ни одним из факторов, учитываемых Г. Сорби, так как рост концентрации по его формулам перемещает вычисленную кривую в направлении, противоположном эмпирической кривой (наклон кривых для 25%-ного раствора смешанных солей более крутой, чем для чистой воды).

Причиной этого также не могло быть влияние литостатического давления, учитываемого в формулах Г. Сорби, что видно из графика, где расхождение между вычисленными кривыми для давлений нормального и 3000 *м* вышележащих пород незначительно. Однако расхождение с эмпирической кривой температур заполнения, как видно, велико. На это некоторое влияние могло оказать изменение объема вакуоли включения при нагревании за счет растворения вещества, родственного минералу-хозяину, ранее выделенного на стенках включения. Однако такое уменьшение объема вакуолей, особенно для труднорастворимых минералов и невысоких температур, обычно настолько незначительно, что им можно практически пренебречь.

Одна из причин расхождения кривых на графике могла заключаться и в том, что измерения отношений фаз для нашей эмпирической кривой проводились при комнатной температуре, а не при 0° С, как того требуют расчетные формулы Г. Сорби. Но главная причина несо-

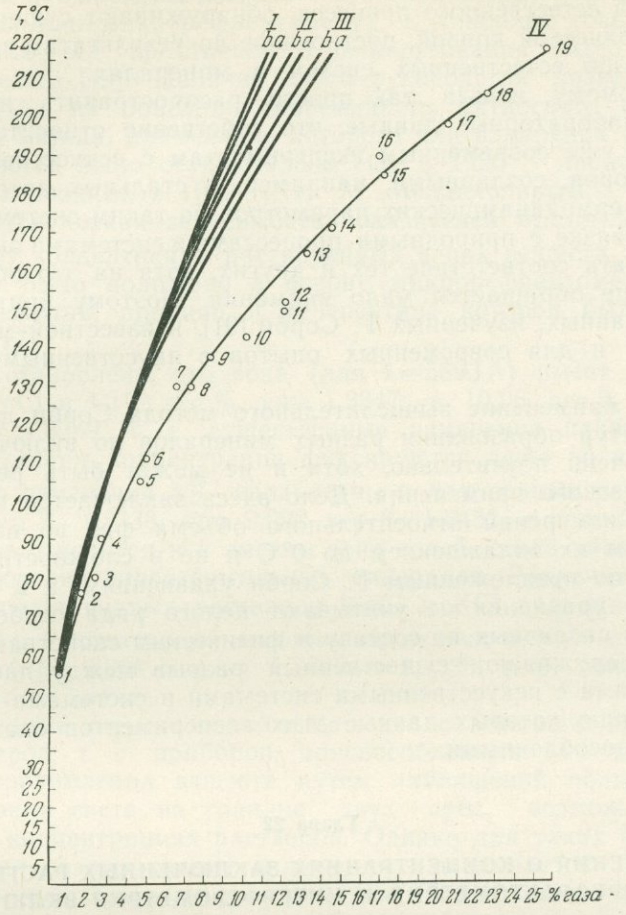



Рис. 49. Сравнение визуальной кривой гидротермального кварца с кривыми, вычисленными по формулам Г. Сорби (по Р. Ф. Сухорскому)

*I* — кривые вычисления для 25%-ного раствора смешанных солей (по Г. Сорби); *II* — кривые вычисления для воды (по Г. Сорби); *III* — кривые вычисления для 10%-ного раствора KCl (по Г. Сорби); *IV* — визуальная кривая для гидротермального кварца; *а* — кривые для нормального давления (1 *атм*); *б* — кривые для давления 3000 *м* вышележащих пород.
Опорные точки: *1, 2, 4, 6, 9, 11* — Полярный Урал; *3, 8, 14, 16, 17, 19* — Алдан; *7, 15, 18* — Средний Урал; *5* — Салаир; *10* — Волынь; *12* — Алтай

гласия между ними, очевидно, заключается в том, что Г. Сорби вывел свои константы (*Б* и *С*), экспериментируя со стеклянными ампулами и не учитывая различия между коэффициентами расширения (и сжатия) стекла и различных минералов при изменениях температуры. Возможно, что еще одна причина сыграла здесь некоторую роль. В своей статье Г. Сорби детально не описывает экспериментальной части работы, но по ходу его изложения ясно, что им заключались в герметические трубки-ампулы холодные растворы, которые в дальнейшем подвергались расширению под влиянием нагревания. Для этого автор вынужден был, очевидно, оставлять в ампулах некоторое свободное

пространство, заполненное воздухом. Таким образом, весь процесс происходил в направлении, обратном направлению естественного процесса образования включений, что не могло не отразиться на результате.

Следовательно, вычисления температур по формулам Г. Сорби, основанным на экспериментах с искусственными системами без учета особенностей естественного процесса, обнаруживают существенный разрыв с эмпирической кривой, построенное по результатам термометрических анализов естественных систем в минералах.

По-видимому, нельзя так просто распространить на природные минералы лабораторные данные, что собственно относится и ко многим другим уже современным экспериментам с искусственными системами растворов, созданными, например, в стальных автоклавах. При выявлении термодинамических параметров по таким системам и особенно при их увязке с природными процессами и системами оказывается не легко доказать соответствие тех и других, хотя на это обстоятельство пока все еще обращается мало внимания. Поэтому критическое рассмотрение данных, изученных Г. Сорби [91], в известной мере является актуальным и для современных опытов с икусственными системами растворов.

Однако применение вычислительного метода Сорби для определения температур образования разных минералов по включениям в них растворов очень поучительно, хотя и не может быть рекомендовано для практического применения. Дело здесь заключается не в сложности точных измерений относительного объема фаз во включенных с обязательным их охлаждением до 0° С и не в сложности вычисления температур по предложенным Г. Сорби уравнениям, а в том, что эти стандартные уравнения не учитывают целого ряда особенностей для включений в различных по составу и физическим свойствам минералах. Они обнаруживают существенный разрыв между лабораторными экспериментами с искусственными системами и системами природными, к исследованию которых данные этих экспериментов оказываются не вполне приспособленными.

## Глава 22

## СУЖДЕНИЯ О КОНЦЕНТРАЦИЯХ ЗАКЛЮЧЕННЫХ РАСТВОРОВ (МИКРОРЕФРАКТОМЕТРИЯ И ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ ВКЛЮЧЕНИЙ)

Еще в первой половине XVIII века один из выдающихся исследователей микросистем включений Брюстер (1823 г.), проводя визуально-оптические наблюдения над включениями, обнаружил в них особую очень экспансивную, легко расширяющуюся при слабом нагревании жидкость, названную позднее брюстолином. Предложенным им методом полного внутреннего отражения было установлено, что ее показатель преломления меньше, чем у воды. Брюстер (1826 г.) в трехфазовых включениях топаза этим методом установил, что коэффициенты преломления водного раствора во включенных составляют 1,2946, а еще не известной жидкости — 1,1311 *. Позднее А. П. Карпинский (1880 г.) на основании очень тщательных экспериментов достоверно впервые показал, что вторая слабопреломляющаяся жидкость является двуокисью углерода.

Опыты прошлого века, в частности метод оптического выявления величины светопреломления законсервированных в минералах микрообразцов материнских растворов, получили совершенно новую техниче-

---

* Ограниченная точность оптических приборов того времени привела к занижению результатов примерно на 0,03—0,04 против установленных позднее показателей для воды и углекислоты.

скую базу после изобретения Е. С. Федоровым [53] специального универсального приспособления к микроскопу, получившего известность под названием столика Федорова. Разные вариации этого оптического прибора в сторону его упрощения или усложнения, появившиеся позднее у нас и за рубежом, не изменили принципиальных возможностей его использования как микрорефрактометра, а наиболее совершенное руководство для его практического использования было составлено В. С. Соболевым [49]. Наличие этого руководства позволяет нам не останавливаться на описании современного пятиосного столика Федорова и его метода, применение которого для измерения светопреломления жидкостей было осуществлено еще в 1926 г. японским ученым Накашима, а позднее, в 1949 г., Н. М. Меланхолиным.

Выявляется четкая зависимость показателей преломления жидкостей ($N_D^{20}$) от концентрации растворенных в них веществ ($X$) и температуры. Это было положено в основу микрорефрактометрии газово-жидких включений, принцип и перспектива которой были освещены нами ранее [17].

Давно установлено, что вода (для $\lambda = 5893$ Å) имеет $N_D^{20°C} = 1{,}3330$, а раствор NaCl в 1,172 вес.% уже 1,3347, в 10,06 вес.% 1,3505, а в 23,72 вес. % 1,3749, т. е. существенные изменения показателей преломления с ростом концентрации фиксируются даже во втором знаке. Аналогичные изменения $N_D^{25°}$ характерны и для водных растворов KCl: при 1,001 вес. % 1,3338, при 9,022 вес. % 1,3452, а при 21,646 вес. % 1,3622. То же относится и к смесям этих солей, столь характерных для жидких включений гидротермальных минералов. Различия в показателях преломления водных растворов NaCl и KCl при одной и той же температуре и концентрации в общем не велики и $N_D^{25°}$ соответственно составляют (при 0,998 вес.%) 1,3342 и 1,3338, т. е. обнаруживаются только в третьем знаке.

Приведенные данные показывают, что с помощью использования рефрактометров, т. е. приборов, приспособленных для измерения показателей преломления веществ путем наблюдений полного внутреннего отражения света на границе двух сред, возможны реальные суждения о концентрациях растворов. Однако для таких миниатюрных объектов, как газово-жидкие включения, оказывается необходимым сочетание микроскопа с рефрактометром. Такое очень удачное и широко доступное сочетание достигается благодаря использованию современного пятиосного столика Федорова, что с большой тщательностью в 1953 г. показал В. М. Лодочников.

При изучении газово-жидких включений в таком микрорефрактометре используется не верхний, а нижний его сегмент, а наблюдения под микроскопом ведутся без линзы Бертрана. Впервые использование федоровского столика применительно к изучению показателей преломления содержимого газово-жидких включений было осуществлено в г. Ташкенте Ф. Раджабовым, который однако не довел отработку методики до конца.

Поэтому в 50-х годах мы ориентировали В. А. Калюжного на разработку оптического метода определения концентраций минералообразующих растворов во включениях с помощью столика Федорова. Поскольку результаты успешно проведенных им работ опубликованы в двух статьях [26, 27] и имеется также обстоятельное изложение микрорефрактометрического метода в книге В. Ф. Лесняка [39], мы ограничимся только самыми общими сведениями по практическому использованию этого метода.

Так как светопреломление растворов включений в большинстве случаев ниже показателей преломления включающих минералов, в определенных положениях микрообъекта достигается эффект полного

внутреннего отражения света, т. е. затемнение части включения, которое представляет собой как бы иммерсионный препарат. Включение должно иметь плоскопараллельную форму и не очень малые размеры (десятые доли миллиметра). Включающая пластина должна быть вырезана (или выколота по спайности) и отполирована таким образом, чтобы ее поверхности были параллельны или субпараллельны (с отклонением до 10°) стенкам исследуемого включения и плоскости нижней полусферы, на которой помещается препарат.

Затем методом «пылинок» точно измеряется толщина слоя кристалла (*МК*), отделяющая нижнюю плоскость включения от границы раздела препарат—сфера. Для наблюдения включения и явлений светопреломления, возникающих на границах стеклосфера—препарат и затем кристалл—жидкая фаза включения, используется проходящий строго параллельный пучок света от коллиматора или удаленного осветителя, направленный от плоского зеркала микроскопа.

При наклонах федоровского столика по оси *y* в противоположные стороны в результате явления внутреннего отражения в поле зрения микроскопа появляется граничная линия, разделяющая поле зрения микроскопа на две части: темную и светлую.

В случае изотропного минерала-хозяина во включении наблюдается одна граничная линия, в анизотропных минералах наблюдаются две граничные линии: первая соответствует $Np'$, вторая — $Ng'$. Для оптически одноосных кристаллов удобно пользоваться граничной линией, соответствующей показателю преломления обыкновенной воды, так как этот показатель не зависит от ориентировки кристалла. У оптически отрицательных кристаллов замеряют вторую линию (с полным затемнением), у оптически положительных первую линию (с частичным затемнением).

Для получения возможности суждения о величине показателя преломления заключенных в плоских включениях жидкостей требуется знать величину *МК* и угол наклона (Θ), фиксированный отсчетом по нониусу оси *y* столика Федорова. Исходя из законов преломления, В. А. Калюжным [27] была получена система из семи уравнений, связывающая значения показателя преломления жидкой фазы и угла полного внутреннего отражения, практическое использование которых оказалось крайне сложным. Поэтому им на основании выведенной зависимости для кварца и топаза были рассчитаны таблицы, а по ним построены два графика, используя которые можно для этих двух минералов определить показатели преломления жидкостей во включениях и затем судить об их концентрациях. Ошибка измерений за счет погрешностей в определении двупреломления минералов и величины наклона столика (Θ), по мнению В. А. Калюжного [28], не превышают ±0,0032—0,0033. Для уяснения процедуры измерений мы приведем краткую выдержку из его работы [27] по включению в горном хрустале из Бристенштока (Альпы).

«Пластинка кварца отшлифовывалась так, чтобы плоское включение, имеющее размеры 0,15×0,30 *мм*, было параллельно к плоскостям пластины. Затем измерялось расстояние включения от одной из плоскостей пластинки, в нашем примере МК=0,71·1,03=0,73 *мм*. Устанавливалась пластинка на столике так, чтобы плоскость, до которой измерялось расстояние МК, соприкасалась с нижним сегментом и включение располагалось на оси вращения *1* (опускается сегмент на величину МК от первоначального совмещенного положения плоскости его с осью вращения). После этого наклоном столика в одну сторону выводилась граничная линия, например на середину включения, и брался отсчет (61,5°). Таким же способом совмещалась граничная линия с серединой включения при наклоне в другую сторону (угол наклона равен 59,3°). Среднее двух отсчетов — 60,4°. Поворачивая

препарат вместе с кольцом $n$ столика вокруг оси $N$ на 120° и проделывая те же операции, что и выше, были получены такие значения $\Theta$ для раствора того же включения: 61,6° и 59,4°, откуда среднее 60,5°; после поворота еще на 120° — 61,1° и 59,7°, среднее 60,4°. Следовательно, максимальное значение угла наклона столика равно 60,5°, т. е. 60°30′, которому отвечает по таблице светопреломление раствора 1,337±0,003. Судя по полученному значению показателя, концентрация растворенных веществ во включении незначительна. В переводе на конкретные цифры раствор может содержать, например, около 2,5% NaCl или KCl.

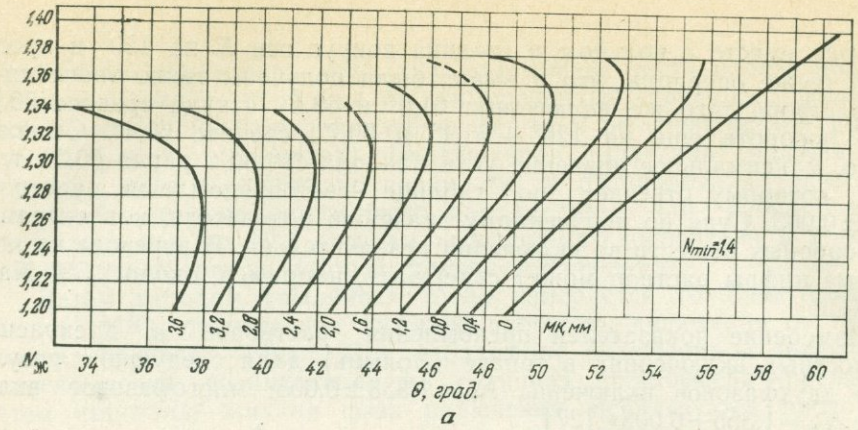
Измерение показателей преломления растворов в прекрасных плоскостных включениях в топазе (Волынь) дали следующие результаты: двухфазовое включение $N_ж$=1,338±0,003; многофазовое включение $N_ж$=1,355±0,003» [27].

Очень важная работа для расширения и усовершенствования возможностей использования методов определения показателей преломления жидких включений в гидротермальных минералах с учетом новой характеристики — величины среза полусфер — в современных моделях федоровского столика была выполнена И. Т. Бакуменко [3]. С помощью электронновычислительной машины им были рассчитаны таблицы и построены 13 графиков для жидких включений, замкнутых в минералах с показателями преломления от 1,4 до 2,0, шесть из которых мы приведем ниже (рис. 50, 51) и рекомендуем для практического использования. Им предложены переходные формулы, позволяющие учитывать ряд погрешностей и пользоваться рассчитанными таблицами (и графиками) даже при непараллельном положении плоскости включения по отношению к поверхности нижней полусферы столика. При этом, однако, граничная линия должна наблюдаться при наклонах столика в обе стороны.

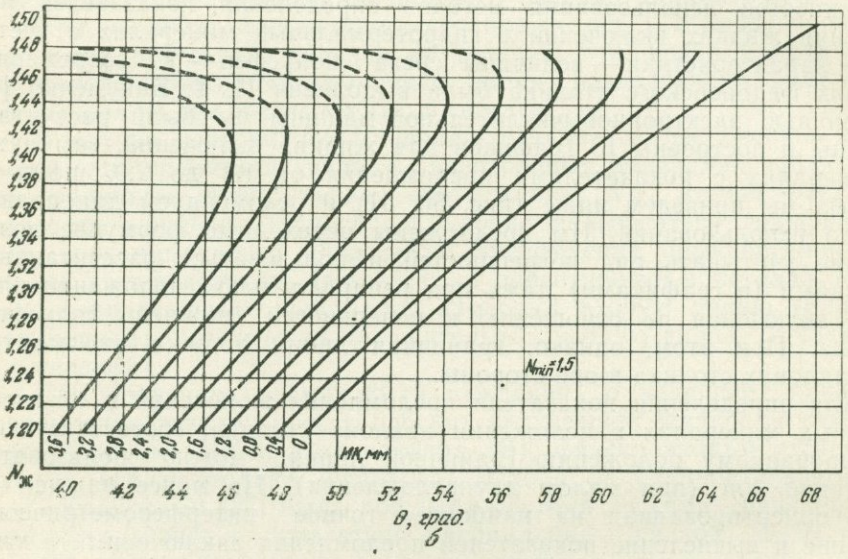
Для определения показателя преломления включений в оптически двуосных минералах в положении наклона столика, соответствующем фиксированному положению граничной линии, можно пользоваться величиной $Nm$ (при малом двупреломлении). Не менее важная работа, ориентированная на наиболее точное интерферометрическое, изучение и вычисление показателей преломления заключенных в минералах жидких растворов и очень тонкого выявления микрорельефа внутренних стенок включающих вакуолей без их вскрытия, была выполнена А. В. Лоскутовым [40]. Для этих целей макропрепарат, содержащий включения материнских растворов, также помещается на федоровском столике со снятыми полусферами для быстрого приведения плоскостей изучаемых уплощенных включений в положение, перпендикулярное ходу луча. Источником монохроматического света служит ртутная лампа ПРК-4. Микроскоп (МИН-4 и др.) должен допускать вертикальное перемещение столика и иметь набор светофильтров. Так как наиболее четкие интерференционные картины получаются в отраженном свете, необходимы также опак-иллюминатор и кварцевый клин.

Решение первой задачи — изучение ультрамикрорельефа стенок полостей уплощенных включений — осуществляется подсчетом интерференционных полосок и расчетом размеров микроэлементов рельефа. Полосы равной толщины образуют сложный рисунок совмещенного микрорельефа верхней и нижней стенок вакуоли.

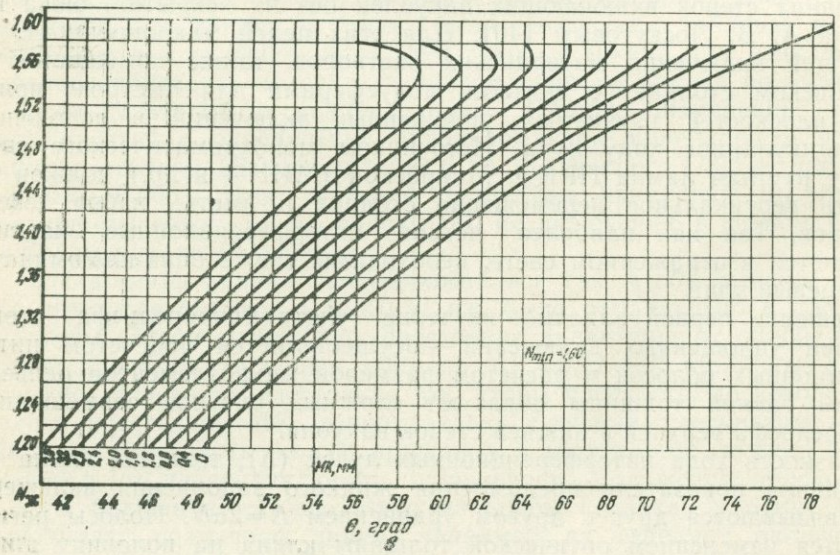
Разность хода интерференционных лучей ($\Delta$), толщина клина ($\alpha$) и величина показателя преломления жидкого заполнения включения ($N$) связываются друг с другом уравнением $\Delta=2\alpha N$. Полосы регистрируются изменением оптической толщины клина на половину длины волны, а $N$ — описанным микрорефрактометрическим методом. А. В. Лоскутов [40] рекомендует после этого удаление жидкости из включения




*а*




*б*




*в*

Рис. 50. Графическая зависимость угла наклона θ от показателей преломления растворов ($N_ж$) включений в минералах с показателями преломления ($N$) 1,4 (*а*), 1,5 (*б*) и 1,6 (*в*) (по И. Т. Бакуменко)

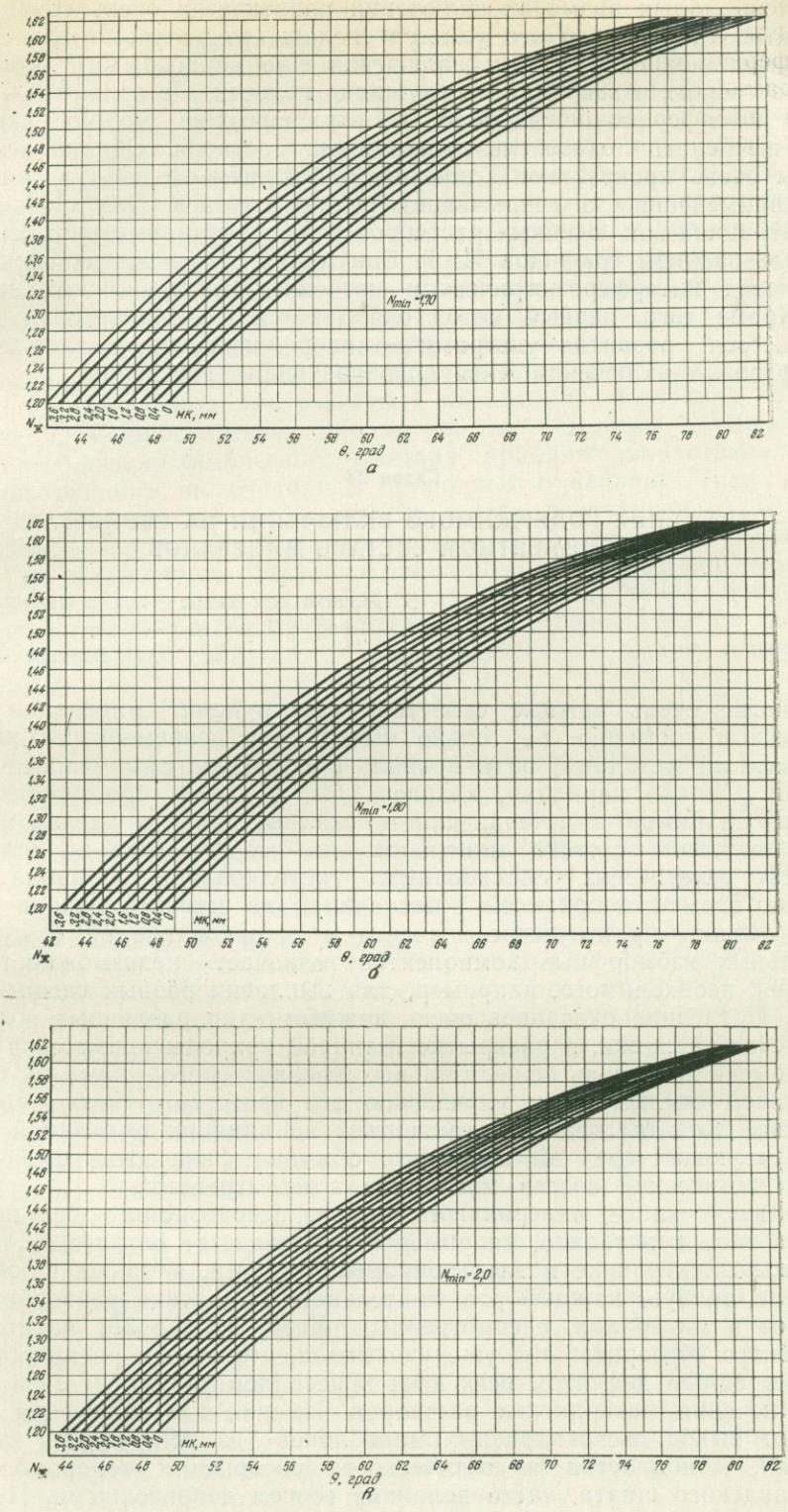



Рис. 51. Графическая зависимость угла наклона θ от показателей преломления растворов ($N_ж$) включений в минералах с показателями преломления ($N$) 1,7 (*а*), 1,8 (*б*) и 2,0 (*в*)

и даже промывку воздушной полости дистиллированной водой, что при очень малых размерах включений практически очень трудно осуществить. Однако если это удается сделать, то получают два снимка интерференционной картины: включения еще не вскрытого, заполненного раствором, и вскрытой «воздушной» полости. По отношению количества интерференционных полос на этих снимках можно наиболее точно вычислить показатель преломления раствора. Однако эти процедуры очень кропотливы и поэтому в будущем не найдут практического применения, за исключением редких случаев. Для суждений о концентрациях заключенных растворов микрорефрактометрия, особенно с использованием графиков И. Т. Бакуменко, имеет явные преимущества перед интерферометрическим изучением газово-жидких включений. Кроме того, первый метод оказывается очень полезным и для начавшегося развития ультрамикроминералогии кристаллов-узников многофазовых включений минералообразующих растворов.

## Глава 23

## ОТРАЖЕНИЕ СОДЕРЖИМОГО ВКЛЮЧЕНИЙ НА СВОЙСТВАХ И ЭЛЕМЕНТНОМ СОСТАВЕ МИНЕРАЛОВ

В пылинке или капле — как в микрокосме — отражается общий состав космоса.

*В. И. Вернадский*, 1910

Многие очень важные свойства конструкции минералов в их статическом состоянии не только выявляются современными научно-техническими методами, но и правильно объясняются с теоретических позиций. Однако вариации, казалось бы, в самых простых из этих свойств, например в потерях при прокаливании и в удельном весе или элементном составе минералов, до сих пор еще не получили должного генетически обоснованного истолкования. Природа аномальных элементов-примесей в минералах во многих случаях имеет очень большое практическое значение и истолкование их в качестве нормальных изоморфных компонентов означает невозможность их удаления, необходимого, например, для выплавки разных специальных стекол. Последние оказались очень важными для различных областей современной техники, и раскрытие истинной природы примесей в кварцевом сырье как очень нежелательных добавок способствует не только правильной оценке, но и улучшению его качества. Именно поэтому мы хотим хотя бы кратко остановиться на влиянии включений минералообразующих сред на некоторые обычные физические свойства и тонкий химический состав минералов и их агрегатов.

Большой класс минерального сырья, используемого без переработки в виде кристаллов, например в производстве оптических приборов, радиоэлектронике и электропромышленности, а также в ювелирном деле, требует каждый раз тщательного выявления разнообразных дефектов в минералах, рассмотренных ранее (глава 15) на примере оптического флюорита. Мы уже указывали, что самым распространенным и вредным дефектом всех этих кристаллов являются газово-жидкие включения материнских растворов. Именно эти включения резко снижают выход пьезокварцевых моноблоков из кристаллов горного хрусталя, монопластин из оптического флюорита и мономбоэдров из исландского шпата, часто делая их совсем непригодными. Неоднородности в кристаллической структуре этих минералов, обусловленные включениями, никак не могут быть ликвидированы, а отходы при обогащении казалось бы прозрачного горного хрусталя по той же

причине не могут использоваться и для выплавки высококачественных стекол. Газово-жидкие включения растворов оказались главным бичом горнодобывающей пьезооптической промышленности. Поэтому познание их природы и закономерностей распределения в теле кристаллов является очень важной проблемой. Собственно ее решение и было вызвано этими сугубо утилитарными нуждами производства.

Однако эти же включения материнских растворов затем позволили получить важные данные о физическом состоянии и химическом составе природных кристаллизующих сред, помогли воссоздать их в автоклавах и резко сократить путь поисков для получения высококачественных искусственных кристаллов пьезокварца и некоторых других минералов. Опыт лаборатории природы в значительной мере был использован на производстве. Этот опыт позднее был перенесен и на другие пневматолитовые и гидротермальные месторождения для объяснения многих геохимических особенностей их генетики.

Воспроизведение включений в искусственных кристаллах, особенно в кварце, выращенном при известных параметрах, позволило показать влияние термодинамических параметров на истинную величину того или иного физико-химического фактора, приближенно установленного по газово-жидким включениям в природных минералах. Так, с мерой и числом развивалась новая отрасль науки, основанная на изучении герметизированных в минералах включений растворов и расплавов. Здесь мы остановимся только на понимании некоторых вопросов, связанных со статическим состоянием газово-жидких включений, законсервированных в кристаллических решетках, и влиянием их на некоторые физические свойства и микрохимический состав природных минералов.

### *Потери при прокаливании безводных минералов*

Включения жидких водных растворов, очень широко распространенные в гидротермальных минералах, и газовые включения, развитые в минералах пневматолитового происхождения, как будет показано ниже, отражаются не только на микрохимическом составе казалось бы очень однородных кристаллов, но и на их удельном весе, величине потерь при прокаливании * и на ряде других физических и химических свойств минералов. Недооценка наличия включений минералообразующих растворов в кристаллах приводила и приводит к целому ряду недоразумений при интерпретации результатов даже самых точных и тщательных исследований.

Во многих минералах, как известно, содержится вода, играющая совершенно исключительную роль в процессах минералообразования и метаморфизма. До недавнего времени учитывались только три типа этой воды: конституционная, кристаллизационная и адсорбционная. Проведенные нами исследования показали, что во всех минералах пневматолитового, гидротермального и холодноводного происхождения, а также в гидротермально метаморфизованных минералах и породах заключено много воды, содержащейся в свободном молекулярном виде в вакуолях кристалло-флюидных, жидких и газовых, первичных, мнимовторичных и вторичных включений. Количество этих включений иногда оказывается настолько значительным, что их водные растворы занимают в кристаллах объем от нескольких процентов до 10% и более. Удаление этой воды с помощью перегрева и взрывания включений приводит к значительному снижению объемного веса минералов и к значительным потерям при прокаливании.

---

* Изучено совместно с Н. И. Мязь.

Микроскопическое изучение ряда минералов кристаллогидратов, например иниоита, гипса, алунита и других, показывает, что они содержат разное (иногда очень большое) количество включений материнских растворов, а не одну только кристаллизационную воду, как считают многие исследователи. Жидкие включения до сих пор не учитываются при тензиметрическом изучении и при расшифровке кривых обезвоживания минералов. Некоторые из водных боратов, например, индерборит и гидроборацит, очень близкие по химическому составу, отличаются лишь по содержанию в них воды, которая учитывается только как кристаллизационная. Возможно, что ряд минералов кристаллогидратов, обособленных друг от друга только по содержанию воды, потребует специального изучения, какая же в действительности вода повлияла на их разделение. При классификации воды в кристаллах и твердых коллоидах, кроме трех известных типов воды — конституционной, кристаллизационной (в том числе цеолитной) и адсорбционной, — необходимо выделить четвертый тип *плененной*, или *маточной* воды, герметически замкнутой в порах минералов. Впервые это, по нашим данным, было отмечено В. С. Соболевым [48].

При изучении флюоритов мы заметили, что «чем больше в флюорите жидких включений, тем больше потери при его прокаливании. Прокаливание легко вызывает разрывы этих включений (при перегреве сверх температуры их гомогенизации) и удаление летучих, главным образом воды» [17, стр. 301]. В частности, зеленоватый плавиковый шпат из гидротермальных месторождений Таджикистана, содержащий многочисленные включения водных растворов, показал потери при прокаливании 1,35%, бесцветный оптический флюорит с малым содержанием включений — 0,06% и голубоватый совершенно прозрачный флюорит, практически не содержащий включений, совсем не дал потерь даже при прокаливании до 500° С.

Ввиду трудностей учета относительного количества плененной воды и воды трех других типов в водосодержащих минералах для продолжения опытов в этом направлении мы взяли наиболее распространенный «безводный» минерал — горный хрусталь с Волыни, Алдана, Нагольного кряжа и Алтая. В кварце, естественно, нельзя было предполагать наличия воды какого-либо из первых трех типов. Этот минерал был удобен также и тем, что оказалось возможным сопоставить величины потерь при прокаливании для кварцев пневматолитового и гидротермального происхождения, содержащих приблизительно одинаковые количества включений.

Определение потерь при прокаливании проводилось при температурах до 1200° С либо в муфельной печи, либо в пламени газовой горелки. Для этого из кристаллов и обломков кварца изготавливались пластинки, в которых имелась возможность приблизительной оценки количества включений на определенной площади. Размеры пластинок по возможности выдерживались постоянными (площадь 1 *см*$^2$ при толщине 1, редко 1,5 *мм*). Эти пластинки просматривались под микроскопом и при 120-кратном увеличении подсчитывалось количество и определялся класс включений. Подсчитывалось среднее число включений на одно деление сетки окуляр-микрометра площадью 1,6 *мм*. После этого пластинка минерала взвешивалась на точных аналитических весах. Затем она помещалась в платиновый тигель с крышкой, чтобы предотвратить потерю в весе в результате выброса осколков минерала при взрывании включений и прокаливалась в течение 30—90 *мин*.

После прокаливания пластинка минерала помещалась в эксикатор для охлаждения. Затем проводилось повторное ее взвешивание. В большинстве случаев после прокаливания в результате разрыва включений от пластинки оставались лишь мелкие обломки. По раз-

нице между первоначальным весом и весом после прокаливания вычислялась величина потери, обусловленная механическим удалением и испарением раствора включений.

Повторное изучение обломков пластинки под микроскопом показало, что лишь очень мелкие по размерам жидкие включения и более крупные газовые включения допускали большой перегрев и сохранялись невзорванными вследствие сопротивления стенок замыкающих вакуолей. Поэтому цифры величины потерь при прокаливании, приведенные ниже, следует рассматривать как минимальные.

Большего приближения к истинной величине потерь можно достигнуть с помощью тонкого измельчения кварца. Такое измельчение уже до нагревания вызывает потери в весе в результате механического разрушения включений, испарения воды и других летучих из этих включений. Последующее прокаливание кварцевого порошка обусловливает более полное, чем в пластинках, взрывание включений водных растворов. Общая сумма потерь за счет подвижных веществ, содержащихся во включениях, слагается из потерь их путем испарения при механическом раздроблении и потерь при взрывании включений последующим нагреванием порошка минерала. Таким образом, впервые была объяснена причина потерь при прокаливании безводных минералов, не претерпевающих диссоциации [21].

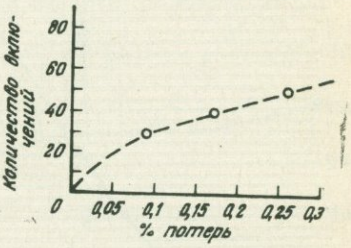



Рис. 52. График зависимости величины потерь при прокаливании от количества включений в пневматолитовых кварцах Волыни (по Н. П. Ермакову и Н. И. Мязь)

Наблюдения показали, что при испарении жидкости включений растворенные в ней минеральные вещества выпадают в осадок с образованием тонких пленок на поверхности обломков и дендритов в трещинках, через которые удалялись летучие при разрывах включений. Потери от прокаливания минералов по этой причине при прочих равных условиях тем больше, чем менее концентрированными были плененные во включениях растворы, если выделившиеся из них соли и минералы-узники не подвергались сублимации.

Потери от прокаливания при прочих равных условиях оказались наименьшими для кварцев пневматолитового происхождения, содержащих газовые включения. При равном количестве и величине включений на один и тот же объем минерала потери при прокаливании высокотемпературных кварцев, содержащих двух- и многофазовые включения растворов с крупным пузырьком газа, меньше, чем в низкотемпературных кварцах с включениями, содержащими малый газовый пузырек.

На рис. 52 представлены средние результаты исследования 14 обломков горного хрусталя Волыни, содержащего первичные газовые включения. Эти включения в пневматолитовом кварце имеют приблизительно равные размеры и рассеяны в нем довольно равномерно. При количестве включений около 50 на 1,6 *мм*$^2$ площади макропрепарата потери при его прокаливании составили в среднем 0,21%, около 40— в среднем 0,165%, около 30 — в среднем 0,090%. В наружной зоне мориона в прозрачном горном хрустале, не содержащем или почти не содержащем включений, потерь при прокаливании совсем не было обнаружено. Эти результаты указывают на прямую зависимость между величиной потерь при прокаливании и количеством включений.

В гидротермальном горном хрустале Алдана на основании 17 опытов была выявлена аналогичная зависимость. Потери при прокаливании варьировали от 0,07% при количестве микроскопических включений

на 1,6 *мм*² площади около 10 до 1,6% при количестве включений около 200 при одном и том же увеличении микроскопа.

Пять опытов с кристаллами горного хрусталя из полиметаллических гидротермальных месторождений Нагольного кряжа показали, что при количестве включений около 40 на принятую единицу площади пластины потери при прокаливании составляют 0,57%, а при 50 включениях 0,64%.

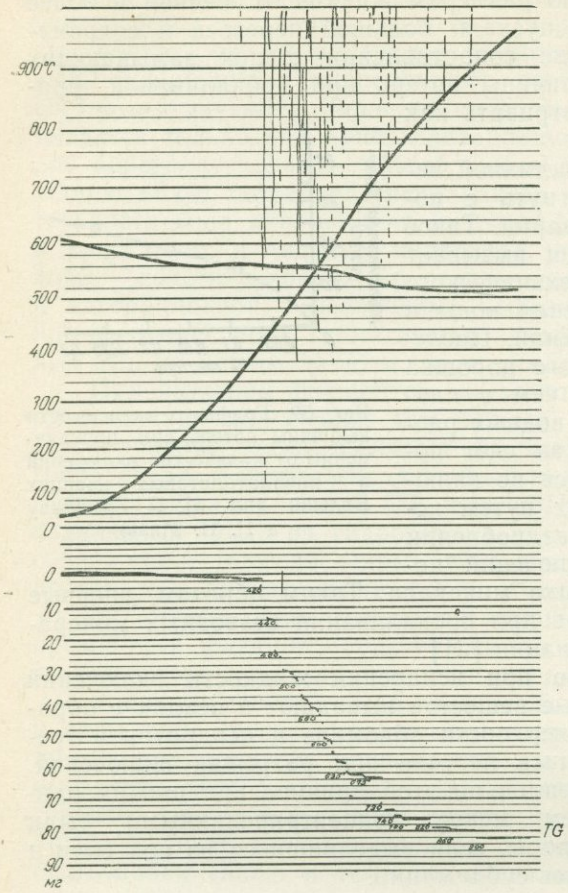



Рис. 53. График испытания гидротермального касситерита горы Оловянной на дериватографе. Фракция 0.5—0,25, навеска 1100 *мг*. Потери при прокаливании 7,5% (по М. А. Научитель)

На примере исследованного нами горного хрусталя с одного из гидротермальных месторождений Алдана можно видеть, что потери при прокаливании для разных зон одного и того же кристалла различны и опять-таки зависят от количества включений на единицу объема минерала. При наименьшем сгущении субмикроскопических включений в этом кристалле потери при прокаливании составили 0,24%, при среднем количестве включений они оказались равны 0,49% и при наибольшем сгущении включений составили 0,75%.

Даже на основании первых результатов можно было прийти к заключению, что летучие, главным образом вода, содержащиеся во включениях минералов, должны учитываться при рассмотрении кривых обезвоживания этих минералов при выяснении величины потерь при прокаливании.

При истирании гидротермальных и пневматолитовых минералов в тонкий порошок происходит механическое разрушение водо- и газосодержащих вакуолей включений и удаление летучих. Поэтому такие минералы, не содержащие никакой иной воды, и не показывают потерь при прокаливании (п. п. п.). Однако, если брать фракцию раздробленного минерала 0,5—0,25 *мм* или более крупную, эти же минералы покажут потери при прокаливании, увеличивающиеся параллельно с укрупнением зерен до 1 *мм* в диаметре. В более крупных фракциях сохраняется оптимальное количество консерватов растворов, по размерам при нагревании способных разрывать стенки включающих минералов; это явление известно под названием декрепитации [17].

Не останавливаясь на теоретических и прикладных аспектах явления декрепитации, отметим синхронность разрывов газово-жидких включений, улавливающуюся через термозвуковой эффект, с потерями при прокаливании, автоматически фиксирующимися на дериватографе, который, таким образом, является и декрепитографом.

Это было отчетливо показано М. А. Научитель [44] на моно-

минеральной фракции касситерита (0,5—0,25) с навесками 1000—1350 *мг* при равномерном нагревании печи со скоростью 12—14° С в минуту. Ее испытания проводились на венгерском дериватографе, чувствительность весов 200, чувствительность ДТУ 1/5 и ДТА 1/15. На рис. 53 можно видеть, что срывам на дифференциальной весовой кривой (ДТУ) соответствуют на кривой ТУ дериватограмм ступеньки, фиксирующие потери при прокаливании вследствие испарения содержимого вскрывающихся включений.

Учет потерь веса при прокаливании при известной точной навеске минерала позволяет рассчитывать процентное содержание летучих во включениях материнских растворов, а по температурным интервалам взрывания (высоким или низким) судить о плотностях (агрегатном состоянии) этих растворов.

Так, по М. А. Научитель, в касситеритах месторождения горы Оловянной (Чукотка), по-видимому, высокотемпературного гидротермального генезиса, жидкие включения дали очень большую величину потерь при прокаливании (7,5%) главным образом в интервале температур от 420 до 635° С (см. рис. 53). Касситерит из месторождения Первоначальное в интервале температур нагревания и декрепитации от 370 до 1000° С показал только 1,03% летучих компонентов, содержавшихся, по-видимому, в газовых включениях, вес заполнения которых незначителен (рис. 54). Газы таких включений требуют для их высвобождения из вакуолей большого перегрева сверх температур гомогенизации. По этому признаку могут оказаться пневматолитовыми и касситериты месторождений Толекай и Тариель (Чукотка).

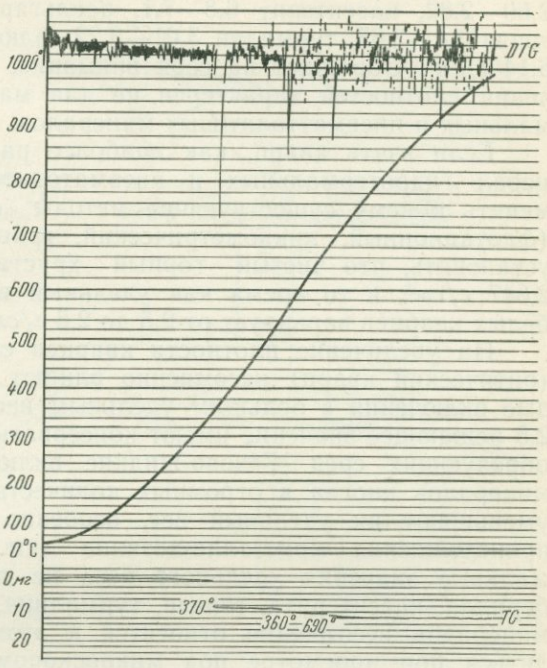



Рис. 54. График испытания гидротермального касситерита месторождения Первоначальное. Потери при прокаливании 1,03%

Однако к достоверному выводу по этому вопросу можно будет прийти только после визуального изучения соотношений фаз в газово-жидких включениях касситеритов из этих месторождений. Дело заключается в том, что там могли возникать условия медленной кристаллизации, при которой захват микропорций материнской среды касситеритами был ограниченным или же возникали только ультрамикровключения, требовавшие для своего взрывания значительного перегрева и содержавшие небольшие количества высокоподвижных веществ.

### *Вариации в удельном весе минералов*

Во всех учебниках минералогии можно видеть, что плотность или удельный вес минералов изменяются в некоторых пределах, однако причины этого явления обычно не объясняются даже в специальных

работах, посвященных этому вопросу [6], что показывает отсутствие должного внимания к газово-жидким включениям даже в прозрачных минералах.

Вариации значений удельного веса в общем велики и их можно проиллюстрировать следующим кратким перечнем наиболее обычных минералов: барит 4,3—4,6, берилл 2,63—2,91, галенит 7,3—7,6, кальцит 2,69—2,82, касситерит 6,8—7,1, реальгар 3,5—3,6, сфалерит 3,9—4,11, топаз 3,4—3,65, турмалин 3,01—3,22, флюорит 2,97—3,25, шеелит 5,88—6,14 *г/см*$^3$. Обращает на себя внимание, что наибольший разброс значения плотностей характерен не для магматических, а для гидротермальных и пневматолитовых минералов.

Если взять кварц, как наиболее распространенный жильный минерал гидротермальных и пневматолитовых месторождений, и применить к нему существующие методы определения удельного веса (флотационный, пикнометрический, гравитационной трубки), можно установить, что чистый горный хрусталь имеет плотность (ρ) в 2,647 *г/см*$^3$, в то время как удельный вес замутненных или обычных белых кварцев варьирует от 2,5 до 2,8 *г/см*$^3$ [4].

На увеличение плотности кварцев сверх ее реперного показателя (оптический кварц) несомненно влияют изоморфные примеси и твердые включения с большим удельным весом, а в интервале от 2,65 до 2,5 решающее значение имеют консерваты жидких и газовых минералообразующих сред. Газово-жидкие включения присутствуют в порах минералов иногда в огромных количествах (см. главу 18) и заметно уменьшают их удельный вес, особенно в случаях пневматолитового происхождения кристалла-хозяина (см. фототабл. V, *а*, *б*). Минимальные значения удельного веса не только для кварца, но и для берилла, касситерита, топаза, турмалина, флюорита, шеелита и других минералов несомненно относятся к этому случаю, в чем легко убедиться при просмотре под микроскопом пластин-препаратов из этих минералов. Таким образом, изучение плотности высокочувствительными методами даже непрозрачных минералов может внести элемент объективности в генетический аспект проблемы. К таким методам в первую очередь относится изучение плотности минералов в гравитационном поле, разработанное М. Я. Кац [34]. В отличие от многих других исследователей физических констант минералов он среди ряда причин, вызывающих отклонение в удельном весе какого-либо минерала, отмечает наличие в нем включений и примесей. С помощью гравитационных градиентных трубок М. Я. Кац изучил плотности ряда минералов во фракции 0,2—0,25 *мм*, в частности, ее вариации для кварца разных геологических условий нахождения (рис. 55). На основных статистических характеристиках приведенных гистограмм учтены: 1) средние значения плотности ($\rho_{ср}$); 2) мода распределения (*Mo*), т. е. максимум на гистограмме; 3) среднее квадратичное отклонение (σ), характеризующее «разброс» зерен по шкале плотности, примерно равное половине ширины гистограммы на уровне половины ее пика; 4) коэффициент асимметрии (*A*), для нормального распределения* равный нулю; 5) коэффициент эксцесса (*K*), показывающий при распределениях, отклоняющихся от нормального, отличия последнего в крутизне от измеренного распределения.

Методы измерения плотности минералов в гравитационном поле, примененные и усовершенствованные М. Я. Кац [34], допускают точность от третьего до шестого знака после запятой. Представленные

---

* Характерно для случайных отклонений величин от их истинных значений. Эти пояснения приводятся здесь потому, что гистограммами мы будем пользоваться ниже при обработке массовых измерений взрываемости включений и в ряде других случаев. Техника расчетов для построения гистограмм приведена у А. К. Митропольского [43] и Р. Миллера [42].

им характеристики плотности для одного из самых распространенных минералов земной коры — кварца показали, что чаще всего встречаются кварцы со средней плотностью 2,641—2,645 *г/см*$^3$, значением моды 2,641—2,648 *г/см*$^3$, средним квадратичным отклонением 0,002—0,008 *г/см*$^3$, коэффициентом асимметрии от —2,5 до +0,5, коэффициентом эксцесса от —0,5 до +2,5.

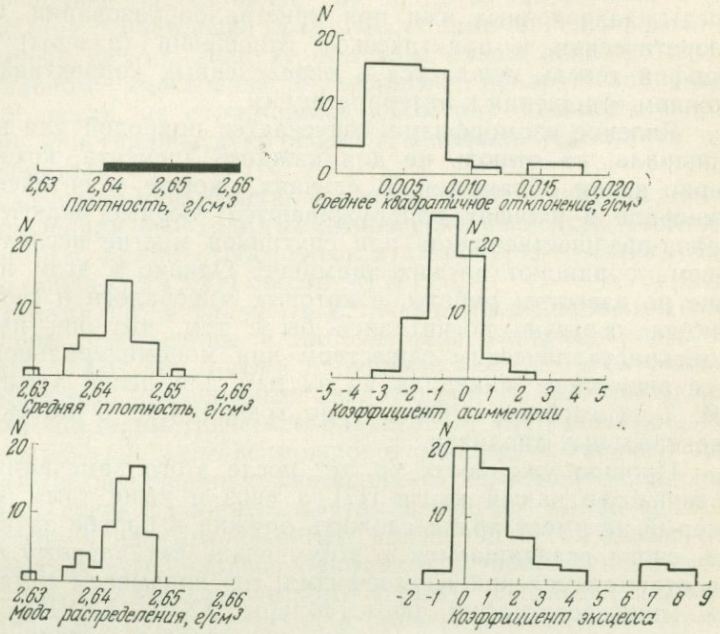



Рис. 55. Гистограммы статистических характеристик плотности природных кварцев разного происхождения (по М. Я. Кац)

Меньшие значения статистических характеристик плотности в первую очередь связаны с наличием в нем газово-жидких включений. Их влияние, так же как и выявление потерь при прокаливании на дериватографе, должны быть досконально изучены. Это представляется автору важным не только для теоретических аспектов, связанных, например, с выявлением объемного процентного содержания консерватов материнских гидротермальных и пневматолитовых растворов в минералах для расчета их плотности и концентрации, но и в прикладном аспекте развития новых физико-геохимических методов поисков постмагматических месторождений, не выходящих на поверхность [20].

### *Значение включений при интерпретации спектральных анализов минералов и мономинеральных фракций*

Во множестве случаев для целей спектрального анализа (элементный состав) очень тщательно отбираются под бинокуляром мономинеральные фракции или исследуется состав монокристаллов. Обычные или тем более высокочувствительные [47] спектральные анализы в сочетании с другими точными методами определения элементного состава минералов несомненно обеспечивают вполне объективные данные. Однако интерпретация этих данных заставляет желать много лучшего, на что мы и хотели бы обратить еще раз серьезное внимание минералогов и кристаллохимиков. В первую очередь это должно заинтересовать исследователей очень важной проблемы изоморфизма элементов в кристаллических конструкциях минералов и предостеречь от дальнейших ошибок, связанных главным образом с учетом, а точнее с недоучетом величины радиусов ионов.

Зависимость идиоморфных замещений (диадохия) от значения термодинамических параметров в геохимических средах минералообразования даже без возможности определения их значений достаточно широко обсуждается в геохимической литературе. Однако при этом не учитывается то, что многие элементы, выявленные в минералах спектральными анализами, находятся совсем не в кристаллических решетках минералов, а во включениях микропорций материнской среды, захваченных ими при кристаллообразовании. Столь важное в теоретическом и практическом отношении (лазеры) учение об изоморфии теперь нуждается в определенных коррективах и более осторожном отношении к интерпретациям.

Явление изоморфизма допускается природой для каждого данного минерала, но отнюдь не для каждого элемента, который был достоверно в нем обнаружен. В случаях, когда в оптически прозрачном минерале в шлифах обнаруживаются твердые включения микроминералов-предшественников или спутников многие исследователи изоморфизма обращают на них внимание. Однако в этом направлении нам еще не известны работы, в которых минералоги и геохимики сколько-нибудь серьезно посчитались бы с тем, что они имеют дело не с монокристаллическим веществом или мономинеральной его фракцией, а с веществом минерала не чистым для целей химического анализа (Я. В. Самойлов, 1906 г.), не говоря уже о высокочувствительных спектральных анализах.

Прошло уже более 60 лет после этого замечания, поставленного в эпиграфе нашей книги [17], а «воз и ныне там». Однако ни один ученый не имеет права сложить оружия в борьбе за истину и поэтому мы снова возвращаемся к этому очень актуальному вопросу. Отнюдь не отрицая явлений изоморфизма, мы призываем читателя посмотреть на микрофотографии (фототаблицы XXVI, XXVII), чтобы представить себе причины аномального элементного состава минералов, казалось бы «чистых», кристаллизовавшихся в гидротермальных условиях.

Необходимое истирание минерала в тонкий порошок перед спектральным анализом приводит к разрушению вакуолей газово-жидких включений и удалению легколетучих веществ ($H_2O$, $CO_2$ и др.) при обычных условиях приготовления пробы. Однако спад давления, случающийся при этом, вызывает немедленную кристаллизацию веществ, содержавшихся в микрообразцах растворов даже двухфазовых включений. Микроминералы-узники многофазовых включений в подавляющем большинстве случаев при нормальной температуре (20° С) и давлении (1 *атм*) не сублимируют и также подвергаются истиранию. Они подключаются неосмотрительными исследователями к валовому элементному составу минерала-хозяина, показанному точным спектральным анализом.

После этого начинаются рассуждения о том, что законы изоморфизма Роджерса — Вернадского — Гольдшмидта — Ферсмана и других нуждаются в уточнениях, что можно в кристаллическую решетку минералов вталкивать «кирпичи»-атомы куда большего размера, чем положено правилами природы, открытыми этими учеными. Их научное наследство, конечно же, не нуждается в нашей защите, и основные линии их идей и геохимических факторов, по нашему мнению, остались в прежней силе. Сомнения могут возникать только по линии недоучета содержимого газово-жидких, особенно многофазовых включений в минералах. В этой монографии нам хотелось бы уменьшить, если не рассеять, эти сомнения. Лучше всего сделать это с помощью микрофотографий внутреннего содержимого минералов и приведения результатов химических и спектральных анализов того же прозрачного и казалось бы «чистого» флюорита из Бектауата, о котором мы говорили в главе 20. В «слегка слегка замутненной» зоне монокристалла

под микроскопом (90×) можно видеть первичные многофазовые включения систем материнских геохимических сред в этом казалось бы «чистом» флюорите (см. фототабл. XXVI, *а*). Бóльшие увеличения микроскопа в пределах этой же зоны (880×) (см. фототабл. XXVI, *б*) показывают, насколько каждое из включений заполнено минералами-узниками. Еще большее увеличение (см. фототабл. XXVI, *в*) обнаруживает, что их количество варьирует от 20 до 27 (см. главу 20) и далеко не все из них в настоящее время могут быть определены.

Однако каждый из них, если не при химическом анализе, то при высокочувствительном спектральном анализе, обнаруживает свой индивидуальный состав, не относящийся к составу элементов-«кирпичей», слагающих кристаллическую решетку минерала-хозяина (в данном случае флюорита).

Мы отобрали мономинеральную фракцию этого минерала (монокристалла) и проделали необходимые химические и спектральные анализы. Их результаты, прямо относящиеся к затронутому вопросу, приведем из нашего доклада на XXII сессии МГК [18].

Отобранные нами 115 *г* флюорита с такими многофазовыми включениями растворов были сданы в лабораторию ультрамикроанализа включений в АН УССР (г. Львов) на химические и спектральные исследования вытяжек, проведенные аналитиками З. С. Грынькив и С. Б. Казаковым. Калориметрическое определение pH растворов, оказавшееся равным 5,5—5,6, дало возможность произвести анализ в двух вариантах: путем выщелачивания растворимых компонентов (из растертого в агатовой ступе флюорита) дистиллированной водой при комнатной температуре и кислым, нагретым до 90—95° С, 0,1%-ным раствором $HNO_3$. Результаты анализов приведены в табл. 26 и 27.

Сравнение результатов химического анализа вытяжек и данных спектральных анализов сухих остатков в водном и кислотном вариантах, показывает, что кислотная вытяжка обогащена Ca, Ba, Cr, Li, Fe, Mg, Mn, Ni, Pb, Zn. Эти металлы, по-видимому, образовались за счет растворения рудных минералов-узников, находящихся во включениях. Обращает на себя внимание отсутствие серы, что исключает содержание во включениях тяжелых металлов в виде сульфидов. Алюминий из труднорастворимых фаз в раствор не перешел.

Кислотная вытяжка оказалась сравнительно более концентрированной. Щелочи (K, Na, Li), по-видимому, образуются за счет плохо растворимых в чистой воде минералов фторидов-узников. Результатами анализа доказать это трудно, так как мешает переходящий в кислый раствор в больших количествах $CaF_2$. Получаются несоизмеримые величины $Ca^{2+}$ и $F^-$ и щелочей, которые при имеющейся степени точности анализов не позволяют сравнивать их между собой. Однако и водная вытяжка показала заметное содержание ионов фтора и кальция, что несомненно частично может быть отнесено к их содержанию в самом остаточном высококонцентрированном растворе включений, показатель преломления которого оказался выше или равным показателю преломления минерала-хозяина (для флюорита $N=1{,}434$). Элементы, приведенные в табл. 26 и 27, не содержатся в идеально прозрачных зонах кристаллов, за исключением $Ca^{2+}$ и $F^-$.

Из сказанного следует, что при изучении безусловно существующего и широко распространенного явления изоморфизма никак нельзя не учитывать содержимого включений растворов и расплавов (фототабл. XXVII) в минералах разного происхождения. При углубленном дальнейшем изучении изоморфизма представляется очень важным научиться отделять элементы, находящиеся в растворах включений и их минералах-узниках, от элементов, действительно входящих в кристаллическую решетку включающего минерала. Автору кажется, что приведенные фрагменты, касающиеся отражения содержимого включений

Таблица 26

**Результаты микрохимического анализа водной и кислотной вытяжек из включений в флюорите Бектауата (содержание ионов в 20 *мл* вытяжки из 115 *г* флюорита)***

| Ионы | Водная вытяжка при 20° С | | Кислотная вытяжка (0,1%-ный раствор $HNO_3$ при 95°) | |
|---|---|---|---|---|
| | *мг*/20 *мл* | *мг·экв* | *мг*/20 *мл* | *мг·экв* |
| $Na^+$ | 0,86 | 0,038 | 0,78 | 0,034 |
| $K^+$ | 0,38 | 0,010 | 0,18 | 0,004 |
| $Zi^+$ | 0,04 | 0,006 | 0,06 | 0,008 |
| $Ca^{2+}$ | 0,74 | 0,038 | 17,00 | 0,850 |
| $Mg^{2+}$ | 0,20 | 0,016 | 0,46 | 0,038 |
| $Mn^{2+}$ | — | — | — | — |
| $Fe^{3+}$ | — | — | 0,04 | 0,002 |
| $Al^{3+}$ | — | — | — | — |
| $SiO_2$ | 0,12 | — | 0,16 | — |
| $Cl^-$ | 2,00 | 0,056 | 0,08 | 0,002 |
| $SO_4^{2-}$ | — | — | — | — |
| $HCO_3^-$ | 1,22 | 0,020 | — | — |
| $CO_3^{2-}$ | — | — | — | — |
| $BO_3^{3-}$ | 0,20 | 0,010 | Не определялось | |
| $SiF_6^{2-}$ | — | — | — | — |
| $F^-$ | 0,34 | 0,018 | 16,00 | 0,842 |
| Σ анионов | — | 0,108 | — | 0,936 |
| Σ катионов | — | 0,104 | — | 0,844 |
| pH | 5,5 | — | — | — |

Аналитик З. С. Грынькив.

Таблица 27

**Результаты спектрального анализа сухого остатка вытяжек (в %)***

| Элементы | Водная вытяжка | Кислотная вытяжка |
|---|---|---|
| Al | Тысячные доли | Тысячные доли |
| Ba | Сотые » | Сотые доли |
| Ca | Десятые » | 3 |
| Cr | — | Сотые доли |
| Cu | Тысячные доли | » » |
| Fe | — | Тысячные » |
| La | <0,001 | Десятые » |
| Mg | Сотые доли | Сотые » |
| Mn | Тысячные » | Десятые » |
| Na | Десятые » | Тысячные » |
| Ni | — | Сосые » |
| Pb | — | » » |
| Si | Сотые доли | Тысячные » |
| Ti | <0,001 | — |
| Zn | Десятые доли | Десятые доли |
| Zr | — | — |

* Аналитик С. Б. Казаков.

материнских минералообразующих сред на некоторых свойствах и элементном составе минералов, заслуживают серьезного внимания минералогов, потому что они прямо относятся не только к теории, но и к практике производства специальных стекол, флотации руд, выращивания кристаллов для лазеров и мазеров и т. п.

## СОВРЕМЕННОЕ РАЗВИТИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ВКЛЮЧЕНИЙ РАСТВОРОВ И РАСПЛАВОВ И ИХ КООРДИНАЦИЯ

Развитие интереса к исследованиям консерватов геохимических сред во включениях за последние десятилетия можно показать посредством следующих статистических данных.

В 1920—1939 гг. в мировой литературе было опубликовано только 10 статей по включениям, из которых, к сожалению, ни одна не вышла на русском языке.

В 1940—1949 гг. вышли из печати уже 49 работ, из которых 22 в СССР, в основном связанные с исследованиями первой специальной лаборатории по включениям, организованной автором на геологиче-



Рис. 56. Первая группа советских исследователей включений (Львовский университет, 1951 г.)
Сидят (слева направо): Н. П. Ермаков, Н. И. Мязь, А. В. Пизнюр; стоят — В. А. Калюжный, Л. И. Колтун, Ю. А. Долгов, Е. М. Лазько, В. Ф. Лесняк

ском факультете Львовского университета. Именно на базе этой лаборатории в СССР возникла первая группа исследователей минералообразующих растворов — аспирантов и сотрудников, защитивших в разное время докторские и кандидатские диссертации, связанные общей проблемой (рис. 56).

С середины века в нашей стране наметился резкий подъем в разносторонних исследованиях включений. В период с 1950 по 1959 гг. из 252 статей и книг на русском языке было опубликовано уже 198 работ, а в 1960—1967 гг. на трех языках было выпущено 456 работ, из которых 398 вышли в СССР. Всего за период с 1950 по 1968 г. вышло в свет свыше 1000 статей и книг.

За последние 14 лет в таких странах, как США, Франция, Канада, Румыния, Голландия, Бельгия, Греция, Швейцария, Монголия, Япония и др., многие исследователи генезиса эндогенных рудных месторождений защитили диссертации, в большой мере основанные на

результатах учета и изучения газово-жидких и частично магматических включений и развития новых методов их исследования.

В настоящее время с удовлетворением можно отметить, что наша страна шла и идет в авангарде этих исследований. С 1950 г. в Советском Союзе были успешно защищены 80 кандидатских и три докторские диссертации, по содержанию целиком или частично связанные с экспериментальными исследованиями природных физико-химических систем включений. Более половины из них было выполнено под руководством автора его аспирантами и соискателями.

За последние 10 лет на английском, французском и немецком языках были опубликованы семь книг и брошюр по включениям (Смит, Дейша, Ипма, Бринк, Штальдер, Макейрас, Ермаков). На русском и украинском языке вышли в свет девять книг (Захарченко, Смит, Лазько, Калюжный, Лесняк, Костылева, Хитаров, Икорский, Базарова).

Такой прогресс в исследованиях газово-жидких включений привел к тому, что при встрече геологов на международном форуме в Копенгагене в 1960 г. (XXI сессия МГК) обнаружилось желание обеспечить более тесный, чем ранее, обмен мнениями и организовать международную координацию работ. Для этих целей был создан оргкомитет в составе представителей от СССР, США и Франции для выявления заинтересованных в этих вопросах геологов разных стран и последующего создания международной комиссии по обмену опытом в исследованиях включений рудообразующих флюидов (COFFI).

В результате работы этого оргкомитета к XXII сессии МГК в Нью-Дели определилась возможность организации национальных секций, групп и индивидуальных представителей в международной комиссии от 19 стран. Таким образом, нужно было найти только наиболее подходящую соподчиненность комиссий в системе международного Союза геологических наук.

Сходные задачи стояли и перед несколькими другими зародившимися к этому времени международными геологическими сообществами. В частности, «Временная комиссия по генезису рудных месторождений», возникшая осенью 1963 г. на симпозиуме по постмагматическому рудообразованию в Праге, на совместном заседании членов этой комиссии и общества экономических геологов 19 декабря 1964 г. преобразовала себя в постоянную «Международную ассоциацию по изучению генезиса рудных месторождений» (IAGOD).

На том же заседании было одобрено вхождение в состав этой ассоциации «Комиссии по рудообразующим растворам во включениях» (COFFI), начало организации которой было положено на XXI геологическом конгрессе в Копенгагене. Председателем этой комиссии был избран Н. П. Ермаков (СССР), вице-председателем Э. Роддер (США), а ученым секретарем Г. Дейша (Франция).

Желание указанной ассоциации и комиссии войти в международный Союз геологических наук было оглашено на совместном заседании Совета конгресса и Союза геологических наук 21 декабря 1964 г. в Нью-Дели.

Оргкомитет комиссии между XXI и XXII сессиями МГК в предварительном виде наметил и поставил на обсуждение в некоторых национальных секциях исследователей включений основные положения, цели и задачи будущей комиссии. В частности, на первом организационном заседании советской национальной секции исследователей включений, состоявшемся сразу же после I симпозиума в МГУ 24 мая 1963 г., в порядке рекомендаций к выработке устава комиссии, было сформулировано следующее.

«Во всех работах, касавшихся генезиса постмагматических (эманационных) глубинных месторождений металлов и неметаллических ископаемых, справедливо отмечается решающее значение рудопроиз-

водящих растворов. Без действия последних, даже в самой благоприятной литолого-тектонической обстановке, никто из геологов не представляет возможным образование этих месторождений. Однако непосредственное изучение этих активных природных рудообразующих сред, действовавших в далеком геологическом прошлом, почти не производилось. Представления о них базировались в основном на экспериментах по воспроизведению искусственных систем газообразных и жидких растворов, с углубленными физико-химическими интерпретациями возможного их действия. Подобные исследования были и будут плодотворны для осмысливания явлений эндогенного рудообразования. Однако при строгом подходе не может быть полной уверенности в значительной степени соответствия лабораторных систем действительным природным системам рудообразующих флюидов несравнимо более сложным в термодинамическом и химическом отношении.

Представляется совершенно необходимым использование и прямых свидетелей процессов рудообразования — герметизированных в минералах систем, которые сохранились до наших дней в виде очень разнообразных включений природных образцов расплавов и растворов. С помощью вполне доступных каждому исследователю ретроспективных изменений в фазовых отношениях этих природных систем путем нагревания, охлаждения и измерения фаз, а также качественного и количественного микрохимических и спектральных анализов возможно математически точно и химически достоверно судить об истинных значениях и относительных изменениях физико-химических параметров глубинного рудообразования.

Международная комиссия должна исходить из необходимости привлечь к теории рудообразования и практике изучения эндогенных рудных месторождений экспериментальные данные, полученные при непосредственных исследованиях природных образцов рудообразующих растворов и расплавов. Ее основное назначение должно заключаться во всемерном содействии конкретному выявлению значения промежуточного звена генетической триады: литолого-тектоническая обстановка — *природные рудообразующие среды* — минеральные парагенезисы месторождений».

Членами оргкомитета были согласованы между собой и основными национальными секциями-учредителями следующие цели COFFI, вошедшие в ее устав *.

1. Способствовать международному сотрудничеству исследователей рудообразующих растворов и расплавов, законсервированных в вакуолях минералов, и распространению конкретного познания природных минералообразующих сред посредством экспериментального изучения их систем, предоставляющих прямые геологические и физико-химические факты.

2. Содействовать «Международной ассоциации по изучению генезиса рудных месторождений» в развитии теории глубинного рудообразования путем выяснения истинного и относительного значения физико-химических параметров минералообразования и их изменений во времени и пространстве при формировании месторождений и рудных полей.

3. Совершенствовать и унифицировать разнообразные методы исследования включений, технику их изучения, методику математической обработки и физико-химической интерпретации результатов экспериментов с системами этих включений в природных и искусственно выращенных минералах и использовать результаты для теории и практических целей.

---

* Опубликован в сб. «Исследования минералообразующих растворов». Изд-во «Недра», 1966.

4. Обеспечить унификацию терминологии во включениях путем составления международного терминологического словаря, атласа-определителя включений, совершенствование их классификации по способу образования и фазовому составу.

5. Осуществлять взаимную информацию, организацию переводов статей и книг и составление библиографических данных по всем национальным секциям.

6. Упорядочить реферирование статей по включениям, осуществляющееся в настоящее время в международных реферативных журналах без должного раскрытия действительного содержания этих статей и выявления их значения при решении тех или иных генетических вопросов.

7. Проводить обмен книгами и оттисками опубликованных статей с целью составления национальных библиотек оттисков, а также препаратами для демонстрационных коллекций включений, микрофотографиями и микрофильмами по включениям.

8. Организовывать, по согласованию с ассоциацией, заседания комиссии по обсуждению результатов и планов исследований, секций рудообразующих растворов на научных симпозиумах, совещаниях и конференциях, а также проводить семинары в национальных секциях (комиссиях) *.

9. Публиковать информационный сборник или бюллетень комиссии в трудах «Международной ассоциации по изучению генезиса рудных месторождений».

10. Содействовать внедрению в практику новых методов поисков и разведки глубинных месторождений и рудных тел путем использования включений растворов, а также выращивания искусственных кристаллов по рецептам, полученным путем анализов включений.

Было установлено, что членами комиссии являются представители национальных секций и групп той или иной страны. Каждая страна может быть представлена в комиссии только одной секцией или группой, имеющей один голос. Бюро комиссии состоит из президента, вице-президента и ученого секретаря, которые избираются на четыре года и утверждаются ассоциацией в качестве членов ее исполнительного комитета. Юридическое местонахождение комиссии определяется местом нахождения ее председателя. Национальные секции и группы каждой страны выбирают свое руководство на тот же срок и работают при национальных комитетах геологов, входящих в международный Союз геологических наук, научных советах по рудообразованию национальных академий или в координации с другими подходящими учреждениями и научными обществами страны.

Советская национальная секция, входящая в «Международную комиссию по рудообразующим растворам во включениях», проводит свою работу при Научном совете по рудообразованию АН СССР и через советское бюро «Международной ассоциации по изучению генезиса рудных месторождений» при национальном комитете геологов СССР. В настоящее время она объединяет исследователей рудообразующих растворов и расплавов во включениях по 75 учебно-научным и геолого-производственным организациям 38 городов страны. Секция имеет республиканские отделения, координирующие работу учрежденческих и городских групп. На правах республиканских отделений в РСФСР работают Московское, Новосибирское, Ленинградское и Ростовское отделения исследователей включений. Московское отделение, например, объединяет исследователей из 20 учреждений и организует

---

* Первые семинары были приведены автором в Праге и Братиславе в период с 8 сентября по 6 октября 1966 г.

систематические научные заседания с докладами по обмену опытом и достижениями.

Советская национальная секция, работающая под руководством автора, в период с 1963 по 1968 г. провела три всесоюзных совещания (Москва, май 1963 г., Новосибирск, сентябрь, 1965 г., Александров, сентябрь, 1968 г.), решения которых были ранее опубликованы*. Труды этих совещаний и тезисы докладов изданы в виде шести сборников научных статей, а два сборника подготавливаются к выпуску в свет в издательствах «Наука» и «Недра». Кроме того, секция обеспечивает участие в других совещаниях в СССР и за рубежом. Секция сформировала в области своих интересов всесоюзную библиотеку оттисков статей, книг и авторефератов диссертаций, прямо связанных с третьим каналом генетической информации в области эндогенных процессов минералообразования, а также шлифотеку препаратов с включениями всех известных видов и разновидностей, на базе которой создается фотоатлас-определитель этих включений. Советская секция поддерживает связи с другими родственными национальными секциями и осуществляет с ними обмен оттисками статей. Все это существенно содействует развитию новой отрасли науки.

Работа «Международной комиссии по рудообразующим растворам во включениях (COFFI)» протекает согласно ее уставу (см. выше). Комиссия обеспечивает организацию докладов на сессиях МГК и других международных совещаниях. В частности, на XXII сессии МГК в Нью-Дели (1964 г.) были прочитаны шесть докладов по включениям, а на XXIII сессии в Праге 22—23 августа 1968 г. был успешно проведен I Международный симпозиум по термодинамической геохимии эндогенных процессов рудообразования (по включениям растворов и расплавов в минералах). На этом симпозиуме были заслушаны и обсуждены 12 докладов по трем проблемам: 1) термодинамика и физико-химия эндогенных процессов минералообразования по системам микровключений в минералах; 2) генезис и кристалломорфология вакуолей включений; 3) прикладное значение использования включений при поисках и разведке постмагматических рудных месторождений. В научных и организационных заседаниях участвовали делегации из 10 стран (Австрия, Англия, Болгария, Монголия, Румыния, СССР, США, Финляндия, Чехословакия и Япония). II Международный симпозиум COFFУ было решено провести в Японии в августе—сентябре 1970 г. В связи с этим в руководство комиссией в качестве второго заместителя председателя был избран профессор токийского инженерного университета Хидеки Имаи, на которого и была возложена организация II симпозиума (рис. 57).

Исследования консерватов минералообразующих сред во включениях и их использование в теории и практике после успешного решения в середине нашего века ряда радикальных вопросов находятся в настоящее время на бурном подъеме. Эта монография, как надеется автор, будет содействовать дальнейшему развитию рудогении и созданию новых методов поисков эндогенных полезных ископаемых, не выходящих на поверхность Земли. Несмотря на значительные достижения в использовании включений как надежных природных свидетелей о физико-химических факторах и процессах глубинного рудообразования автор рассматривает эти достижения, так же как и настоящую монографию, только в качестве *начала большого пути* развития термо-

---

* См. «Советская геология», № 12 за 1963 г., № 6 за 1969 г. и сб. «Минералогическая термометрия и барометрия», том II, изд-во «Наука», 1968. Информации об этих совещаниях после их проведения публиковались в журналах «Геология рудных месторождений», «Геохимия», ЗВМО, Вестник МГУ (серия «Геология»), Львовский «Минерал. сборник» и в ряде других изданий. *(Прим. ред.)*.

барогеохимии и ряда направлений точных генетических исследований с применением меры и числа к глубинным процессам минералообразования далекого геологического прошлого.

Даже простое обозрение оглавления этой книги показывает многообразие вопросов в ней затронутых или решенных хотя бы в первом приближении. Однако при этом можно увидеть, что все они связаны и находятсоя в одной неразрывной цепи, отражающей единство материи от ее мега- и макрообъектов до микро- и ультрамикрообъек-

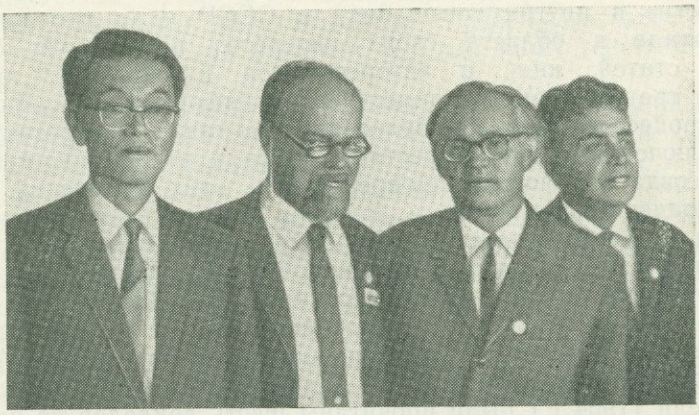


Рис. 57. На I международном симпозиуме XXIII сессии МГК в Праге (1968 г.)
Слева направо: Х. Имаи (Япония), Э. Роддер (США), Н. П. Ермаков, Ю. А. Долгов (оба СССР)

тов включений, использованию которых для науки и практики в основном посвящена монография. Глубокий смысл фразы В. И. Вернадского (1910 г.), что в песчинке или капле — как в микрокосме — отражается общий состав космоса, мы в какой-то мере попытались раскрыть в этой книге для привлечения внимания геологов к третьему источнику информации в минеральной природе — включениям микроконсерватов минералообразующих геохимических сред.

Методологическая цепь расшифровки процессов и явлений минерального мира, методы и методики использования кода генетической информации систем микровключений растворов и расплавов в статическом состоянии являлись главным содержанием данной монографии. Несравнимо более полную информацию с мерой и числом в термобарогеохимии глубинных процессов можно получать путем аналитических и экспериментальных динамических исследований порций «живых» минералообразующих микросистем. Показ этого является главным содержанием следующей нашей монографии.

## ЛИТЕРАТУРА

*Список литературы к первому разделу*


1. Ажгирей Г. Д. Структурная геология. Изд-во МГУ, 1956.

2. Апродов В. А. Классификация наук о Земле в связи с геологическими формами движения материи. В сб. «Жизнь Земли», т. 1. Изд-во МГУ, 1961.

3. Белевцев Я. Н. Структурные условия образования рудных месторождений. Изд-во АН УССР, 1961.

4. Белоусов В. В. Структурная геология. Изд-во МГУ, 1961.

5. Белоусов В. В. Земная кора и верхняя мантия материков. Изд-во «Наука», 1966.

6. Белов Н. В. Очерки по структурной минералогии. Минер. сб. Львов. геол. об-ва, 1954, № 8.

7. Белов Н. В. Кристаллохимия силикатов с крупными катионами. Изд-во АН СССР, 1961.

8. Белянкин Д. С. На сколько же в действительности растворяется кремнекислота в водяном паре ниже критической температуры? «Советская геология», 1944, № 3.

9. Бетехтин А. Г. О влиянии режима серы и кислорода на парагенетические соотношения минералов в рудах. Изв. АН СССР, серия геол., 1949, № 3.

10. Бетехтин А. Г. Гидротермальные растворы, их природа и процессы рудообразования. В сб. «Основные проблемы в учении о магматогенных рудных месторождениях». Изд-во АН СССР, 1953.

11. Бетехтин А. Г. О причинах движения гидротермальных растворов. В сб. «Основные проблемы в учении о магматогенных рудных месторождениях». Изд-во АН СССР, 1953.

12. Бер Ф., Шерер Д., Спейсер Г. Справочник для геологов по физическим константам. Изд-во иностр. лит., 1949.

13. Билибин Ю. А. Металлогенические провинции и металлогенические эпохи. Госполитиздат, 1955.

14. Болдырев А. К. и др. Курс минералогии. ОНТИ—НКТП СССР, 1936.

15. Букановский В. М. О предмете геологии и ее месте в системе неорганического естествознания в свете воззрений Ф. Энгельса. Уч. зап. Пермск. гос. ун-та, 1955, т. 9, вып. 1.

16. Букановский В. М. К вопросу о предмете и классификации современной геологии. В сб. «Философские вопросы естествознания». Изд-во МГУ, 1960.

17. Валяшко М. Г. Закономерности формирования месторождений солей. Изд-во МГУ, 1962.

18. Вернадский В. И. Заметки о распространении химических элементов в земной коре. Изв. АН, 1910. стр. 1129—1148.

19. Вернадский В. И. История минералов земной коры, т. 2. История природных вод, ч. I, вып. 1, 1933; вып. 2, 1934.

20. Виноградов А. П. Химическая эволюция Земли. Изд-во АН СССР, 1959.

21. Виноградов А. П. Происхождение оболочек Земли. Изв. АН СССР, 1962, № 11.

22. Виноградов А. П. Введение в геохимию океана. Изд-во «Наука», 1967.

23. Власов К. А. О теории дисиликации гранитных пегматитов. Изв. АН СССР, серия геол., 1938, № 2.

24. Гзовский М. В. Основные вопросы тектонофизики и тектоники Байджансайского антиклинория. Изд-во АН СССР, ч. 1—2, 1959, ч. 3—4, 1963.

25. Долгов Ю. А. Особенности генезиса высокотемпературных кварцев. Минер. сб. Львов. геол. об-ва, 1955, № 9.

26. Грейтон Л. Природа рудообразующего флюида. Госгеолиздат, 1946.

27. Дударев А. Н. Значение теплоемкости в оценке роли вмещающих горных пород при оруденении. «Геология рудных месторождений», 1965, № 4.

28. Елисеев Н. А. Структурная петрология. Изд-во ДГУ, 1953.

29. Ермаков Н. П. Геология и полиметаллические рудопроявления Западного Дарваза. В сб. «Геология и полезные ископаемые Средней Азии». Изд-во АН СССР, 1940.

30. Ермаков Н. П. Определение температур образования гидротермальных минералов путем изучения жидких включений. Докл. АН СССР, 1944, т. 45, № 5.

31. Ермаков Н. П. О происхождении кварцевых жил и месторождений горного хрусталя. «Советская геология», 1946, № 12.

32. Ермаков Н. П. Исследования минералообразующих растворов. Харьков, 1950.

33. Ермаков Н. П. Исследования температуры и агрегатного состояния минералообразующих растворов. Автореф. дисс. на соиск. уч. степ. докт. геол.-минер. наук. Изд-во ГИН АН СССР, 1950.

34. Ермаков Н. П. Включения маточных растворов в минералах и их значение для теории и практики. Тр. ВНИИП, 1957, т. I, вып. 2.

35. Ермаков Н. П. Об основной минеральной и геологических формах движения материи. В сб. «Жизнь Земли», т. I. Изд-во МГУ, 1961.

36. Ермаков Н. П. Структуры локализации полезных ископаемых. Тр. ВНИИП, т. 7, 1962.

37. Заварицкий А. Н. Основной вопрос физической химии процесса образования пегматитов. Изв. АН СССР, серия геол., 1944, № 5.

38. Заварицкий А. Н. Предисловие редактора к книге Л. Грейтона «Природа рудообразующего флюида». Госгеолиздат, 1946.

39. Заварицкий Н. А., Соболев В. С. Физико-химические основы петрографии изверженных горных пород. Госгеолтехиздат, 1961.

40. Залесский Б. В., Санина Е. А. К вопросу определения проницаемости массивных горных пород. Тр. ИГЕМ, 1966, вып. 6.

41. Захарченко А. И. Минералообразующие растворы и генезис кварцевых жил. Госгеолтехиздат, 1955.

42. Исследования минералообразующих растворов (по включениям). Под ред. Н. П. Ермакова. Тр. ВНИИП, 1957, т. 1, вып. 2.

43. Исследования минералообразующих растворов (по включениям). Под ред. Н. П. Ермакова. Тр. ВНИИП, 1958, т. 2, вып. 2.

44. Исследования минералообразующих растворов. Под ред. Н. П. Ермакова. Изд-во «Недра», 1966.

45. Кадик А. А. Состояние воды и силикатных компонентов в расплавах (магмах) кислого состава при высоких давлениях паров $H_2O$. В сб. «Геохимические исследования в области повышенных давлений и температур». Изд-во «Наука», 1965.

46. Карпачева С. М. О постоянной подвижности атомов неорганического мира. «Вопросы философии», 1953, № 5.

47. Калюжный В. А. Методи вивчення багатофазовых включень у мінералах. Видавництво АН УРСР, 1960.

48. Кедров Б. М. Энгельс и естествознание. ОГИЗ, 1947.

49. Кедров Б. М. О классификации наук. «Вопросы философии», 1955, № 2.

50. Кедров Б. М. О соотношении форм движения материи в природе. «Вопросы философии», 1959, № 4.

51. Кобранова В. Н. Физические свойства горных пород. Гостоптехиздат, 1962.

52. Коржинский Д. С. Биметасоматические флогопитовые и лазуритовые месторождения архея Прибайкалья. Тр. Ин-та геол. наук АН СССР, вып. 29, петрогр. серия, 1947, № 10.

53. Коржинский Д. С. Фильтрационный эффект в растворах и его значение в геологии. Изв. АН СССР, серия геол., 1947, № 2.

54. Коржинский Д. С. Очерк метасоматических процессов. В сб. «Основные проблемы в учении о магматогенных рудных месторождениях». Изд-во АН СССР, 1955.

55. Королев А. В. Структуры рудных полей и месторождений. Ташкент. Изд-во САИИ, 1936.

56. Королев А. В. Избранные труды, т. I. Изд-во АН Узб. ССР, 1963.

57. Королев А. В., Шехтман П. А. Структурные условия размещения постмагматических руд. Изд-во «Недра», 1965.

58. Костылева Е. Е. Некоторые методы изучения рудоносного кварца. Изд-во «Наука», 1964.

59. Котляр В. Н. Экструзивы, эффузивы и оруденение. «Геология и разведка», 1960. № 9.

60. Котляр В. Н. Об особенностях послемагматических месторождений. «Геология и разведка», 1961, № 1.

61. Котляр В. Н. О пространственном размещении месторождений, связанных с вулканическими жерлами и трубками. Зап. Всес. минер. об-ва, 1962, № 2.

62. Крейтер В. М. Структуры рудных полей и месторождений. Госгеолтехиздат, 1956.

63. Куражковская Е. А. Проблема развития неорганической природы и принцип актуализма в геологии. В сб. «Философские вопросы естествознания». Изд-во МГУ, 1960.

64. Лазько Е. М. Хрусталеносные кварцевые жилы и их генезис. Изд-во Львовск. ун-та, 1957.

65. Лесняк В. Ф. Основы анализа физико-химических свойств минералообразующих растворов по включениям в минералах. Изд-во Львовск. ун-та, 1964.

66. Линдгрен В. Минеральные месторождения, вып. 1. ОНТИ, 1934.

67. Ломизе Г. М. Фильтрация в трещиноватых породах. Госэнергоиздат, 1951.

68. Мелюхин С. Г. Неисчерпаемость свойств элементарных частиц. В сб. «Некоторые философские вопросы естествознания». Изд-во АН СССР, 1957.

69. Мелюхин С. Г. О диалектике развития неорганической природы. Госполитиздат, 1960.

70. Наумов В. Б., Ходаковский И. Л. II всесоюзное совещание по геотермобарометрии. «Геохимия», 1966, № 2.

71. Николаев В. А. О процессе отделения летучих соединений из магмы. Изв. АН СССР, серия геол, 1944, № 5.

72. Николаев В. А. О тройных системах с летучими компонентами и этапах глубинного магматического процесса. Зап. Всес. минер. об-ва, 1947, ч. 76, № 1.

73. Николаев В. А. К вопросу о генезисе гидротермальных растворов и этапах глубинного магматического процесса. В сб. «Основные проблемы в учении о магматогенных рудных месторождениях». Изд-во АН СССР, 1953.

74. Николаев В. А., Доливо-Добровольский. Основы теории процессов магматизма и метаморфизма. Госгеолтехиздат, 1962.

75. Обручев В. А. Рудные месторождения, ч. 1 (общая). Изд-во Моск. горн. акад., 1928.

76. Овчинников Л. Н. Некоторые вопросы магматогенного рудообразования. Изв. АН СССР, серия геол., 1959, № 4.

77. Овчинников Л. Н. Об участии газов в постмагматическом рудообразовании и выпадении пневматолитовой фазы. В сб. «Проблемы постмагматического рудообразования», т. 2. Прага, 1965.

78. Овчинников Л. Н., Шляпников Д. С. Перенос металлов в виде комплексных соединений. В сб. «Исследование природы и техника минералообразования». Изд-во «Наука», 1966.

79. Овчинников Л. Н., Шур А. С. О фильтрационном эффекте при просачивании растворов через минеральные фильтры. Тр. IV совещ. по эксперимент. минералог. и петрогр., вып. 2. Изд-во АН СССР, 1953.

80. Огиевский В. М. Термические параметры горных пород и закладочных материалов. «Горный журнал» ,1949, № 10.

81. Ольшанский Я. И. Об ионно-электронных жидкостях. Докл. АН СССР, 1950, т. 61, № 4.

82. Первый симпозиум по изучению газово-жидких включений в минералах. «Советская геология», 1963, № 12.

83. Пиннекер Е. В. Классификация подземных рассолов по степени минерализации. «Советская геология», 1961, № 9.

84. Поспелов Г. Л. О характере геологии как науки и ее месте в естествознании. Изв. АН СССР, серия геол., 1960, № 11.

85. Процессы минералообразования и полезные ископаемые. Под ред. Н. П. Ермакова. Музей землеведения. Путеводитель. Изд-во МГУ, 1957.

86. Пэк А. В. Трещинная тектоника и структурный анализ. Изд-во АН СССР, 1939.

87. Пэк А. В., Вольфсон Ф. И., Лукин Л. Н. Об изучении структур эндогенных рудных месторождений. «Геология рудных месторождений», 1960, № 4.

88. Ребиндер П. А. Структурно-механические свойства пород. В сб. «Проблемы тектонофизики». Госгеолтехиздат, 1960.

89. Решение I совещания по геологической термометрии и барометрии. В сб. «Минералогическая термометрия и барометрия». Изд-во «Наука», 1965.

90. Розанов Ю. А. Экспериментальные исследования деформаций горных пород при высоких давлениях и Т до 20° С. Тр. ИГЕМ, 1962, вып. 66.

91. Руткевич М. Н. О формах движения в неорганической природе. Уч. зап. Уральск. гос. ун-та, 1957, вып. 21.

92. Руткевич М. Н. К вопросу о классификации форм движения материи. «Научные доклады Высшей школы». Философские науки. 1958, № 11.

93. Смирнов С. С. Некоторые замечания о сульфидно-касситеритовых месторождениях. Изв. АН СССР, серия геол., 1937, № 5.

94. Смирнов С. С. О современном состоянии теории образования магматогенных рудных месторождений. Зап. Всес. минер. об-ва, 1947, № 1.

95. Смит Ф. Г. Обзор физико-химических свойств надкритических флюидов. В сб. «Экспериментальные исследования в области петрографии и рудообразования». Изд-во иностр. лит., 1954.

96. Смит Ф. Г. Геологическая термометрия по включениям в минералах. Под ред. и с дополнениями Г. Г. Леммлейна. Изд-во иностр. лит., 1956.

97. Смит Ф. Г. Физическая геохимия. Изд-во «Недра», 1968.

98. Смирнов В. И. Геология ртутных месторождений Средней Азии Госгеолиздат, 1947.

99. Смирнов В. И. Геологические основы поисков и разведка рудных месторождений. Изд-во МГУ, 1954.

100. Смирнов В. И. Проблемы поисков рудных месторождений, не имеющих выхода на поверхность Земли. «Советская геология», 1955, № 49.

101. Смирнов В. И. Геология полезных ископаемых. Изд-во «Недра», 1965.

102. Соболев В. С. Введение в минералогию силикатов. Изд-во Львовск. ун-та, 1949.

103. Страхов Н. М. Основы теории литогенеза, т. 1, 2, 3. Изд-во АН СССР, 1960—1962.

104. Страхов Н. М. Этапы развития внешних геосфер и осадочного породообразования в истории Земли. Изв. АН СССР, серия геол., 1962, № 12.

105. Танатар И. И. Теоретические основы учения о рудных месторождениях. Гостехиздат Украины, 1950.

106. Требин Г. Ф. Фильтрация жидкостей и газов в пористых средах. Гостоптехиздат, 1959.

107. Усов М. А. Структурная геология. Госгеолиздат, 1940.

108. Ферсман А. Е. Геохимия, т. 1, 2. ОНТИ, 1934.

109. Ферсман А. Е. Пегматиты, т. 1. Изд-во АН СССР, 1932.

110. Ферсман А. Е., Коган В. И. Минеральное сырье зарубежных стран. Изд-во АН СССР, 1947.

111. Хаин В. Е. Некоторые философские вопросы современной геологии. «Научные доклады Высшей школы». Философские науки, 1958, № 2.

112. Хаин В. Е. Диалектическое взаимодействие эндогенных и экзогенных процессов как основа развития земной коры. В сб. «Жизнь Земли», т. I. Изд-во МГУ, 1961.

113. Хаин В. Е. Общая геотектоника. Изд-во «Недра», 1964.

114. Хамрабаев И. Х. Магматизм и постмагматические процессы в Западном Узбекистане. Изд-во АН Уз. ССР, 1958.

115. Хитаров Н. И. О состоянии остаточного магматического раствора (по экспериментальным данным). «Советская геология», 1939, № 7.

116. Хитаров Н. И., Иванов Л. А. Паровая и газовая фаза системы кремнезем—вода. «Советская геология», 1944, № 2.

117. Хитаров Н. И. Хлориды натрия и кальция как возможный источник возникновения кислых сред в глубинных условиях. Докл. АН СССР, 1954, т. 94, № 3.

118. Хитаров Н. И. Вопросы формирования гидротермальных растворов. Тр. Лаб. вулканологии, 1961, вып. 19.

119. Хитаров Д. Н. Изучение состава и других особенностей газово-жидких включений в минералах на современном этапе. В сб. «Минеральные микровключения». Изд-во «Наука», 1965.

120. Челинцев Г. В. О химической науке. «Вопросы философии», 1953, № 5.

121. Чухров Ф. В. Коллоиды в земной коре. Изд-во АН СССР, 1955.

122. Шмидт О. Ю. Метеоритная теория происхождения Земли и планет. Докл. АН СССР, 1944, т. 45, № 4.

123. Шрок Р. Последовательность в свитах слоистых пород. Изд-во иностр. лит., 1950.

124. Щербаков Д. И. Принципы и методика составления металлогенической карты. «Советская геология», 1945, № 5.

*Список литературы ко второму разделу*

1. Андрусенко Н. И., Киевленко Е. Я. Жидкие включения в исландском шпате. Тр. ВНИИСИМС и I симпозиума по газово-жидким включениям, 1966, т. 9.

2. Аншелес О. М. Начала кристаллографии. Госгеолиздат, 1952.

3. Ауэрбах А. Наблюдения над кристаллами топаза под микроскопом. Зап. Мин. об-ва, серия 2, 1870, № 5.

4. Базарова Ю. Т. Минералотермометрические исследования включений в минералах некоторых нефелиновых пород. Докл. АН СССР, 1965, т. 161, № 4.

5. Барабанов В. Ф. К вопросу о роли давления при процессах минералообразования в кварц-вольфрамитовых жилах. Докл. АН СССР, 1958, т. 120, № 2.

6. Барабанов В. Ф. Пневматолиз и генезис кварц-вольфрамитовых жил Восточного Забайкалья. В сб. «Проблемы постмагматического рудообразования», т. 2. Прага, 1965.

7. Белянкин Д. С. О воде в магме и магматических горных породах. «Геологический вестник», 1926, № 1—3.

8. Бируни Абу-р-Райхан. Собрание сведений о познании драгоценных минералов. Изд-во АН Уз. ССР, 1963.

9. Вадило П. С. Этюды по минералогической кристаллографии. Минер. сб. Львов. геол. об-ва. Львов, 1950, № 4.

10. Григорьев Д. П. Онтогения минералов. Изд-во Львов, ун-та, 1961.

11. Громов А. В., Крестин Е. М. О магматических включениях в породообразующих минералах никеленосных трапповых интрузивов. Докл. АН СССР, 1966, т. 175, № 2.

12. Грушкин Г. Г. Температуры образования кварцев месторождения Аурахмат. Изв. АН Узб. ССР, 1948, № 2.

13. Долгов Ю. А. О высокотемпературном ромбоэдрическом облике кристаллов кварца. Минер. сб. Львов. геол. об-ва, № 11. Львов, 1957.

14. Долгов Ю. А. Роль коллоидов в образовании кварца колчеданных месторождений Среднего Урала. «Проблемы геохимии», вып. 1. Изд-во Львов. ун-та, 1959.

15. Долгов Ю. А Термодинамические особенности формирования гранитных камерных пегматитов. Автореф. докт. дисс. М., ИГЕМ, 1968.

16. Ермаков Н. П Геология месторождений оптических минералов Средней Азии и температуры их образования. Тезисы канд. дисс. Самарканд, 1943.

17. Ермаков Н. П. Определение температур образования гидротермальных минералов путем изучения жидких включений. Докл. АН СССР, 1944, т. 45, № 5.

18. Ермаков Н. П. Происхождение и классификация жидких включений в минералах. Минер. сб. Львов. геол. об-ва, № 2. Львов, 1948.

19. Ермаков Н. П. Использование дефектов в кристаллах флюорита для изучения естественной истории минерала Минер. сб. Львов. геол. об-ва, № 2. Львов, 1948.

20. Ермаков Н. П. Критерии познания генезиса минералов и среда рудообразования. Минер. сб. Львов. геол. об-ва, № 3. Львов, 1949.

21. Ермаков Н. П. О первично-вторичных включениях в минералах. Минер. сб. Львов. геол. об-ва, № 3, приложение 1. Львов, 1949.

22. Ермаков Н. П. Исследования минералообразующих растворов. Изд-во Харьков. гос. ун-та, 1950.

23. Ермаков Н. П. Значение исследований включений в минералах для теории рудообразования и учения о минералообразующей среде. Тр. ВНИИП, т. I, вып. 2, 1957.

24. Ермаков Н. П. Состояние и деятельность флюидов в пегматитах камерного типа. Междунар. геол. конгр., XXII сессия. Сб. «Минералогия и генезис пегматитов». Изд-во «Недра», 1965.

25. Захарченко А. И. Результаты изучения жидких включений в горном хрустале Памира. Минер. сб. Львов. геол. об-ва, № 4. Львов, 1950.

26. Захарченко А. И. Минералообразующие растворы и генезис кварцевых. жил Памира. Материалы ВСЕГЕИ, нов. серия, 1955, № 6.

27. Икорский С. В. О некоторых включениях в нефелине горных пород Хибинского и Ловозерского щелочных массивов. В кн. «Материалы по минералогии Кольского полуострова», т. 2. Апатит, 1962.

28. Икорский С. В. Газово-жидкие включения в нефелине щелочных горных пород Хибинского массива. В сб. «Минералогическая термометрия и барометрия». Изд-во «Наука», 1965.

29. Икорский С. В. К методике изучения битуминозного вещества в полостях включений минералов изверженных пород. Зап. Всес. минер. об-ва, 1966, ч. 95, вып. 4.

30. Калюжный В. А. Новые наблюдения фазовых превращений в жидких включениях. Минер. сб. Львов. геол. об-ва, № 10. Львов, 1956.

31. Калюжный В. А. Методи вивчення багатофазових включень у мінералах. Відавництво АН УРСР, 1960.

32. Калюжный В. А. Исследования минералообразующих сред во включения в минералах. Карпато-Балканская ассоциация. Материалы комиссии по минералогии и геохимии, № 1. Изд-во Львовск. ун-та, 1961.

33. Калюжный В. А., Ляхов Ю. В. Включения касситерита и флюорита в кристаллах из пегматитов Волыни. Докл. АН СССР, 1962, т. 143, № 5.

34. Карпинский А. П. О нахождении в минеральных веществах включений жидкого угольного ангидрида. «Горный журнал», 1880, т. 2, № 4—5.

35. Карский Б. Е., Луговской Г. П. Методика изучения и характеристи-

ка включений в мусковите Мамско-Чуйского района. Тр. ВНИИасбеста и слюды, вып. 5. Промстройиздат, 1956.

36. Ковалишин З. И. К методике извлечения и исследования газовых компонентов жидких включений в минералах. В кн. «Материалы по геологии и геохимии полезных ископаемых Украины». Изд-во АН УССР, 1962.

37. Коржинский Д. С. Жидкие включения как причина мнимой пелитизации полевых шпатов. Докл. АН СССР, 1940, т. 29, № 2.

38. Коржинский Д. С. Факторы равновесия при метасоматозе. Изв. АН СССР, серия геол., 1950, № 3.

39. Коржинский Д. С. Теория процессов минералообразования. Изд-во АН СССР, 1962.

40. Лазаренко Е. И., Матковский О. И. О так называемых фонтебловских песчанистых кальцитах. Минер. сб. Львов. геол. об-ва, № 15, Львов, 1961.

41. Лазько Е. М. Замечания о генетическом значении некоторых типов твердых включений в кварце. Минер. сб. Львов. геол., об-ва, № 12. Львов, 1958.

42. Леммлейн Г. Г. Процесс залечивания трещин в кристалле и преобразования формы полостей вторичных жидких включений. Докл. АН СССР, 1951, т. 78, № 4.

43. Леммлейн Г. Г., Клия М. О. Особенности залечивания трещин в кристалле в режиме снижающейся температуры. Докл. АН СССР, 1952, т. 87, № 6.

44. Леммлейн Г. Г. Самозалечивание трещин в кристалле. Тр. Ин-та кристаллографии АН СССР, № 10. Изд-во АН СССР, 1954.

45. Леммлейн Г. Г. Классификация жидких включений в минералах. Зап. Всес. минер. об-ва, 1959, ч. 88, вып. 2.

46. Леммлейн Г. Г. К теории залечивания трещин в кристалле и о равновесной форме отрицательного кристалла. Тр. ВНИИП, 1960, т. 4, вып. 2.

47. Лесняк В. Ф. О типичном случае проявления первичных и вторичных включений в кварце. Тр. ВНИИП, 1958, т. 2, вып. 1.

48. Лоскутов А. В. О процессе залечивания трещин в кристаллах кварца. В сб. «Минералогия постмагматических процессов». Изд-во ЛГУ, 1959.

49. Лоскутов А. В. Жидкие и многофазовые включения в натролите. Зап. Всес. минер. об-ва, 1960, ч. 89, вып. 5.

50. Ляхович В. В. Акцессорные минералы как индикаторы геологических процессов. В сб. «Новые методы в минералогии и петрографии и результаты их применения». Госгеолтехиздат, 1963.

51. Маслова И. Н. Ультрамикрохимическое исследование состава жидкой и газовой фаз двухфазовых включений кварцев Волыни. «Геохимия», 1961, № 2.

52. Матвеев К. К. О нахождении битумов в минералах. Зап. Всес. минер. об-ва, 1947, ч. 76, № 2.

53. Магаровский В. В. О включениях битумов в кристаллах целестина. «Литология и полезные ископаемые», 1965, № 3.

54. Минский Н. А., Королев Ю. М. Ассоциация битуминозного вещества с кварцем, санонитом и кальцитом в интрузивных базальтах. Зап. Всес. минер. об-ва, 1961, т. 90, вып. 4.

55. Орлов Ю. А. Сингенетические и эпигенетические включения в кристаллах алмаза. Тр. Минер. музея, 1960, вып. 10.

56. Петерсилье И. А. Органическое вещество в изверженных и метаморфических горных породах Кольского полуострова. В кн. «Химия земной коры», т. 1. Изд-во АН СССР, 1963.

57. Приказчиков Л. А. О химизме кварцобразующих растворов в пегматитах Волыни. В сб. «Исследования минералообразующих растворов». Изд-во «Недра», 1966.

58. Самойлов Я. В. Минералогия жильных месторождений Нагольного кряжа. Материалы для геологии России, вып. 23. Петроград, 1908.

59. Сафронов Г. М., Хаджи В. Е. К вопросу о залечивании трещин в искусственных кристаллах кварца. Труды ВНИИП, 1957, т. 1, вып. 2.

60. Сафронов Г. М. Ксеногенные искусственные жидкие включения в сингенетическом кварце. Труды ВНИИП, 1958, т. 2, вып. 2.

61. Сливко М. М. О включениях растворов в кристаллах турмалина. Труды ВНИИП, 1958, т. 2, вып. 2.

62. Сливко М. М. О включениях растворов в кристаллах турмалина. Тр. ВНИИСИМС и I симпозиума по газово-жидким включениям, 1966, т. 9.

63. Смит Ф. Г. Геологическая термометрия по включениям в минералах. С дополнением Г. Г. Леммлейна. Изд-во иностр. лит., 1956.

64. Тектиты. Сб. статей. Пер. с англ. Изд-во «Мир», 1966.

65. Фекличев В. Г. Берилл. Изд-во АН СССР, 1964.

66. Фекличев В. Г. Закономерности в морфологии газово-жидких включений в кристаллах берилла. В сб. «Исследования минералообразующих растворов». Труды ВНИИСИМС и I симпозиума по газово-жидким включениям, 1966, т. 9.

67. Ферсман А. Е. Письменная структура пегматитов и причины ее возникновения. Труды, т. I. Изд-во АН СССР, 1952.

68. Хаджи В. Е., Сафронов Г. М. Включения раствора на границе затравки с наросшими слоями в искусственных кристаллах кварца. Тр. ВНИИП, 1958, т. 2, вып. 2.

69. Хакимов А. Х. Особенности агато- и хрусталеобразований в основных эффузивах. Автореферат канд. дисс., МГУ, 1966.

70. Чухров Ф. В. Коллоиды в земной коре. Изд-во АН СССР, 1955.

71. Шафрановский И. И. Кристаллы минералов. Изд-во ЛГУ, 1957.

72. Шафрановский И. И. и др. Систематика и внешняя симметрия кристаллических включений в монокристальной среде. Минер. сб. Львов. геол. об-ва, № 16. Львов, 1962.

73. Шефталь Н. Н. К вопросу о реальном кристаллообразовании. В сб. «Рост кристаллов», т. I. Изд-во АН СССР, 1957.

74. Шипулин Ф. К. О значении газово-жидких включений для расшифровки интрузивного процесса. Докл. АН СССР, 1953, т. 39, № 1.

75. Штернберг А. А. Влияние неоднородностей кристалла на скорость нарастания граней. Уч. зап. ЛГУ, серия геол. почв, 1945, вып. 13.

76. Шубников А. В. Кристаллография. Екатеринбург, 1923.

77. Шубников А. В. Как растут кристаллы. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1935.

78. Юшкин Н. П., Сребродольский Б. И. К изучению состава жидких включений в кристаллах самородной серы. Минер. сб., 1965, № 19, вып. 2.

79. Ясинская А. А. О включениях в каменных метеоритах. Минер. сб. Львов. геол. об-ва, № 21, вып. 3. Львов, 1967.

*Список литературы к третьему разделу*

1. Алимарин И. П. и Петрикова М. Н. Неорганический ультрамикроанализ. М., Изд-во АН СССР, 1960.

2. Базаров Л. Ш. Настольная алмазная пила для резки кварцевых пластинок. Материалы по генет. и экспер. минер., т. 4. Новосибирск, 1966.

3. Бакуменко И. Т. Закономерные кварц-полевошпатовые срастания и их генезис. Автореф. канд. дисс. Новосибирск, 1965.

4. Бетехтин А. Г. Курс минералогии. Изд. 2. Госгеолтехиздат, 1956.

5. Биркс Л. С. Рентгеновский микроанализ с помощью электронного зонда. Металлургиздат, 1966.

6. Бонштедт-Куплетская Э. М. Определение удельного веса минералов. Изд-во АН СССР, 1951.

7. Валяшко М. Г. Закономерности формирования месторождений солей. Изд-во МГУ, 1962.

8. Валяшко В. М., Когарко Л. Н. О включениях в апатитах Хибинского и Ловозерского массивов. Докл. АН СССР, 1966, т. 166.

9. Волынский И. С. Определение рудных минералов под микроскопом. Т. 1, изд. 2. Изд-во «Недра», 1966.

10. Гогоберидзе Д. Б. Некоторые объемные дефекты кристаллов. Изд-во ЛГУ, 1952.

11. Григорьев Д. П. Онтогения минералов. Изд-во Львовск. ун-та, 1961.

12. Грушкин Г. Г. К методике определения температур гидротермальных кварцев по жидким включениям. Докл. АН Уз. ССР, 1948, № 2.

13. Грушкин Г. Г. Некоторые итоги изучения температур образования кварцев и флюоритов. Тр. Ин-та геол. АН Уз. ССР, 1949, № 4.

14. Доломанова Е. И., Лидер В. В., Рожанский М. М., Элинсон М. М. Рентгеноспектральное изучение элементарного состава ультрамикрокристаллических фаз в газово-жидких включениях кварцев. В сб. «Минералогическая термометрия и барометрия», т. 1. Изд-во «Наука», 1968.

15. Ермаков Н. П. Температура образования гидротермальных оптических минералов Средней Азии. «Советская геология», 1944, № 1.

16. Ермаков Н. П. Использование дефектов в кристаллах флюорита для изучения естественной истории минерала. Минер. сб. Львовск. геол. об-ва, 1948, № 2.

17. Ермаков Н. П. Исследования минералообразующих растворов. Изд-во Харьковск. ун-та, 1950.

18. Ермаков Н. П. Состояние и деятельность флюидов в пегматитах камерного типа. В сб. «Минералогия и генезис пегматитов». Изд-во «Недра», 1965.

19. Ермаков Н. П. Термометрия глубинных процессов рудообразования. В сб. «Минералогическая термометрия и барометрия». Изд-во «Наука», 1965.

20. Ермаков Н. П. Методы использования газово-жидких включений при поисках и разведке постмагматических месторождений и слепых рудных тел. «Советская геология», 1966, № 9.

21. Ермаков Н. П., Мязь Н. И. Влияние жидких и газовых включений на величину потерь при прокаливании минералов. Тр. ВНИИП, 1957, т. 1, вып. 2.

22. Ермаков Н. П., Сухорский Р. Ф. Кривая для визуального определения температур образования гидротермального кварца. Минер. сб. Львовск. геол. об-ва, 1949, № 3.

23. Закржевская Н. Г. Исследования газово-жидких включений в породах Хибинских апатито-нефелиновых месторождений. Изв. вузов, «Геология и разведка». 1963, № 10.

24. Захарченко А. И. Результаты изучения жидких включений в горном хрустале Памира. Минер. сб. Львовск. геол. об-ва, 1950, № 4.

25. Икорский С. В. Органическое вещество в минералах изверженных горных пород. Л., Изд-во «Наука», 1967.

26. Калюжный В. А. Измерение показателей преломления свободных жидкостей и маточных растворов, заключенных в минералах, на столике Федорова. Минер. сб. Львовск. геол. об-ва. 1954. № 8.

27. Калюжный В. А. Многофазовые включения в минералах (Методы изучения состава и отдельные вопросы применения) Автореф. канд. дисс., Львов, 1954.

28. Калюжный В. А. К практической проверке точности метода измерений светопреломления веществ, заключенных в минералах, на столике Федорова. Уч. зап. Львовск. ун-та, серия геол., 1955, т. 35, вып. 8.

29. Калюжный В. А. К изучению состава минералов-узников многофазовых включений. Минер. сб. Львовск. геол. об-ва, 1958, № 12.

30. Калюжный В. А. Методы вивчення багатофазовых включень у минералах. Відавництво АН УРСР, 1960.

31. Калюжный В. А., Миколайчук М. П. Определение состава твердых фаз солей в сухом остатке раствора микровключений с помощью электронографии. Минералогическая термобарометрия, т. 2, Изд-во «Наука», 1968.

32. Карский Б. Е., Луговской Г. П. Методика изучения и характеристика включений в мусковите Мамско-Чуйского района. Промстройиздат, 1956.

33. Карский Б. Е. Условия образования, сравнительная характеристика и классификация промышленного мусковита. Автореф. канд. дисс., М., 1963.

34. Кац М. Я. Новые методы исследования минералов в гравитационном поле. Изд-во «Наука», 1966.

35. Кузнецов В. И. К методике наблюдения жидких включений в прозрачных минералах с помощью иммерсионных жидкостей. Минер. сб. Львовск. геол. об-ва. 1949, № 3.

36. Куршев С. А., Труфанов В. Н. Опыт изучения газово-жидких и твердых включений в минералах под электронным микроскопом. Сб. «Минералогическая термометрия и барометрия». Изд-во «Наука», 1964.

37. Ларсен Е. и Берман Г. Определение прозрачных минералов под микроскопом. ГОНТИ, 1937.

38. Леммлейн Г. Г. Секториальное строение кристаллов. Изд-во АН СССР, 1948.

39. Лесняк В. Ф. Основы анализа физико-химических свойств минералообразующих растворов по включениям в минералах. Изд-во Львовск. ун-та, 1964.

40. Лоскутов А. В. Интерферометрическое изучение включений в кварце. Тр. НИИГА. 1959, т. 96, вып. 8.

41. Ляхов Ю. В. Минеральный состав многофазовых включений в морионах из пегматитов Волыни. Сб. «Исследования минералообразующих растворов». Тр. ВНИИСИМС, т. 10 и I симпозиума по газово-жидким включениям. Изд-во «Недра», 1966.

42. Миллер Р. Л., Кан Дж. С. Статистический анализ в геологических науках. Изд-во «Мир», 1965.

43. Митропольский А. К. Техника статистических вычислений. Физматгиз, 1965.

44. Научитель М. А. О контроле метода декрепитации и использовании термовесового анализа. Сб. «Минералогическая термометрия и барометрия». Изд-во «Наука», 1968.

45. Ощепков П. К. Инфракрасный микроскоп. Вест. АН СССР, 1958, № 10.

46. Приказчиков Л. А. О химизме кварцобразующих растворов в пегматитах Волыни. Сб. «Исследования минералообразующих растворов». Тр. ВНИИСИМС, т. 9 и I симпозиума по газово-жидким включениям. Изд-во «Недра», 1966.

47. Сергеев Е. А., Марголин Л. С., Степанов П. А. и Белобрагина М. В. Высокочувствительный спектральный анализ металлометрических проб на халькофильные элементы. Тр. ВИТР, 1959, вып. 13.

48. Соболев В. С. Введение в минералогию силикатов. Изд-во Львовск. ун-та, 1949.

49. Соболев В. С. Федоровский метод. Госгеолтехиздат, 1954.

50. Татарский В. Б. Кристаллооптика и иммерсионный метод определения вещества. Изд-во ЛГУ, 1949.

51. Тезисы докладов II Всесоюзного совещания по геотермобарометрии. Новосибирск, 1965.

52. Трегер В. Е. Таблицы для оптического определения породообразующих минералов. Госгеолтехиздат, 1958.

53. Федоров Е. С. Теодолитный метод в минералогии и петрографии. Тр. Геол. ком., 1893, т. 10, № 2.

54. Фекличев В. Г. Новый метод микроскопического наблюдения газово-жидких микровключений в кристаллах. В кн. «Третья конференция молодых научных сотрудников ИМГРЭ АН СССР», тезисы докладов. Изд-во АН СССР, 1961.

55. Фекличев В. Г. Черно-белое и цветное оптическое окрашивание газово-жидких микровключений в кристаллах. В кн. «Новые методы в минералогии и петрографии и результаты их применения». Изд-во АН СССР, 1963.

56. Фекличев В. Г. Берилл. Изд-во «Наука», 1964.

57. Фекличев В. Г. Об оптических способах наблюдения газово-жидких включений в кристаллах. В сб. «Минералогическая термометрия и барометрия». Изд-во «Наука», 1965.

58. Фекличев В. Г. Закономерности в морфологии газово-жидких включений в кристаллах берилла. В сб. «Исследования минералообразующих растворов». Труды ВНИИСИМС, т. 9 и I симпозиума по газово-жидким включениям. Изд-во «Недра», 1966.

59. Хакимов А. Х. Микротермометрия молочно-белого и полупрозрачного кварца по фонтанированию жидкости при декрепитации включений. Изв. отд. геол.-хим. и техн. наук АН Тадж. ССР, 1963, № 4 (13).

60. Черкасов Ю. А., Хрулева Т. А. Применение метода фазового контраста к измерению показателей преломления минералов. В сб. «Новые методы в минералогии и петрографии и результаты их применения». Госгеолтехиздат, 1963.

61. Шафрановский И. И. Кристаллы минералов. Изд-во ЛГУ, 1957.

62. Шубников А. В. Как растут кристаллы. Изд-во АН СССР, 1935.

63. Юшко С. А. Методы лабораторного исследования руд. Изд-во «Недра», 1966.

64. Якубова В. В. Опыт изучения включений в минералах пегматитов Мурзинки (Урал). Тр. Минер. музея АН СССР, 1952, № 4 1955, № 7.

65. Яржемский Я. Я. Микроскопическое изучение галогенных пород. Новосибирск, Изд-во «Наука», 1966.

66. Allegre C. De i application de laresonance paramagnètigue nucleare a l'etude des inclusions fluides. — Compt. rend. Soc. geol. Franse, 1961, N 7.

67. Barth T. F. The feldspar geologic thermometers. — Neues Jahrb. Mineral., Abhand, 1951, Bd. 82, N 1/2.

68. Brink J. W. Jondafzettingen in Suriman. Procfschrift Leiden, 1955.

69. Bowen N. L. Geological termometry in laboratory investigation ores by Fahrbanks, N. Y. Mc Graw — Hill, 1928.

70. Deicha G. Les lacunes des cristaux et leursninclusion fluides. Paris, 1955.

71. Deicha G. Petrographie microscopique en fond noir. — Compt. rend. Soc. geol. Franse, 1959, N 3, v. 58.

72. Deicha G., Sella C. Etude au microscope èlectronique des intergranulaires des gangues et des roches. — C. R. Asad. Sci., 1962, t. 254.

73. Ingerson E. Liquid inclusions in geologic thermometry. — Amer. Mineralogist, 1947, v. 32.

74. Ingerson E. Methods and problems of geologic thermomentry. — Econ. Geol. Fiftieth. Anniversary Lancaster, 1905—1955, 1955, v. 1, p. II.

75. Kalb G. Beiträge zur Kristallomorphologie des Quarzes. Z. Kristallographie, 1935, Bd 90, Hft 2.

76. Kennedy G. C. Pressure — volume — temperature relation in water at elevated temperatures and pressures. — Amer. J. Sci., 1950.

77. Kullerud G. The FeS—ZnS system a geological thermometer.—Norsk geol. tidsskr., 1953, b. 32, N 2—4.

78. Laemmlein G. Lecundure Flussgkeitseinschlusse in Mineralien, Zeit. fur Kryst. und Mineralog., 1929, N 71.

79. Machairas J. Metallogenie de lor en Jeiyane francaise. These Paris, 1962. (Memoire B. R. J. M., N 22).

80. Maucher W. Die Bildungsreine der Mineralien ais Unterlage fur die Einteilung der Erzlagerstatten. Freiberg, 1914, v. 5.

81. Nacken R. Weiche Folgerungen ergeben sich aus dem Auftreten von Feussigkeitsein — schlussen in Mineralien Cbl. Mineral. 1921.

82. Newhouse W. H. The temperature of formation of the Mississippi Valley lead — zinc deposits, Econ. Geol., 1933, N 28.

83. Roedder E. Fluid inclusions as samples of the ore forming fluids. Bull. Geol. Soc. America, 1959, v. 7, N 12. pt. 2, 1959.

84. Roedder E. Studies of fluid inclusions. 1. Low temperature application of a double — purpose freesing and heating stage., 1962, v. 57, N 7.

85. Roedder E. Studies of fluid inclusions. II. Fresing datd and their interpretation. — Econ Geol., 1963, v. 58, N 2.

86. Roedder E. Liquid $CO_2$ inclusions in olivine — bearing nodules and phenocrists from basalts. The American Mineralogist, v. 50, october, 1965.

87. Roedder E. Fluid Inclusions as Samples of Ore Fluids. Seochemistry of Hydrotermal Ore deposits. The Pennsylvania State University, 1967.

88. Smith F. G. Histirical development of inclusion thermometry. University of Toronto Press, 1953.

89. Smith F. G. Historical development of inclusion thermometry. Univ. Toronto Press, 1953.

90. Stalder H. A. Petrographische Untersuchmigen in Jrimselgebiet. Inanguraedissertation, Bern, 1964 (Schveizecische Miner. u. Petrogr. Mitteibmgen, Bd. 44).

91. Sorby H. G. On the microscopic structure of cristals, indicating the origin of minerals and rocks. Quarterly London, Yournal of the Geological Locіety, 1858, vol. 14.

92. Vogelsang H. Philosophie der Geologie und microskopische Gestein sstyudien, Cohen, Bonn, 1867.

93. Ypma P. Rejuvenation of ore deposits as exemplified by the Bekl ledome metalliferous province. Proe fschrift Leiden, 1963.

94. Zirkel F., Rosenbusch H. und Wiiifing E. Lehrbuch der Petrographie, i, Leipzig, 1893. Microskopische Physiographie des petrographisch, Wichtigen Mineralien. Stuttgart, 1904.

# ФОТОТАБЛИЦЫ

*Таблица I**. Абиогенные элементоорганические синтетические соединения во включениях эвдиалитов щелочных интрузивных пород Хибинского массива (по С. В. Икорскому) и нефтегазовые вытяжки (по Ю. Ф. Левицкому)

*а* — кристаллы сернисто-битуминозного вещества на стенках включения в проходящем свете (слева) и в скрещенных николях (справа). Ув. 440; *б* — газовое включение синтетических углеводородов, справа — люминесценция в сине-фиолетовых лучах. Ув. 980; *в* — включения с жидким битумом в гидротермальном флюорите.

*Таблица II*. Аморфные включения расплава в фенокристаллах эффузивов и интрузивов быстрого охлаждения

*а* — ограненные включения стекла в фенокристалле кварца Грузии. Ув. 380; *б* — включение стекла в ортоклазе гранитов Северного Кавказа при замедленном охлаждении частично кристаллизованное по периферии. Ув. 300; *в* — стекловатое включение с газовым пузырьком и с кристаллом сульфида в оливине рудоносных габбро-долеритов Норильска. Ув. 1800; *г* — включения стекла в плагиоклазе базальтов Армении. Ув. 220

*Таблица III*. Раскристаллизованные включения в минералах щелочных, основных и кислых интрузивов

*а* — затвердевшее включение щелочного расплава в нефелине уртитов Хибин. Газовое обособление вверху, в низкопреломляющей изотропной массе ряд анизотропных (и рудных) кристаллических фаз. Ув. 880; *б* — затвердевшее включение в нефелине пегматитов в рисчорриттах Хибин. В изотропном веществе хорошо ограненный параллелепипед виллиомита, кристаллы эгирина и деформированный газовый пузырек. Ув. 500; *в* — раскристаллизованное включение основного расплава в оливине I рудоносных габбро-долеритов Норильска. Слева (светлое) оливин с интерстиционными обособлениями газов, в правой части сульфиды (черное), плагиоклаз и пироксен. Ув. 1800; *г* — полнораскристаллизованное полиминеральное включение расплава обычной гранитной магмы в кварце из гранит-порфиров. Николи +, ув. 1200; *д* — раскристаллизованное включение ультракислой магмы в кварце гранитов Кента (дополнительная интрузия краевого типа). В основном кварцевом заполнении вакуоли кверху справа обособился плагиоклаз, крупный газовый пузырек и рудный минерал (?). Без анализатора, ув. 1800

*Таблица IV*. Кристалло-флюидные включения расплавов-рассолов (*а* и *б*) в топазах пегматитов Волыни и в кварцах пегматитов Центрального Казахстана (*в*, *г*, *д*)

*а* — обособление флюидной части в двух сжатых газовых пузырьках, находящихся в равновесии с твердыми фазами и с конденсатом жидкого рассола. Ув. 500; *б* — во включении топаза примечателен двуглавый кварц, выросший из капли кислого расплава-рассола, о чем свидетельствует отсутствие вершины головки, «упершейся» в стенку вакуоли (внизу справа); *в* — вакуоль включения, переполненного минералами-узниками галоидов, силикатов и рудных индивидов. Крупный кристалл кубического габитуса слева — галит, ниже под ним сильвин. Отделение флюидов при кристаллизации обеспечило формирование крупного обособления газа и жидкости в интерстициях. Ув. 1200; *г* — в дипирамидальном включении количество жидкого конденсата увеличено по сравнению с включением в. Ув. 550; *д* — негативное кристалло-газово-жидкое включение, переходное к гидротермальной рапе, занимающей в системе относительно большой объем. Ув. 700

*Таблица V*. Существенно газовые включения в ограненных кристаллах пегматитов Волыни

*а, б* — насыщение включениями «сухих» газов пневматолитового кварца, *а* — ув. 35, *б* — 150; *в, г* — существенно газовые двухфазовые объемные гексагональные и округло-дигексаэдрическое включения в кварцах. Ув. 300; *д* — полуограненное крупное включение в топазе, сфотографированное на фоне многочисленных таких же, но мелких включений газов (ув. 500)

---

* Из 27 микрофототаблиц, иллюстрирующих различные главы книги, 22 таблицы составлены из микрофотографии включений, выполненных автором и Ф. П. Мельниковым в микротермобарометрической лаборатории кафедры полезных ископаемых МГУ по материалам личных сборов.

В таблицах были использованы 5 микрофотографий включений в кальцитах — Н. И. Андрусенко, 3 по топазам — И. В. Банщиковой, 4 по магматическим породам — А. В. Громова и 6 микрофотографий включений в кварцах и топазах — Ю. А. Долгова.

Несколько единичных микрофотографий В. Н. Аникина, Д. К. Возняка, Б. В. Зацихи, С. В. Икорского, В. А. Калюжного, А. Е. Лисицына, М. М. Сливко и др. были также включены в тематически разные таблицы

*Таблица VI.* Фазовое разнообразие газовых включений в минералах Волыни

*а* — объемное включение сухих газов. Ув. 230; *б* — уплощенное включение — $Г \gg_{Ж}$ Ж. Ув. 230; *в* — ограненно негативное двухфазовое существенно газовое включение ($Г_{Ж} \gg Ж$) в кварце. Ув. 300; *г* — плоское двухфазовое существенно газовое включение в топазе — $Г \gg Ж$. Ув. 300; *д* — газо-водное уплощенное многофазовое включение в топазе разновидности $Г > Ж \geqslant$. Ув. 150; *е* — газо-водное многофазовое плоское включение в топазе разновидности $Г \gg Ж > К$. Ув. 300

*Таблица VII.* Генетическое разнообразие газовых включений

*а* — включения углеводородных газов в нефелине уртитов Хибин, приуроченные к трещине спайности по (1010). Ув. 380; *б* — газовое включение, комбинированное с кристалликами эгирина в эвдиалите щелочных пегматитов Хибин. Ув. 450; *в* — включение сухих газов в кварце пегматитов Волыни с микродрузой минералов-спутников. Ув. 800; *г* — включение газо-водное разновидности $Г \gg Ж_{В} > К$ с микродрузой кристаллов-узников. Ув. 860

*Таблица VIII.* Явления синерезиса в пленке гелей, отложившейся на стенках вакуолей газовых включений (аэрозолей) в морионах пегматитов Волыни

*а* — деталь верхней части стенки газового включения (черный контур). В его просвете четко различается полигональный узор синерезиса пленки геля, подчиненный кварцевой подложке минерала-хозяина. Ув. 220; *б* — то же, в другом кристалле, без четкого влияния подложки. Слева, у кромки газа, сгусток силикогеля. Ув. 220; *в* — в трещинах разрыва пленки геля образовались «демаркационные змейки» сжатия при обезвоживании, а в полигонах микробугорчатая «шагреневая кожа» этой пленки. Ув. 450; *г* — деталь «шагреневой кожи» (пленки геля). Ув. 900

*Таблица IX.* Включения жидких истинных водных растворов

*а* — однофазовые холодноводные жидкие включения в гипсе с Ширецкого месторождения. Ув. 90; *б* — то же, в галите с месторождения Величка (Польша). Ув. 160; *в* — жидкое двухфазовое включение с малым объемом газа (пара) в тепловодном гидротермальном кальците с Вилюя. Ув. 35; *г* — двухфазовое жидкое включение в низкотемпературном флюорите из пегматитов Центрального Казахстана. Ув. 300; *д* — то же, из горного хрусталя кварцевых жил Дагестана. Ув. 330; *е* — обычные двухфазовые жидкие включения в среднетемпературном кварце. Ув. 135.

*Таблица X.* Жидкие многофазовые включения гидротермальных крепких минералообразующих растворов

*а* — трехфазовое жидкое водное включение в кварце Памира — $Ж_{В} \geqslant (Г_{П} + К_{Л})$. Ув. 300; *б* — многофазовое жидкое водное включение в кварце пегматитов Центрального Казахстана $Ж_{В} > (Г_{П} + К_{Л} + К_{Т})$. Ув. 136; *в* — многофазовое включение водного рудоносного раствора в флюорите Кента. $Ж_{В} > (Г_{П} + К_{Л} + К_{Т} + К_{Р})$. Ув. 135. Кубический $К_{Л}$ везде галит

*Таблица XI.* Жидкие многофазовые включения крепкой и очень крепкой гидротермальной рудоносной рапы — $Ж_{В}$ $(Г_{П} + К_{Л} + К_{Т} + К_{Р})$

*а* и *б* — в флюорите Центрального Казахстана. Ув. 135; *в* — в морионе Волыни. Ув. 300

*Таблица XII.* Смешанные и сложные водно-углекислые включения гидротермальных солевых растворов

*а* — типичные «кокардовые» включения в кварце гидротермальных жил Южного Урала. Ув. 220; *б* — то же, из Центрального Казахстана. Ув. 300; четырехфазовые углекисловодные включения; *в* — в топазе пегматитов Волыни. Ув. 300; *г* — в горном хрустале с Памира (минерал-узник везде галит). Ув. 200

*Таблица XIII.* Коллоидные включения в корках халцедонов гнездового заполнения месторождений исландского шпата Западной Сибири

*а* — включение синеретического водного раствора, вследствие центростремительной диффузии обособившегося из окружающего сферического участка силикогеля, справа оконтуренного гидроокислами железа (темное). В центре газовый пузырек сжатия жидкости включения. Стенки вакуоли несут специфически чешуйчатый узор наподобие граней. Ув. 220; *б* — такое же шарообразное включение, вокруг которого намечается сферическая ритмичность в строении кремнезема. Стенки вакуоли имеют «бляшечный» микрорельеф. Ув. 220; *в* — аналогичное шарообразование включение жидкости с газовым пузырьком сжатия. На стенках вакуоли микрорельеф, сходный с рельефом, «шагреневой кожи» (см. фототабл. VIII, *б* и *в*). Ув. 220

*Таблица XIV.* Генетическое разнообразие первичных зональных включений

*а* — ступенчатая поверхность искусственного фтор-флогопита, обусловленная дискретными слоями нарастания, перекрывающими зональные включения. Ув. 35; *б* — зональное распределение газово-жидких включений по ромбоэдрическим граням кристалла горного хрусталя. Натуральная величина; *в, г* — булавовидная и дисковидная формы вакуолей включений, возникшие в участках спирального роста кристаллов исландского шпата. Ув. 56; *д* — ребристо-желобчатая скульптура поверхности отрицательного ромбоэдра искусственного кварца, благоприятная для образования трубчатых включений кристаллизующих растворов. Ув. 35; *е* — образование включений при «зубчатом» фронте тангенциального нарастания дискретного микрослоя в искусственном фтор-флогопите. Ув. 35

*Таблица XV.* Азональные первичные включения растворов

*а* — одиночные крупные жидкие включения в мориоие Волыни. Натуральная величина; *б* — возникновение трехфазового жидкого включения над минералом-спутником (галит), экранировавшим грань роста в кварце (нарастание грани снизу вверх). Ув. 220; *в* — образование обелисковидного жидкого включения в исландском шпате с Нижней Тунгуски над частицами посторонних веществ, экранировавших грань роста кристалла. Ув. 35; *г* — ультрамикровключение жидкого раствора в минерале-узнике (галит) — включение во включений кварца с Памира. Ув. 550

*Таблица XVI.* Мнимовторичные (первично-вторичные) включения растворов и расплавов в сингенетических микротрещинах

*а* — включения «сухих» газов, залечивавших полигональные трещинки быстрой α—β-трансформации кварца стержневой части кристаллов мориона Волыни. Эти включения эпигенетичны по отношению к сотовому α-кварцу, но сингенетичны зоне прозрачного пневматолитового кварца (слева). Видны веерообразно расходящиеся трещины с жидкими включениями, законсервированными во время гидротермального образования поздней зоны мориона. Ув. 2; *б* — включения в трещинках кварца, залеченных в самом начале образования светлой наружной зоны кристалла (слева). Ув. 35; *в* — пересечение залеченных трещин в гидротермальном ограненном кварце с Южного Урала; Диагональная (косая) трещинка с трубчатыми включениями более молодая. Ув. 120; *г* — мнимовторичные включения поздних расплавов в пирогенном плагиоклазе долеритов Норильска. Ув. 220

*Таблица XVII.* Мнимовторичные регенерационные жидкие включения в искусственном кварце (по Г. М. Софронову)

*а* — залечивание микротрещины в затравочной пластине природного кварца (слева) жидкими растворами, нарастивших слой искусственного кварца (справа). Слои разделены пограничными твердыми и жидкими включениями. Ув. 35; *б* — жидкие включения, зародившиеся в местах выщелачивания затравочной пластины (слева) и пересекающие слой нараставшего кварца (справа). Ув. 35; *в* — веретенообразное включение, возникшее в сквозном канале протравливания затравочной пластины. После охлаждения кристалла пузырек пара вырос и обособился только в верхней части включения. Ув. 56; *г* — крупнее жидкое включение, начавшее свое образование во впадине протравливания пластины (снизу). На его продолжении в слое нараставшего кварца возникло семейство мелких включений. Ув. 120; *д* — группа трубчатых включений в залеченной трещине затравки (сверху) и крупное включение в ее устье, связанное с впадиной растворения. Ув. 120

*Таблица XVIII.* Вторичные и мнимовторичные включения в залеченных и полузалеченных трещинах искусственного и природного кварца

*а* — поздняя трещина, выходящая на поверхность искусственного кристалла. Неполное скелетное зарастание, сфотографированное в плоскости трещины, произошло после завершения цикла кристаллизации с образованием часто соединяющихся друг с другом вторичных однофазовых включений. Ув. 35; *б* — характерный ячеистый каркас неравновесных форм неполного залечивания трещины в искусственном кварце с поздними вторичными однофазовыми жидкими включениями. Ув. 90; *в* — зоны силекситового кварца (внизу), раухтопаза и мориона в кристалле с Волыни пересекаются залеченными трещинами с мелкими вторичными газовыми и жидкими включениями эпигенетическими для этих зон с образованием так называемого «полосчатого» кварца. Уменьшено в 1,5 раза; *г* — фрагмент строения «полосчатого» кварца, нарушенного залеченными трещинами разной ориентировки и времени образования. Ув. 2

*Таблица XIX.* Образование аномальных расчлененных («расшнурованных») жидких включений

*а* — почти полное распочкование включения в искусственном кварце на две части: двухфазовую с газовым пузырьком и однофазовую, оставшуюся без пузырька сжатия ввиду сохранения соединяющегося волосного канальца в течение всего времени охлаждения включающего минерала. Ув. 120; *б* — многофазовое включение в флюорите из пегматитов Казахстана, сохранившееся на грани полного расчленения с помощью волосного канала. В правой части при охлаждении «вырос» газовый пузырек, а в левой кристаллизовалась основная масса минералов-узников. Ув. 220; *в* — расчленение низкотемпературного гидротермального раствора при быстрой раскристаллизации спайной трещины в кальците Нижней Тунгуски с образованием крупного двухфазового и многих мелких однофазовых жидких включений. Ув. 45; *г* — «расшнурование» жидкости включений в поздней микротрещине искусственного кварца при охлаждении кристалла. Ув. 120

*Таблица XX.* Залеченные ореолы разрывов вокруг аномальных включений в топазе, флюорите и кальците

*а* — искусственно взорванное путем перегрева жидкое включение в топазе Волыни, превратившееся в «газовое» из-за выброса в микротрещину (по спайности) жидкого раствора, образовавшего многочисленные дочерние включения. Ув. 220; *б* — естественно взорванное не полно нарушенное жидкое включение в флюорите Приазовья с ореолом дочерних включений, возникших путем дендритообразного зарастания трещинки. Ув. 360; *в* — нарушенное по спайности, башневидное первичное включение спирального роста в оптическом кальците из Нижней Тунгуски. Ув. 56

*Таблица XXI.* Плоские и трубчатые включения минералообразующих сред, пригодные для измерений соотношений фаз площадным и линейным методами.

*а* — сильно уплощенное жидкое включение в флюорите из Центрального Казахстана. Ув. 230; *б* — трубчатое жидкое включение в кварце. Ув. 90; *в* — объемно-уплощенные трубчатые и плоские газовые включения в топазе (на фоне микрометрической линейки). Ув. 100; *г* — уплощенно-трубчатое многофазовое включение крепкого минералообразующего рассола в топазе. Жидкая фаза вверху с газовым пузырьком и внизу с твердыми фазами. Средняя часть занята минералами-узниками с рассолом в интерстициях. Ув. 180

*Таблица XXII.* Внутренняя микроморфология вакуолей включений жидких и газовых растворов

*а* — первичное жидкое включение в высокотемпературном гидротермальном турмалине из пегматита Мамского района. Внутренняя ребристость строго ориентирована по длинной оси кристалла. Ув. 230; *б* — мнимовторичное жидкое включение в топазе Волыни. Внизу конусы замыкания микротрещины как продолжение ребристости стенок вакуоли. Ув. 230; *в* — крупное газовое включение в кварце пегматитов Волыни. Сложный «сосульковидный» рельеф стенок вакуоли связан с очень быстрым выделением родственного вещества в результате внезапного спада давления и температуры. Ув. 70; *г* — возникновение очень сложного каркасного рельефа на нижней стенке вскрытого жидкого включения в флюорите Центрального Казахстана. Ув. 70

*Таблица XXIII.* Электронография вакуолей и минералов-узников включений (по С. В. Куршеву, В. Н. Труфанову, В. И. Васильеву)

*а* — мнимовторичные ультрамикровключения в сотовом кварце, приуроченные к пересечениям залеченных трещинок усадки минерала при его α—β-трансформации; размер включений 1 μ; *б* — трубчатые включения в флюорите со ступенчато-спиральным нарастанием вещества на стенках вакуолей; поперечник «спирали» 0,2 μ; *в* — ступенчато-слоистый рельеф граней микрокристалликаузника из газово-жидких включений; размер в поперечнике 9 μ; *г* — ультрамикрорельеф вакуоли мнимовторичного газового включения в кварце, не согласный со слоями нарастания минерала-хозяина. Размер включения 8 μ по длинной оси

*Таблица XXIV.* Электронное зондирование затвердевших включений в апатитах Хибин (зонд типа КАМЕКА) (по В. М. Валяшко и Л. Н. Когарко)

*а* — в проходящем свете; *б* — в поглощенных электронах; *в* — распределение Cl; *г* — распределение K; *д* — распределение Fe; *е* — распределение Al

*Таблица XXV.* Изучение элементного состава ультрамикроминералов-узников газово-жидких включений в морионе Шерловой горы *1* и в раухтопазе месторождения Спокойное *2* (по Е. И. Доломановой и М. М. Элинсон)

*а* — в проходящем свете; *б* — цинк; *в* — медь; *г* — железо; *д* — хром

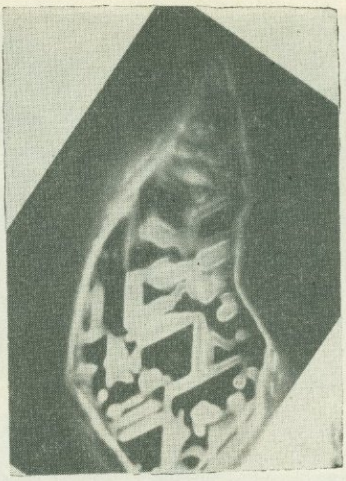
*Таблица XXVI.* Первичные многофазовые жидкие включения крепких гидротермальных растворов в слегка замутненной зоне роста флюорита из Бектауата при разных увеличениях

*а* — 90×; *б* — 880×; *в* — 1300×

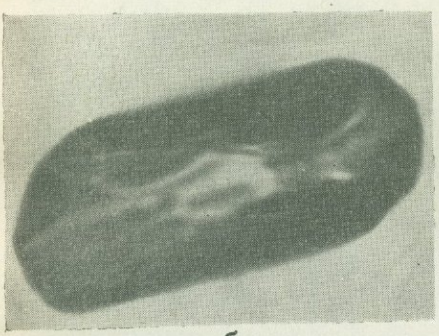
*Таблица XXVII.* Первично-вторичные включения остаточного расплава-рассола в голубом топазе Волыни

*а* — семейство многофазовых жидких включений. Ув. 70; *б* — изометричное включение этой группы. Ув. 280



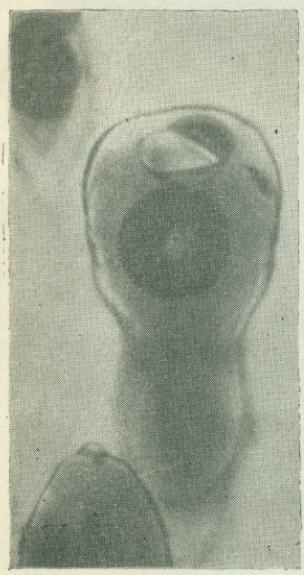


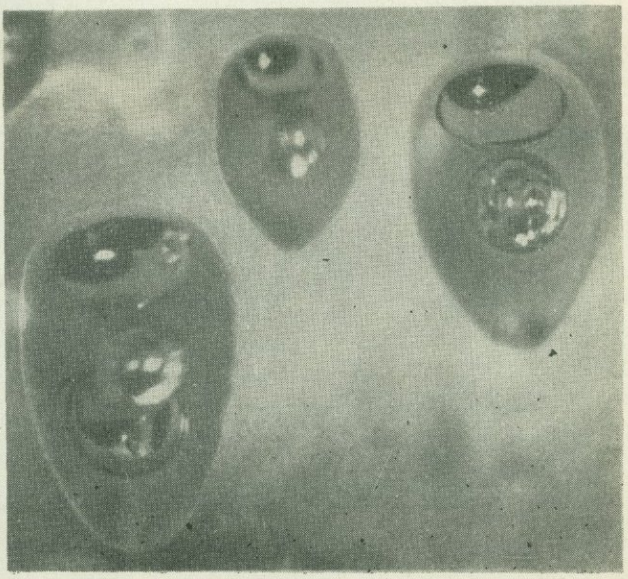
а



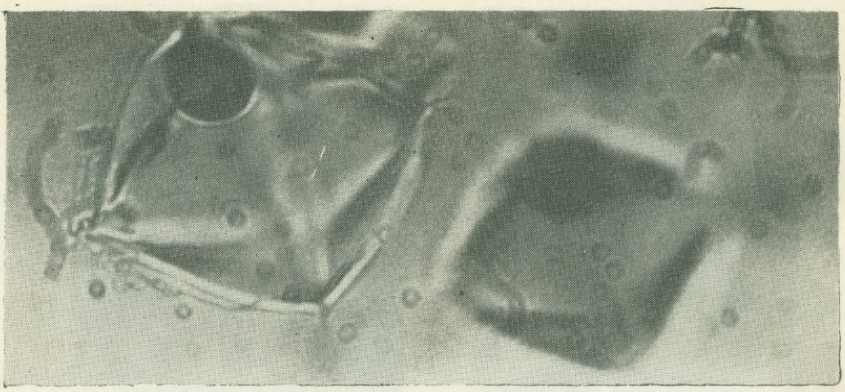


б

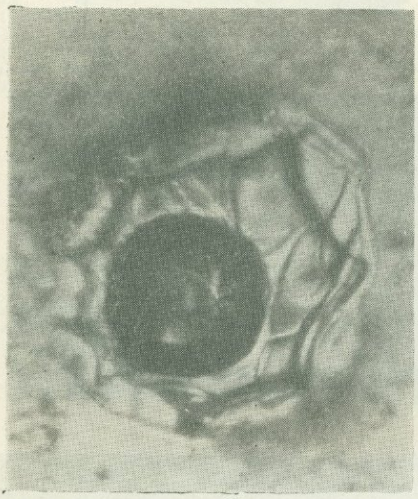




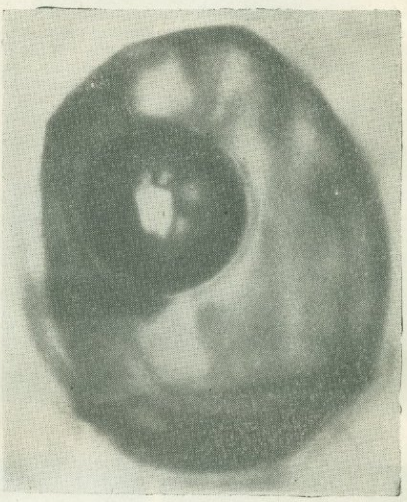
в



а



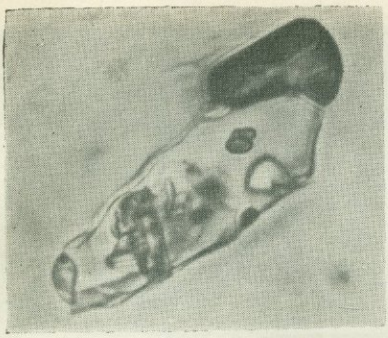
б



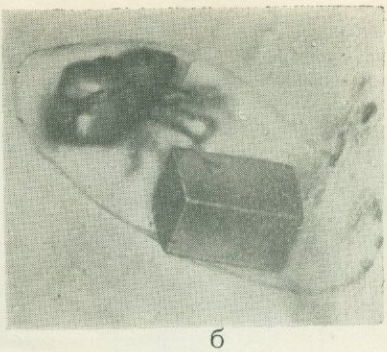
в



г



а



б



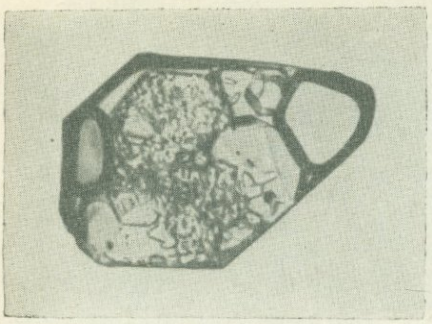
в



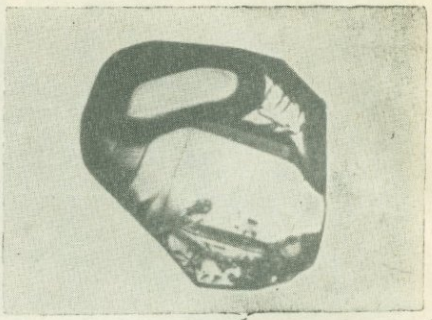
г



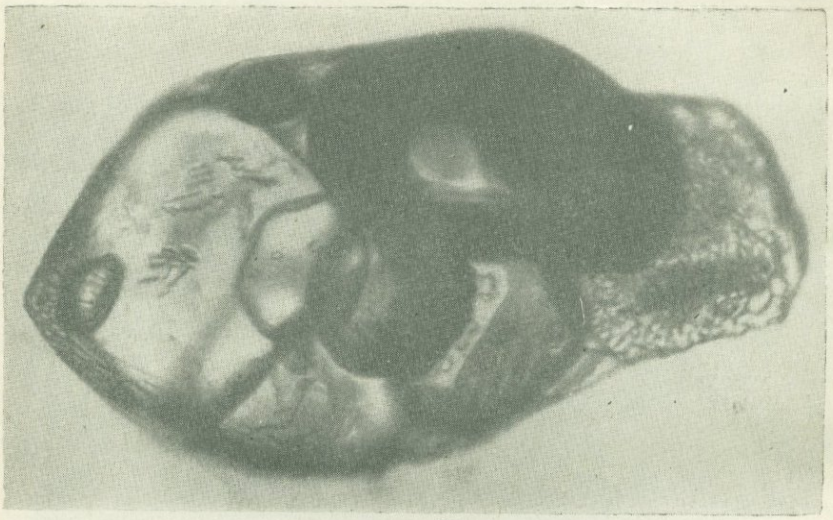
д



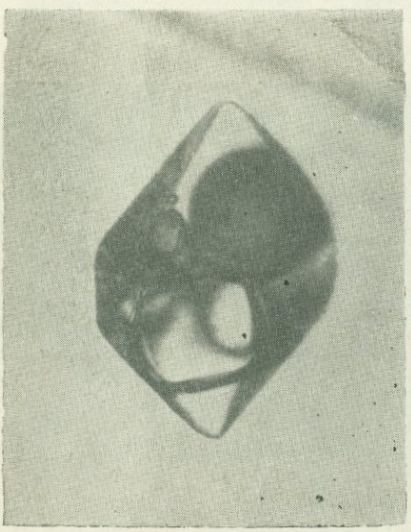
а



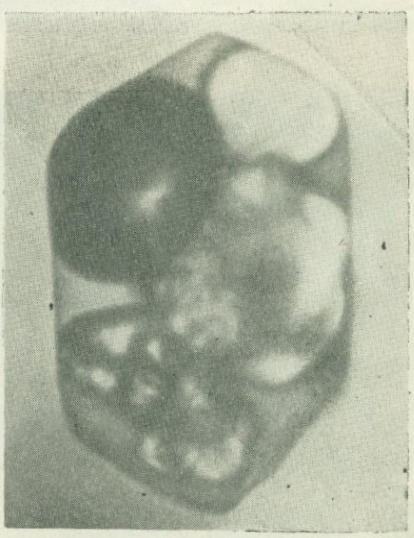
б



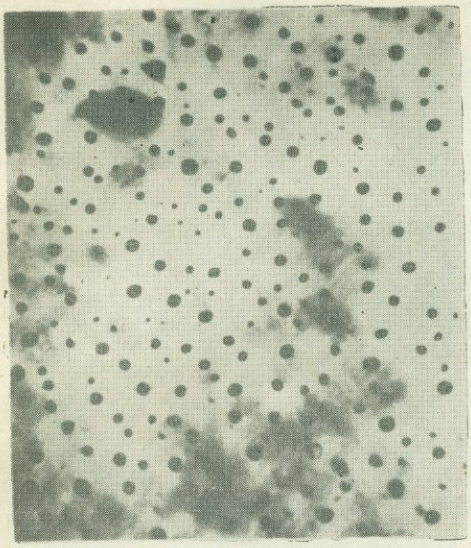
в



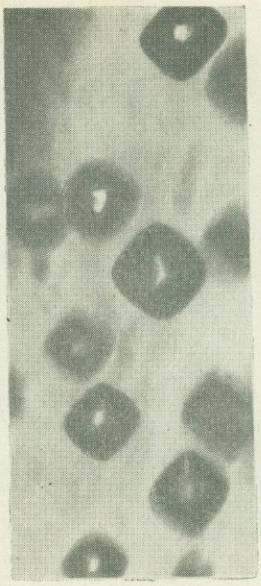
г



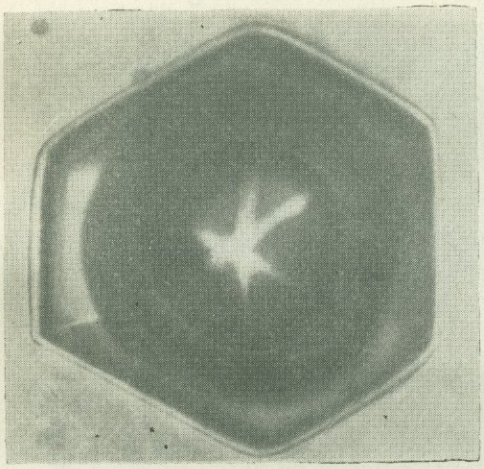
д



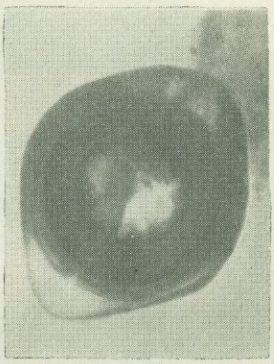
а



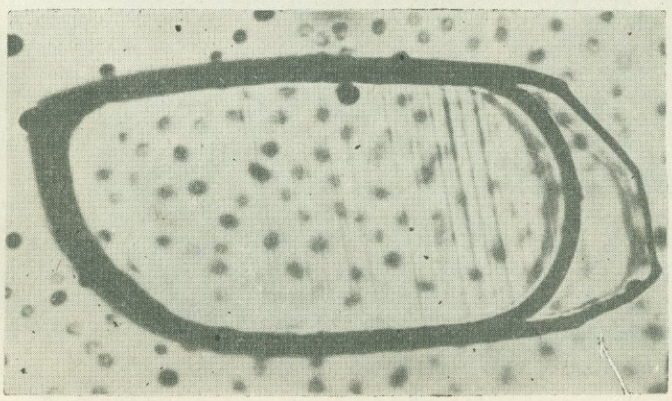
б



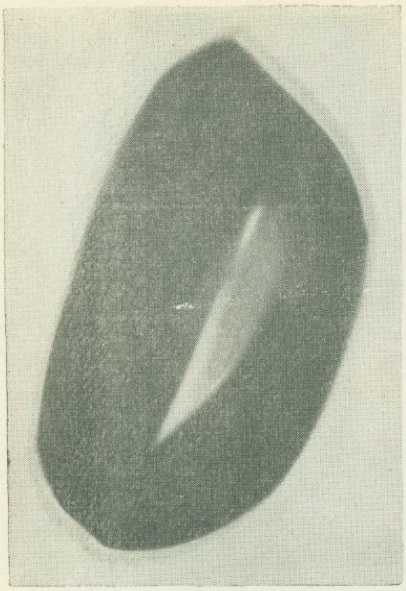
в



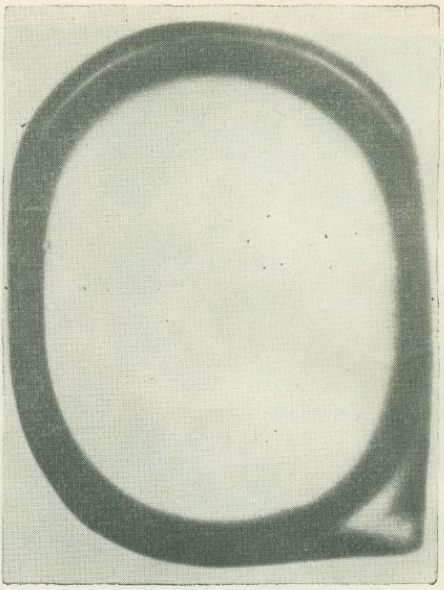
г



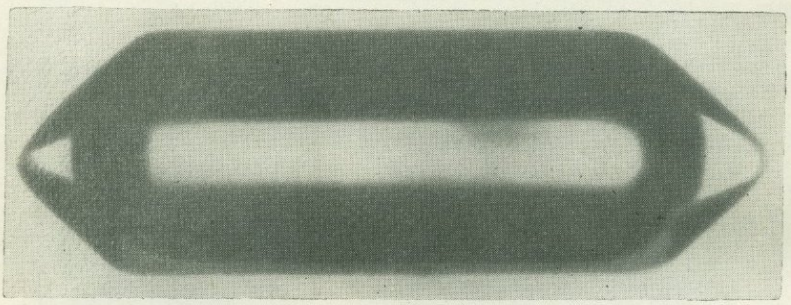
д



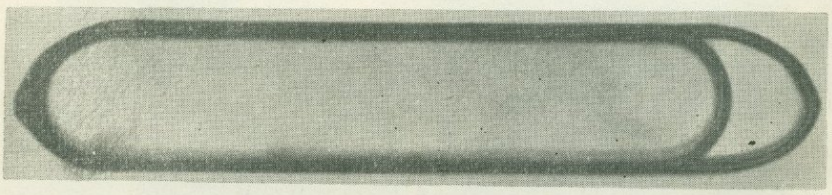
а



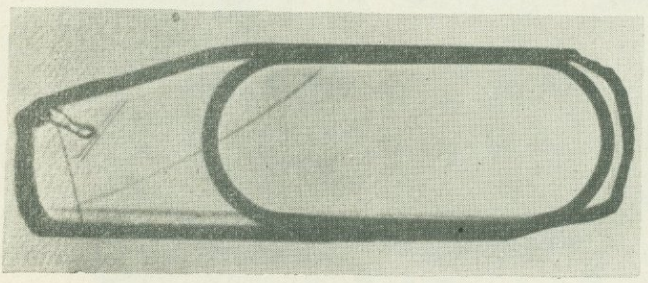
б



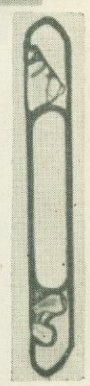
в



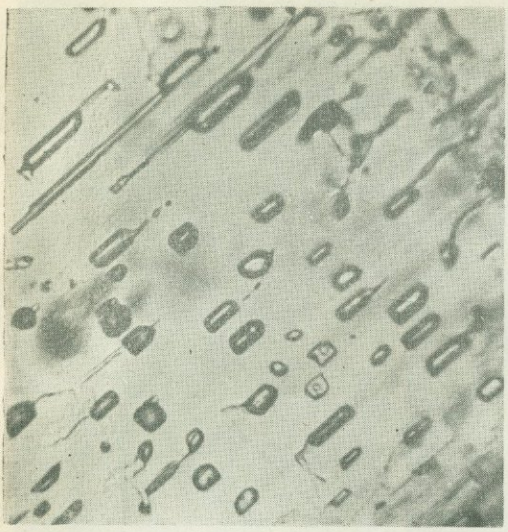
г



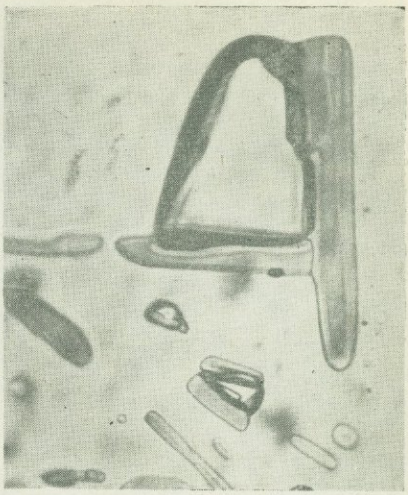
д



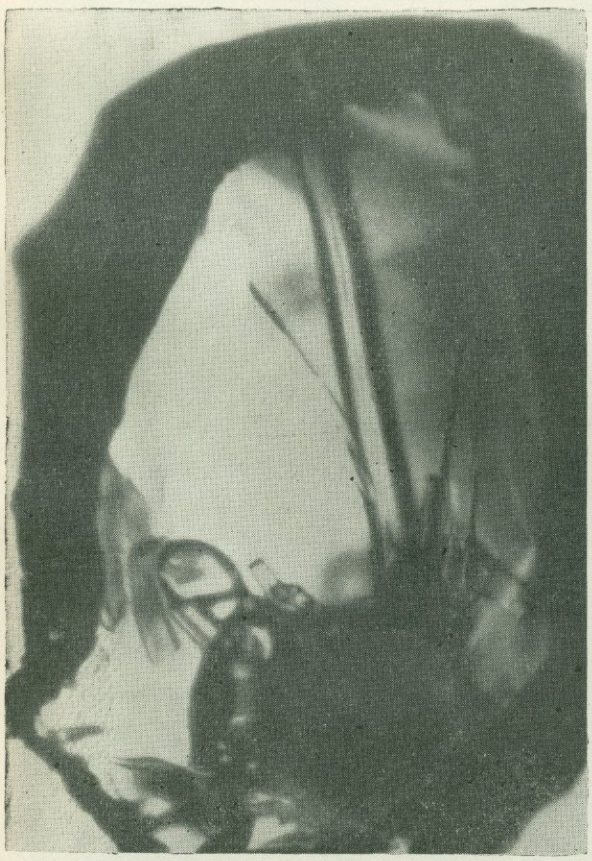
е



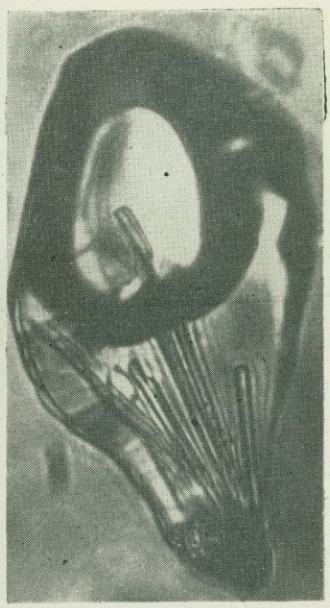
а



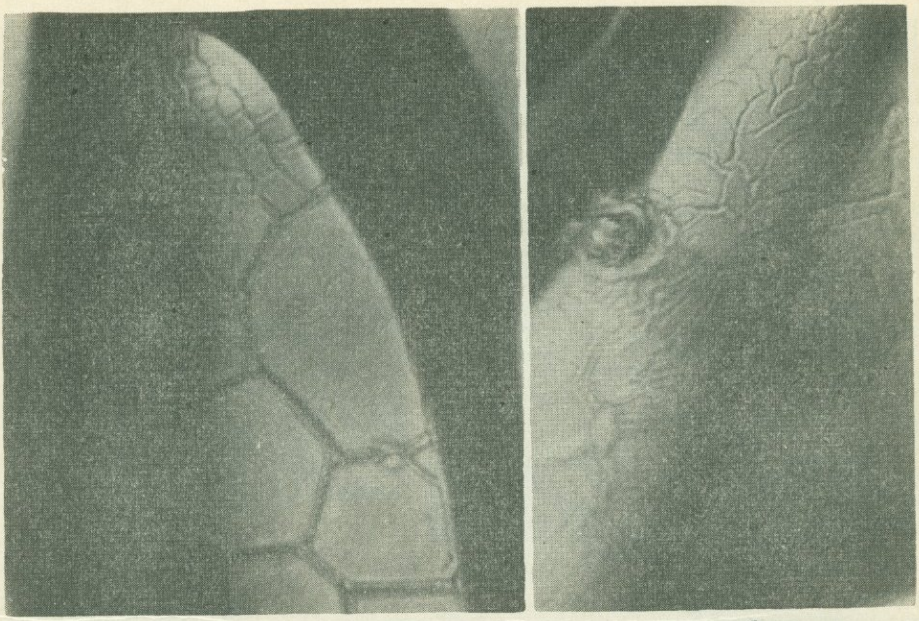
б



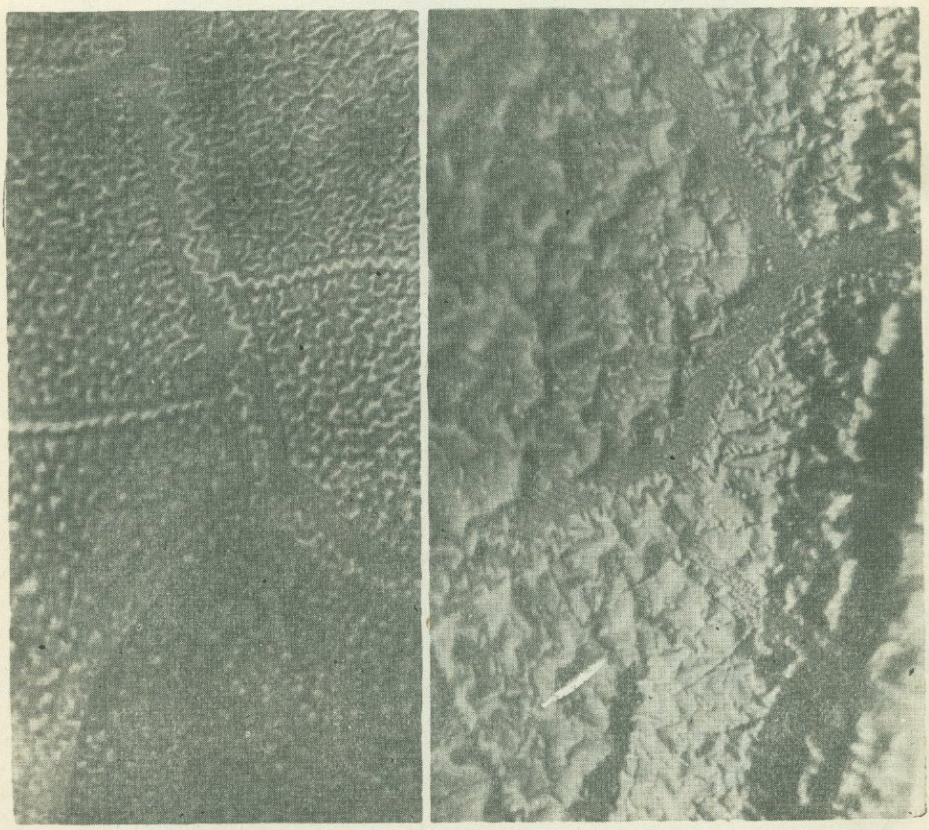
в



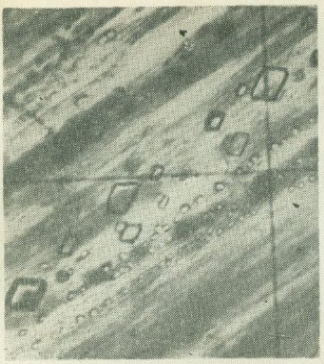
г



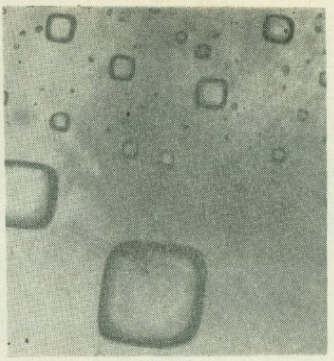
а б



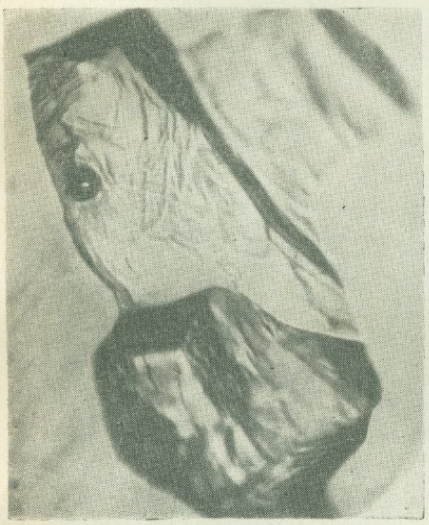
в г



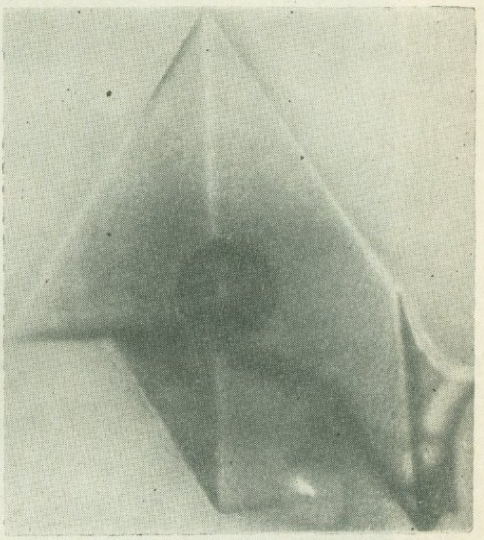
а



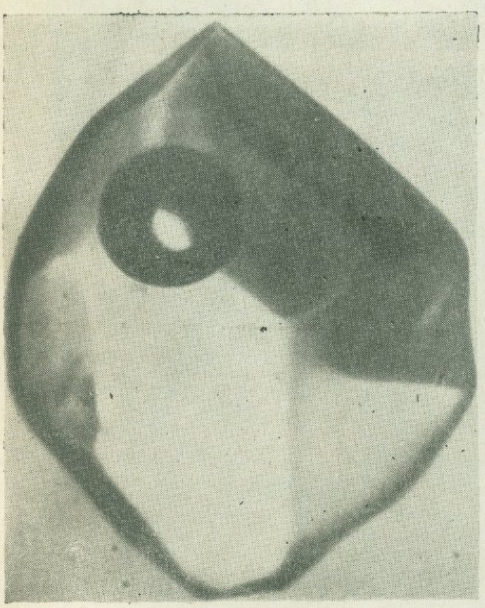
б



в



г

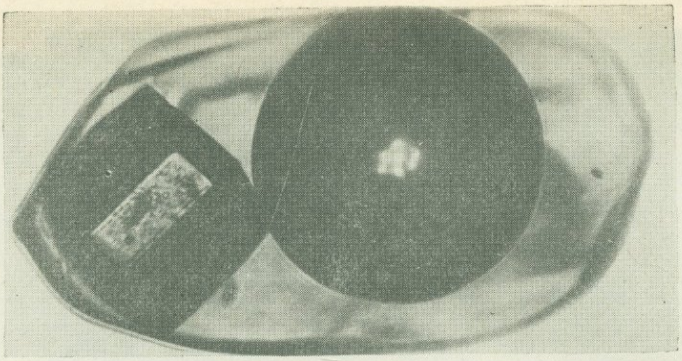


д

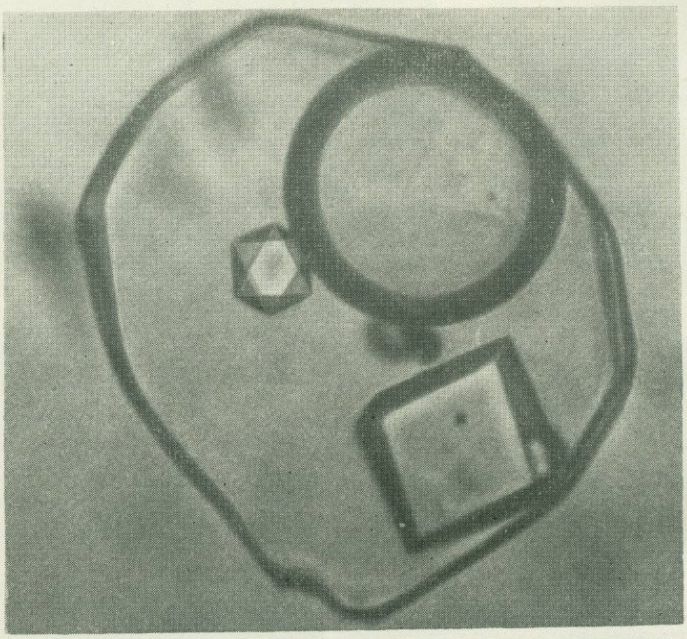


е

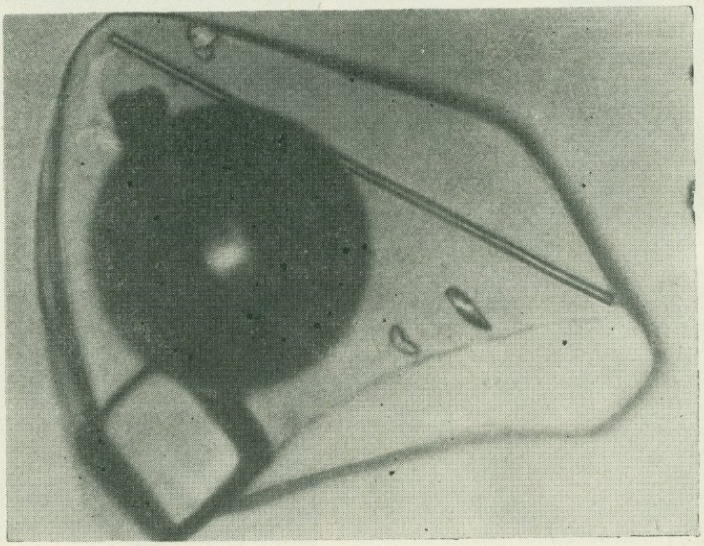
а



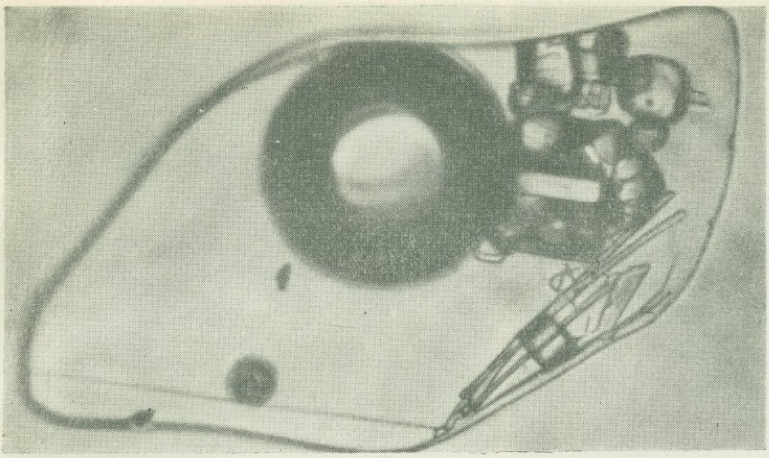
б



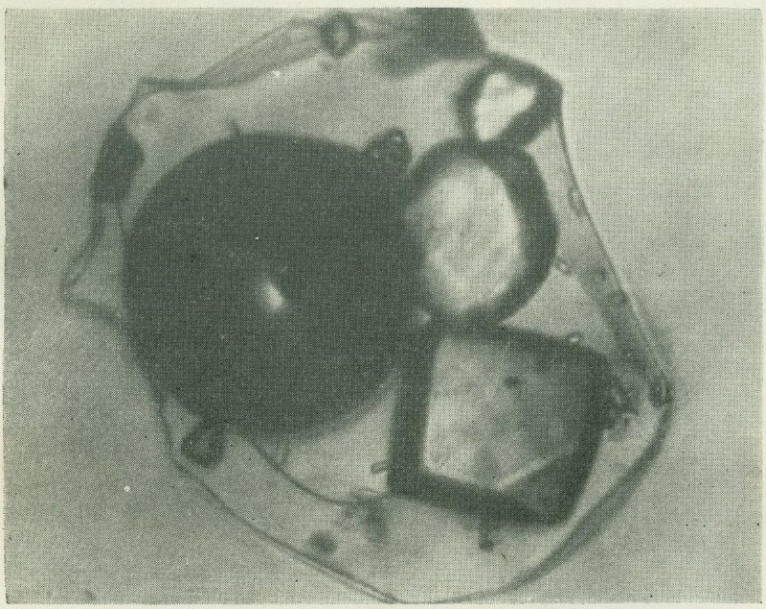
в



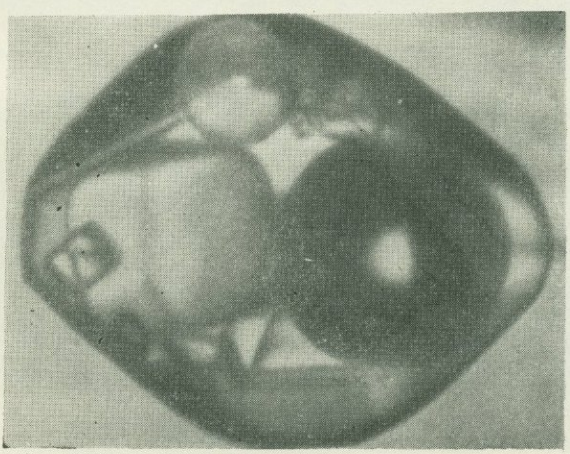
а

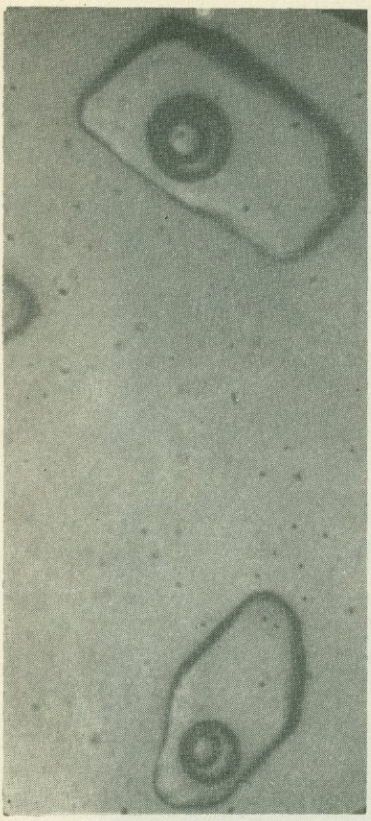


б

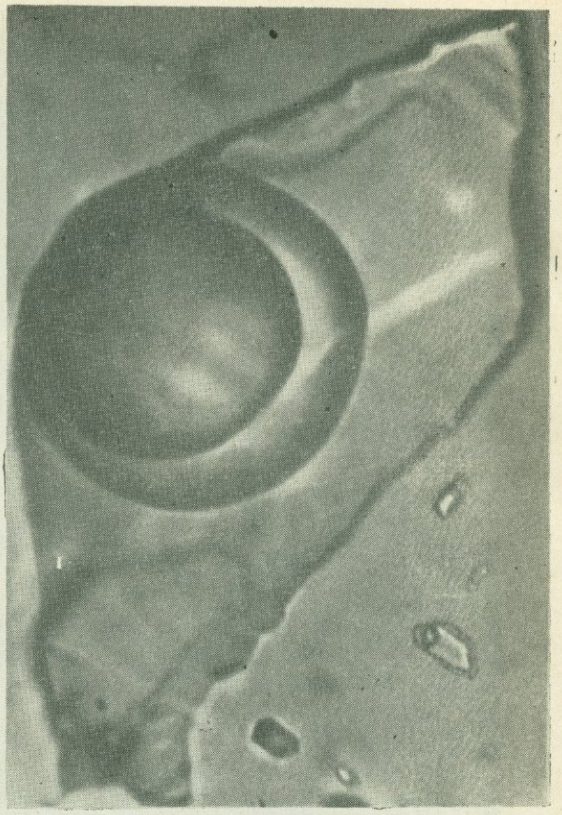


в

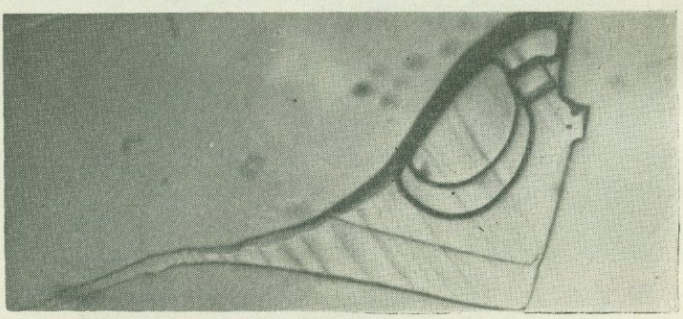




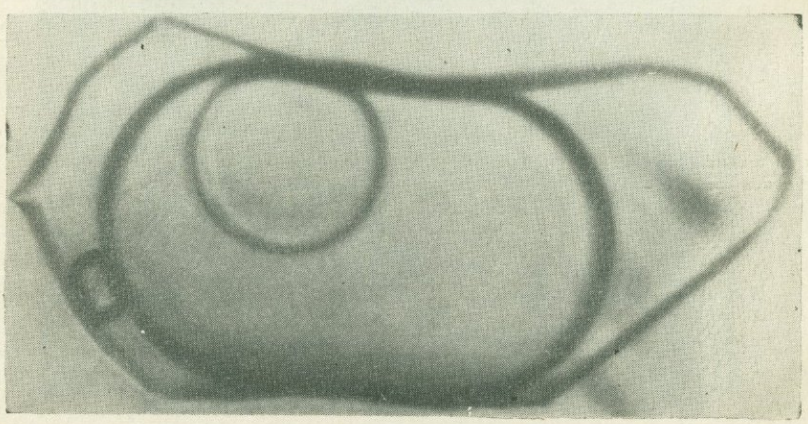
а



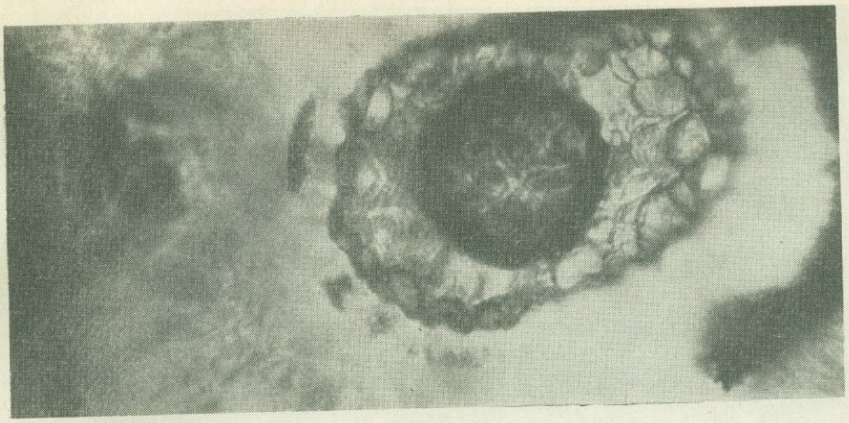
б



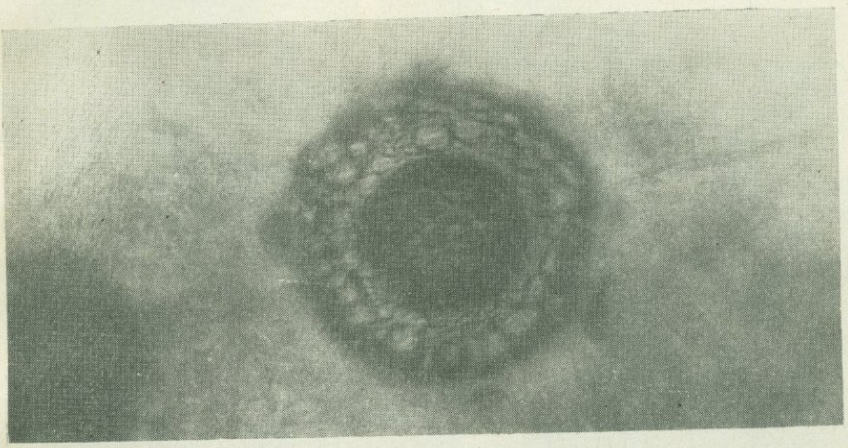
в



г



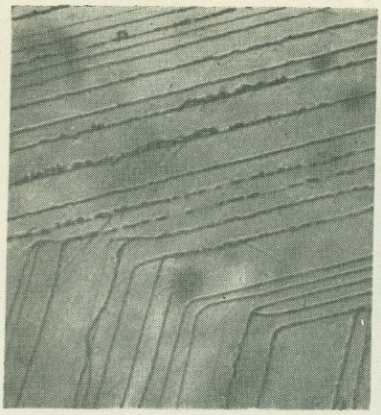
а



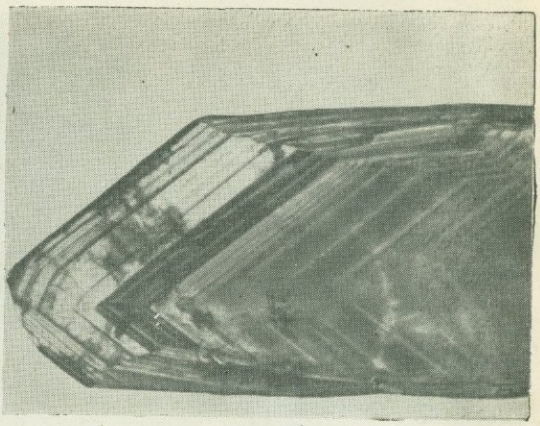
б



в



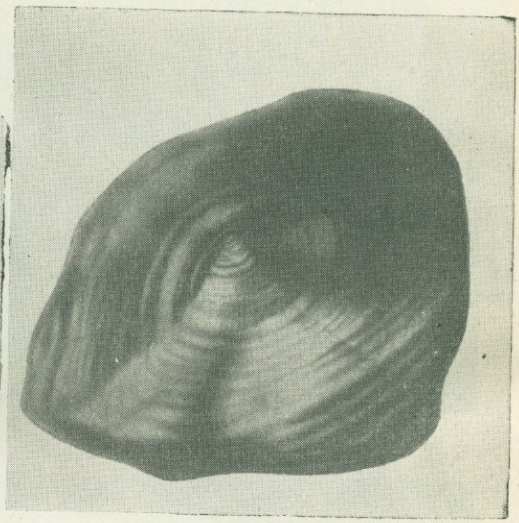
а



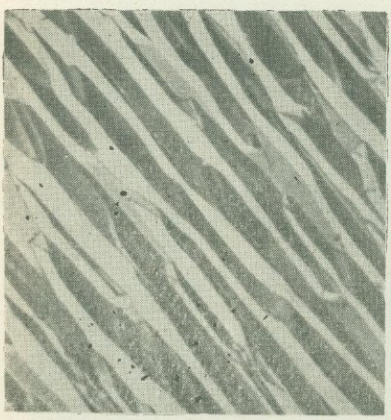
б



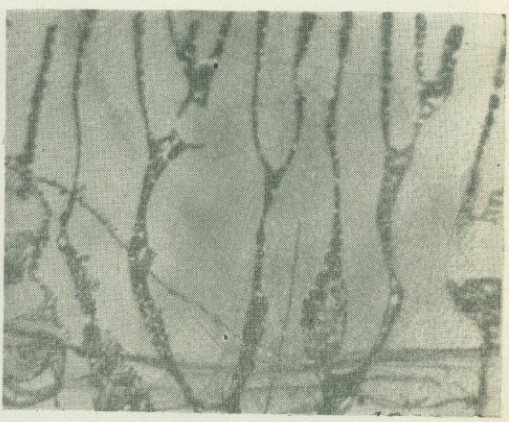
в



г



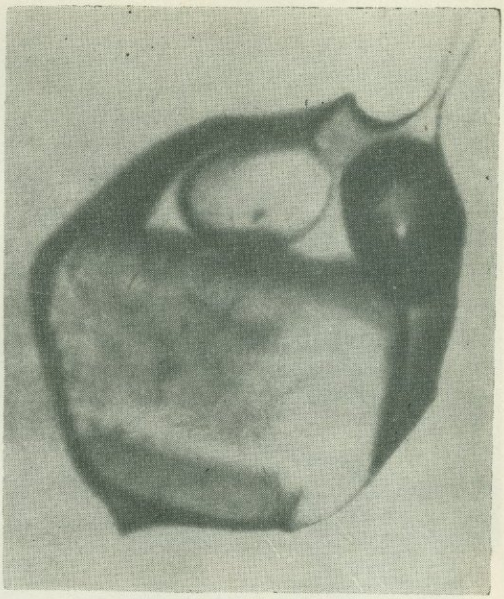
д



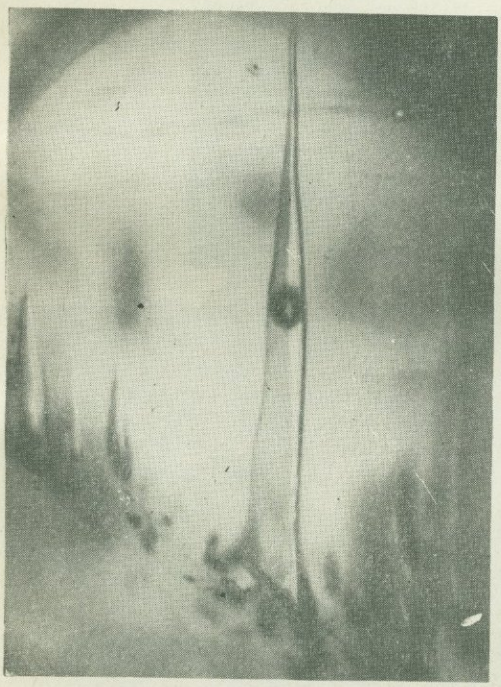
е



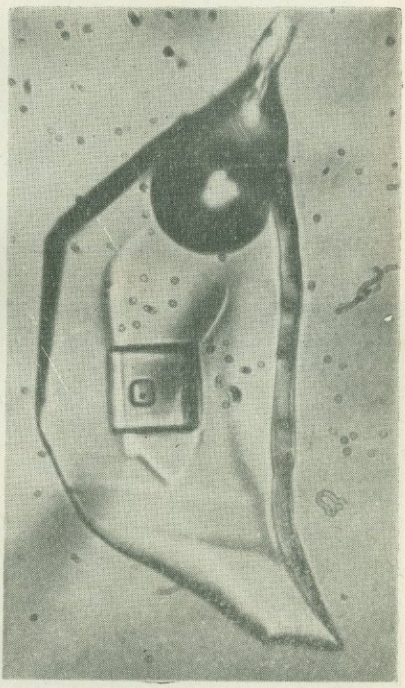
а



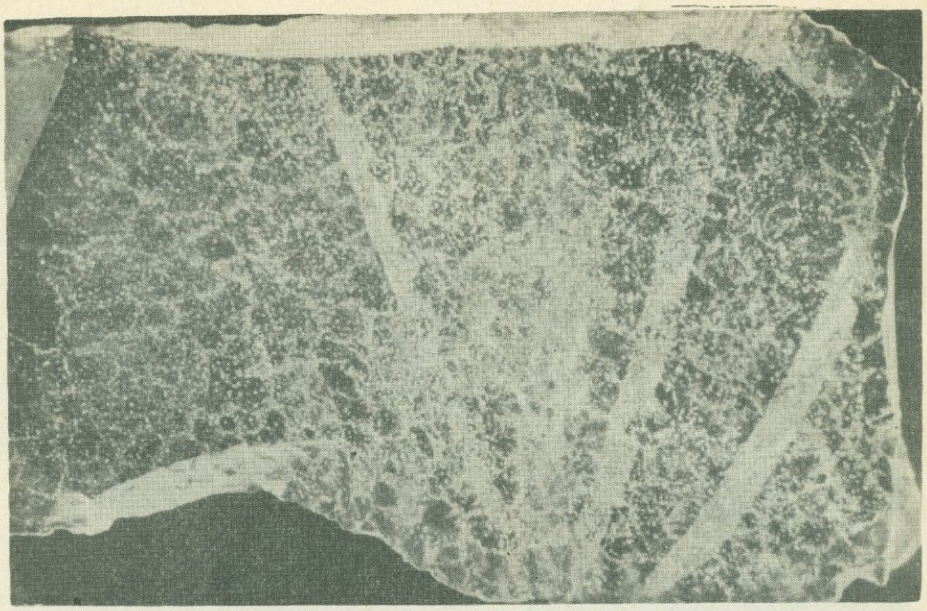
б



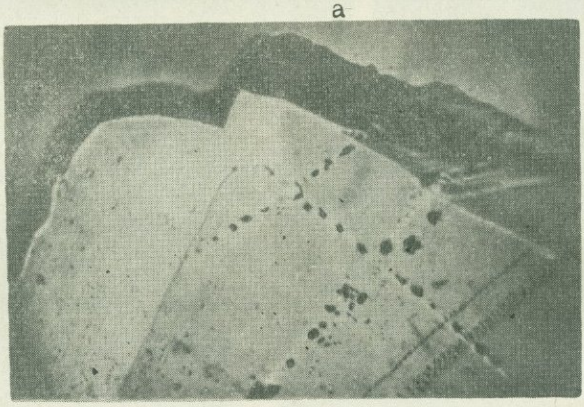
в



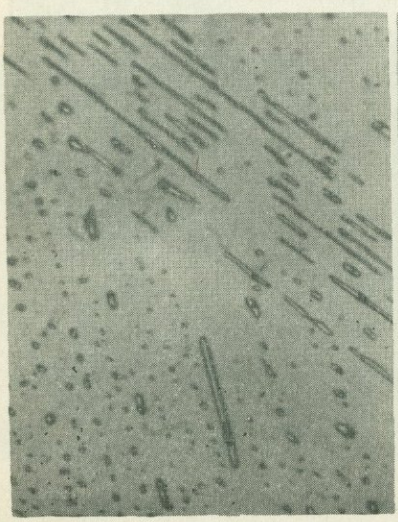
г



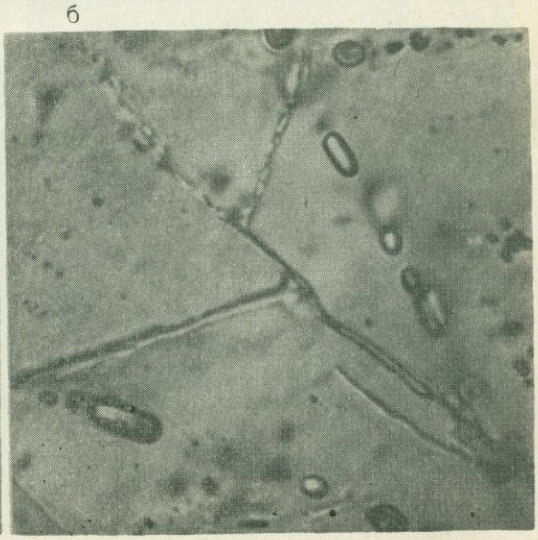
а



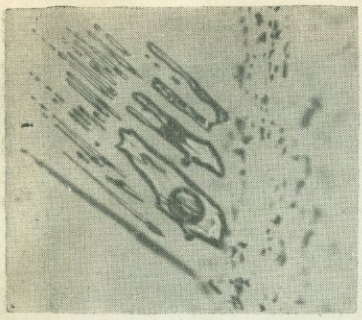
б



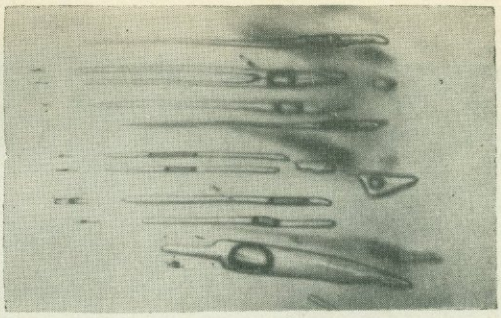
в



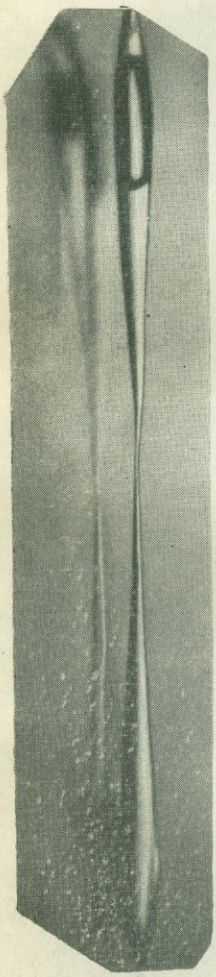
г



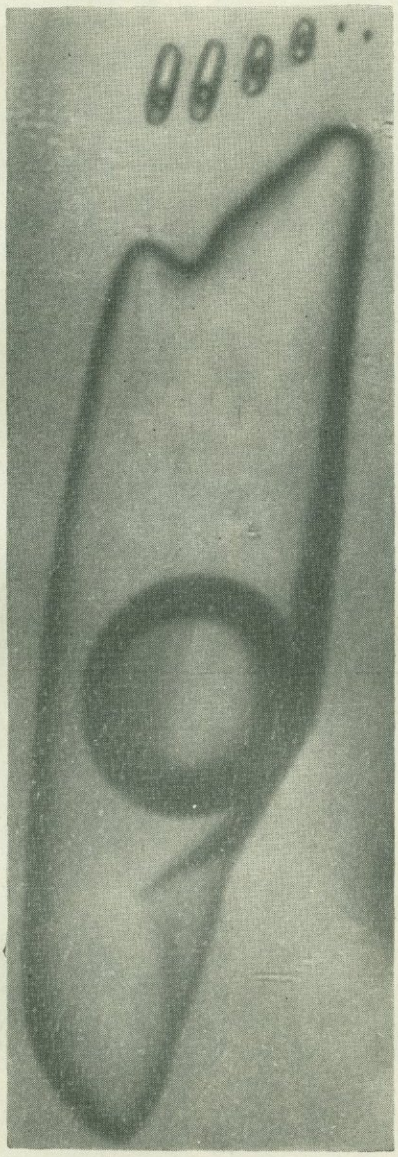
а



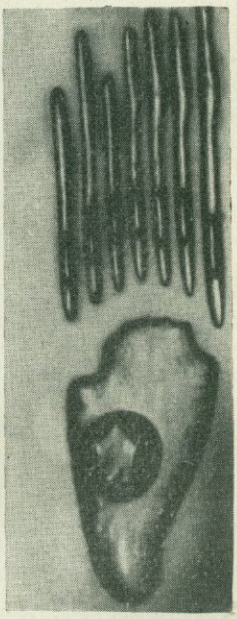
б



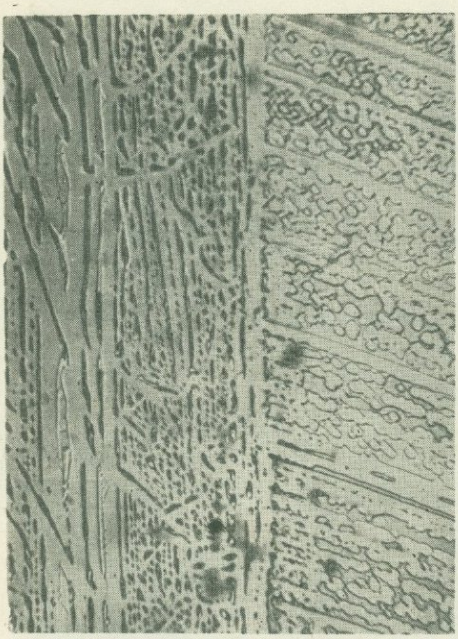
в



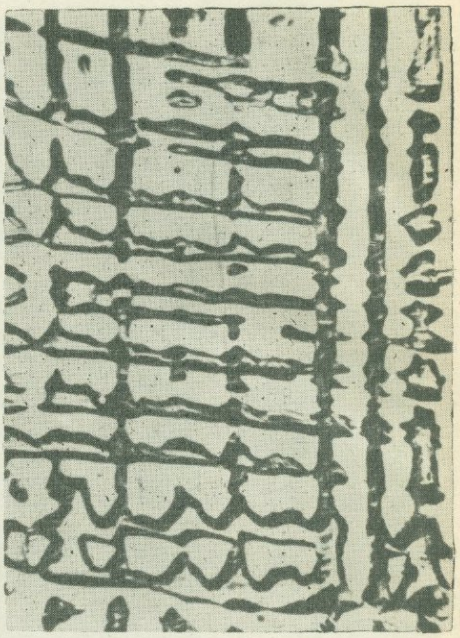
г



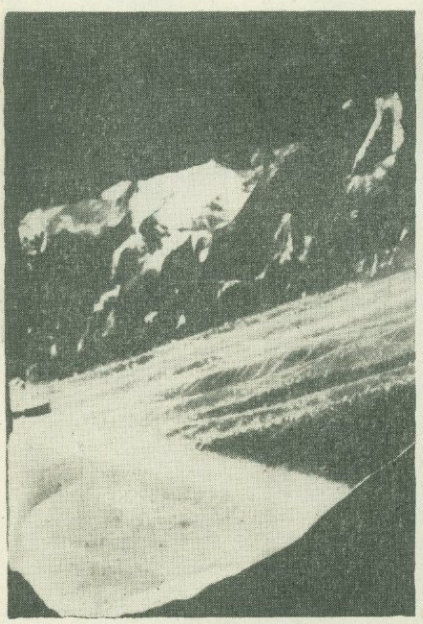
д



а



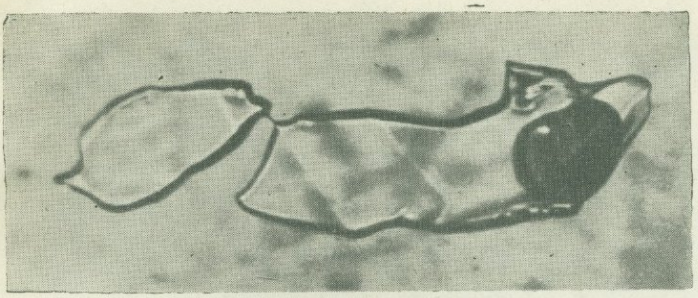
б



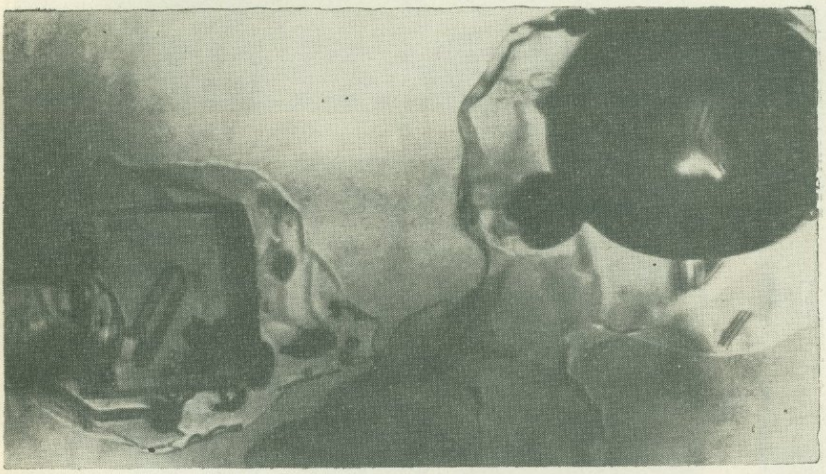
в



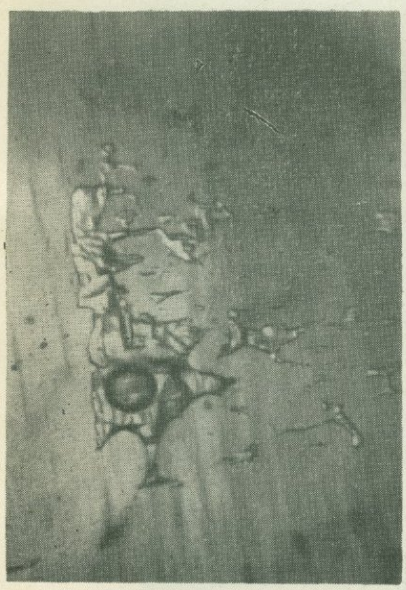
г



а



б



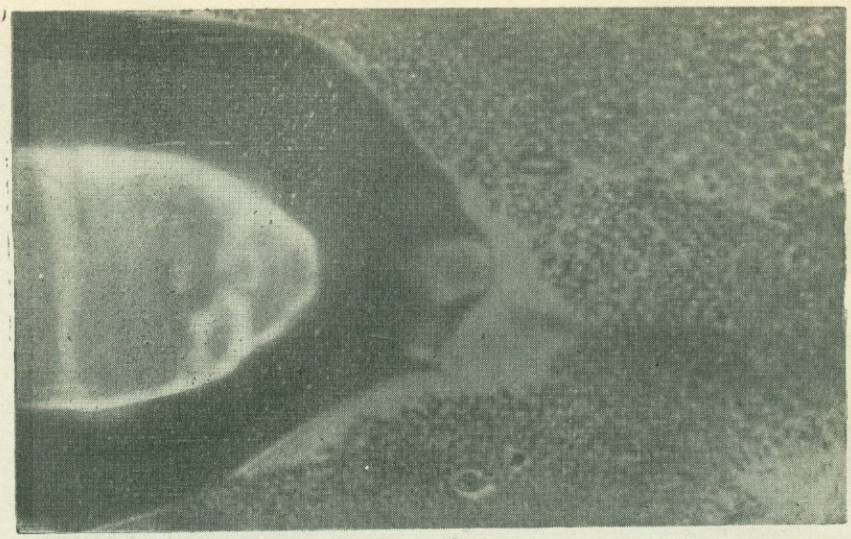
в



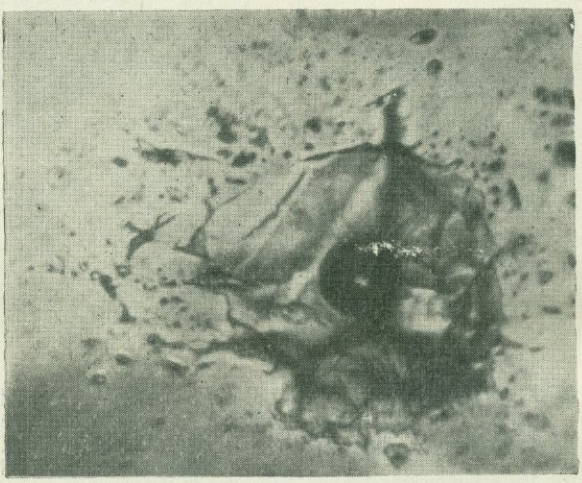
г



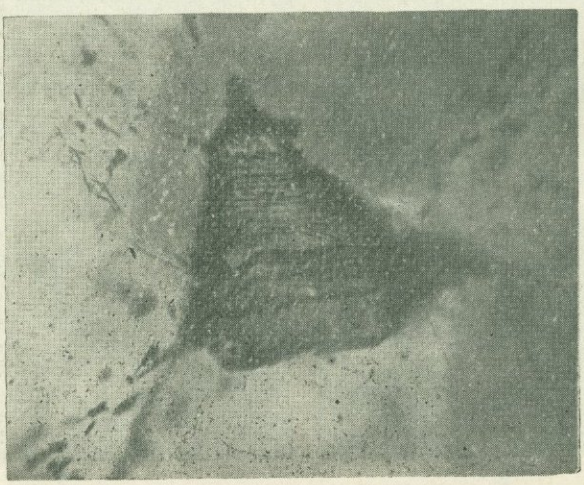
12



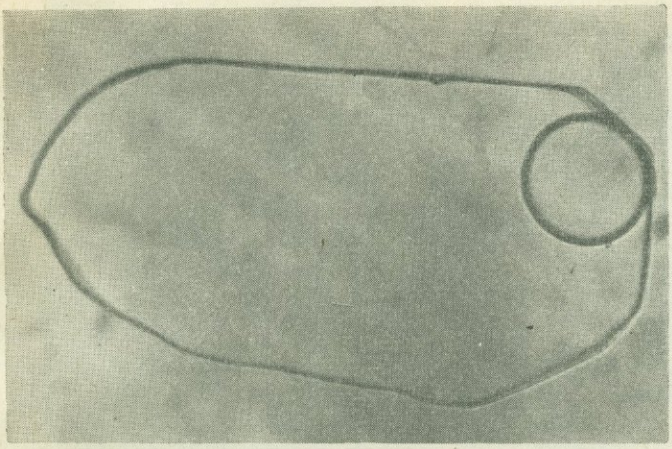
а



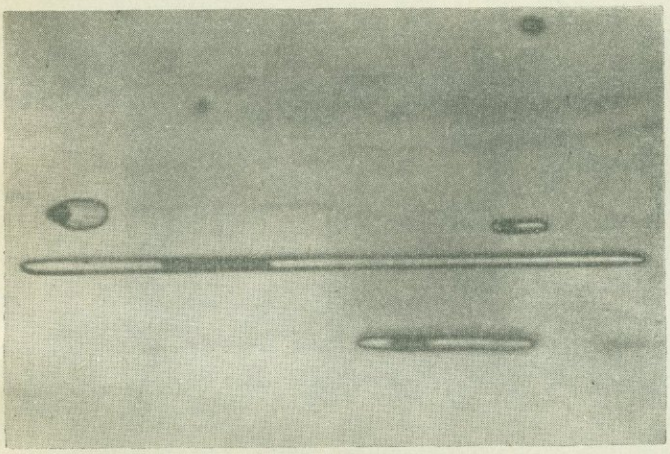
б



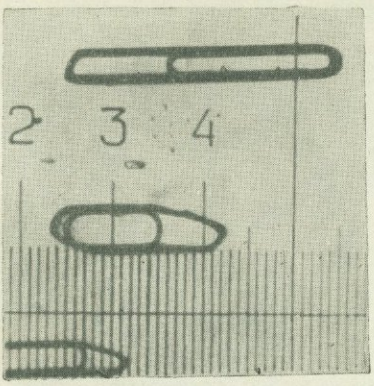
в



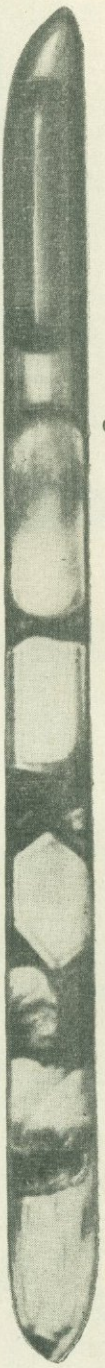
а



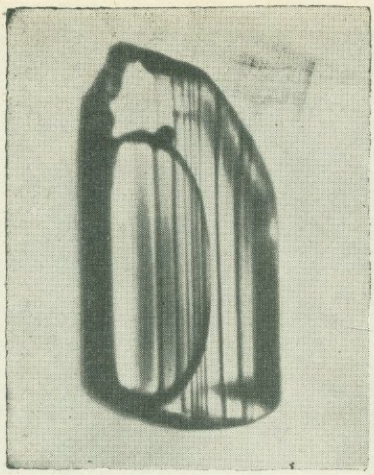
б




в



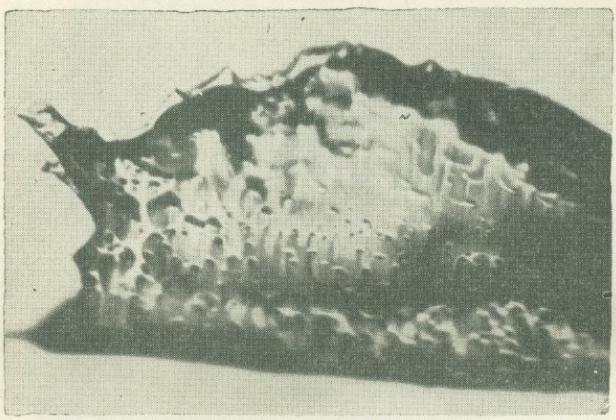
г



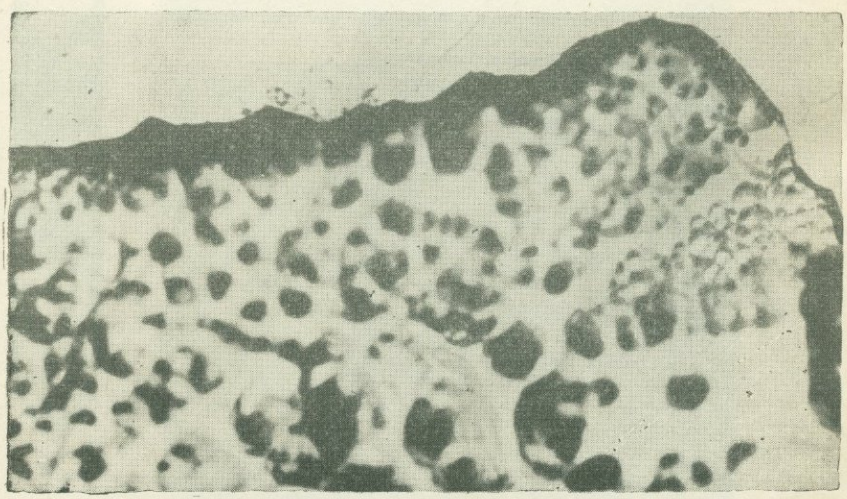
а



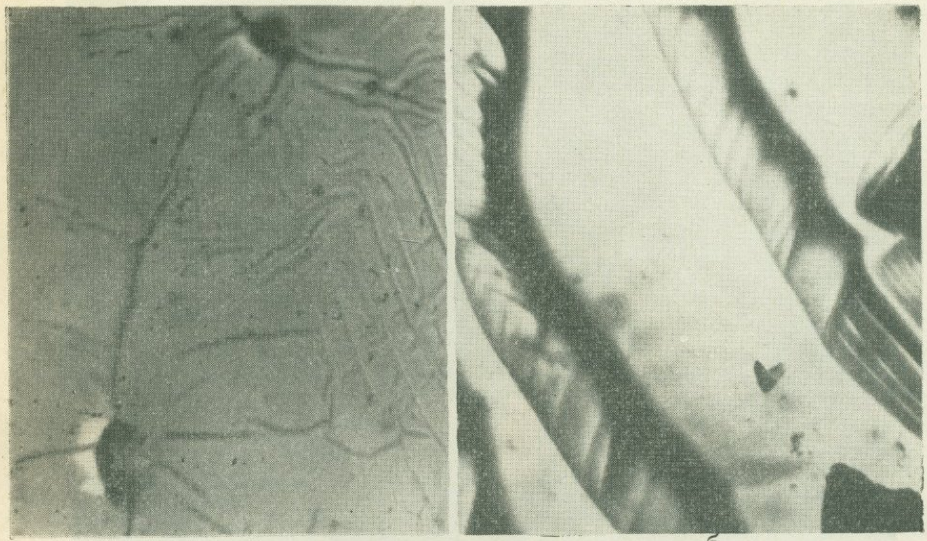
б



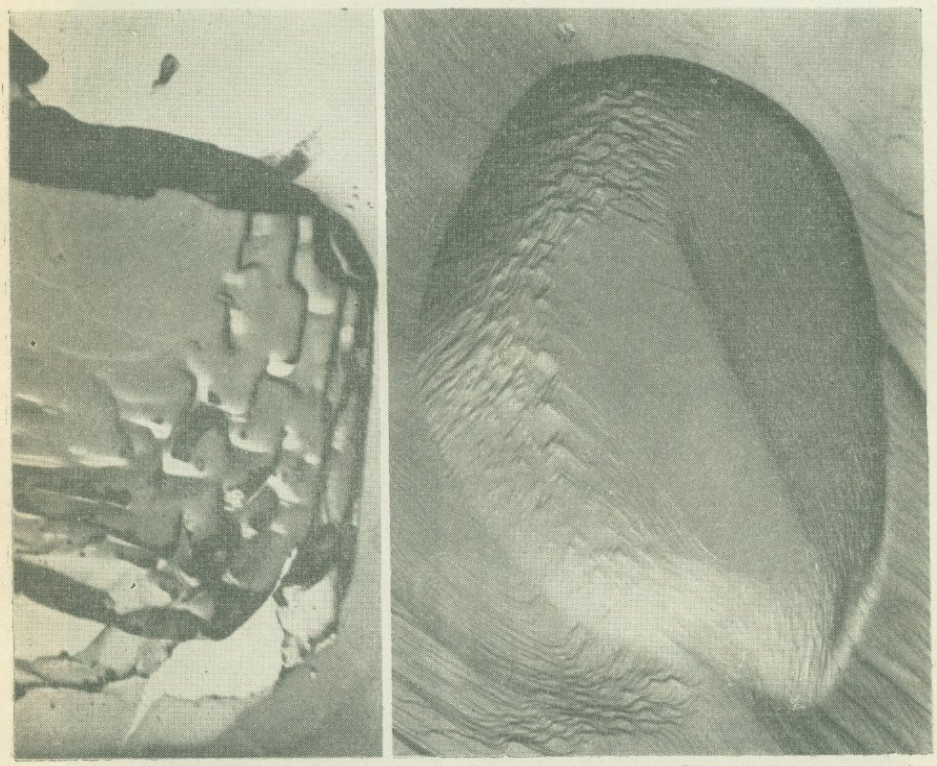
в



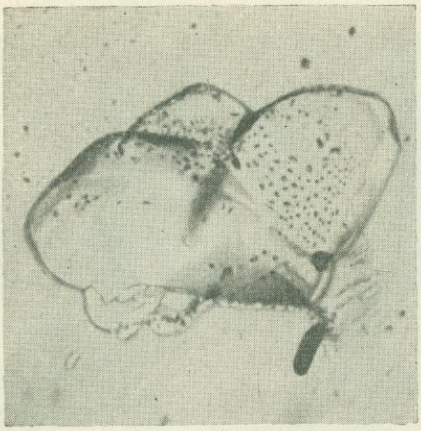
г



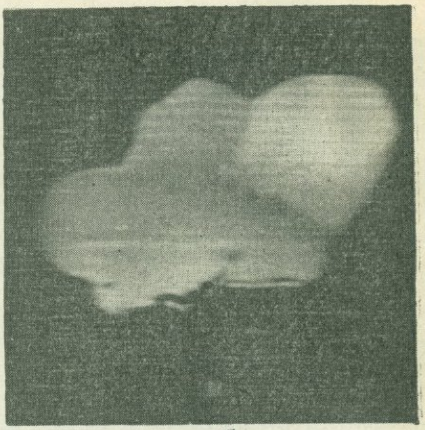
а б



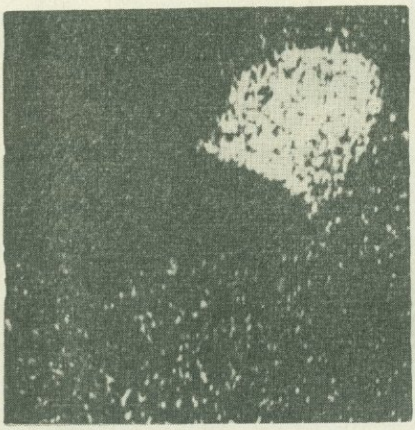
в г



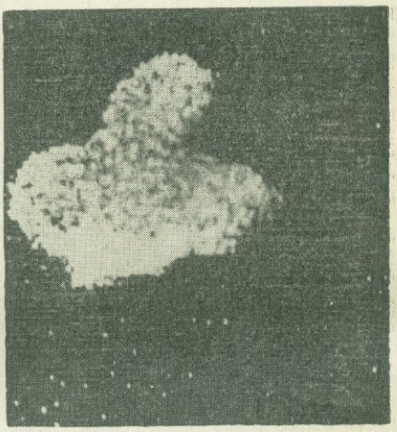
а



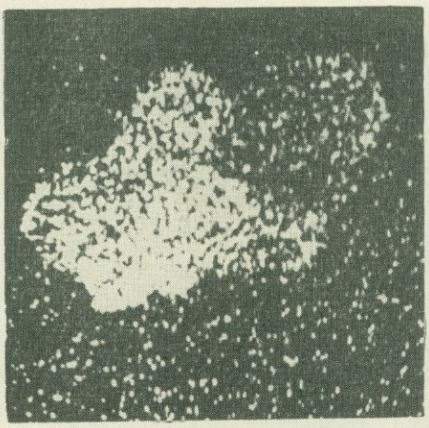
б



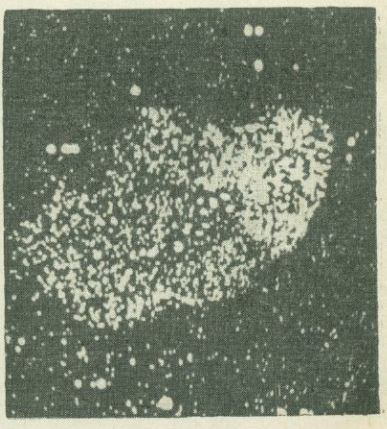
в



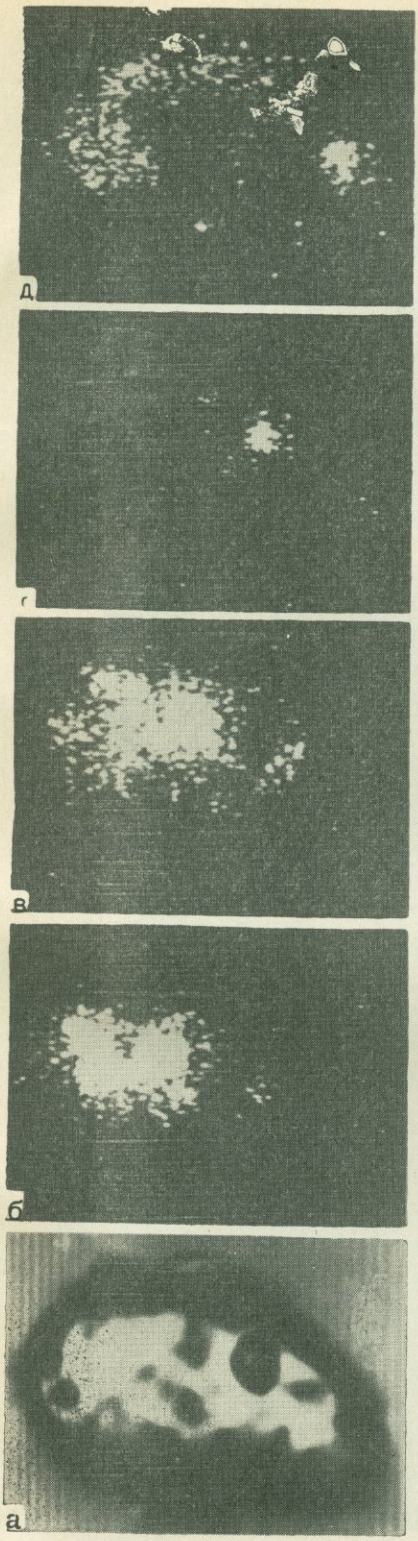
г



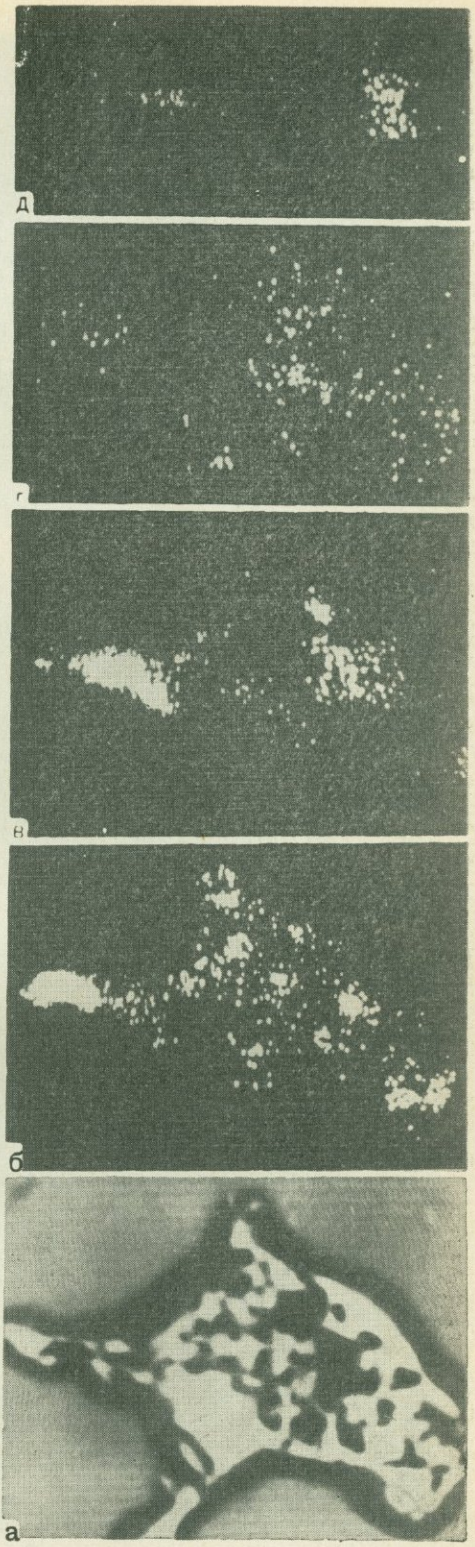
д



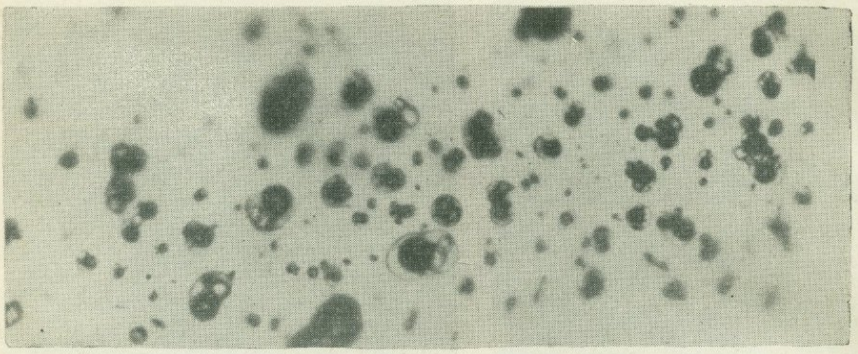
е



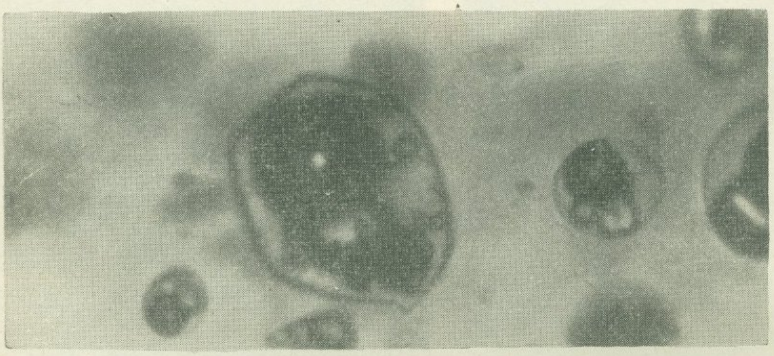

1



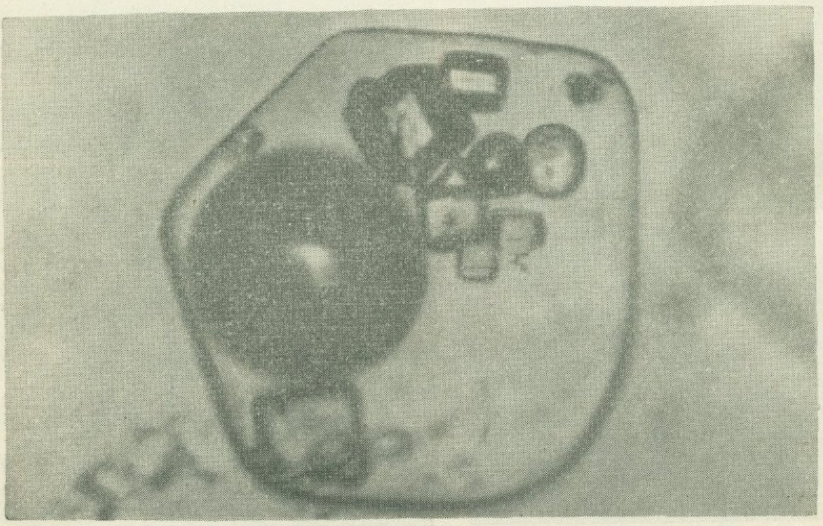

2



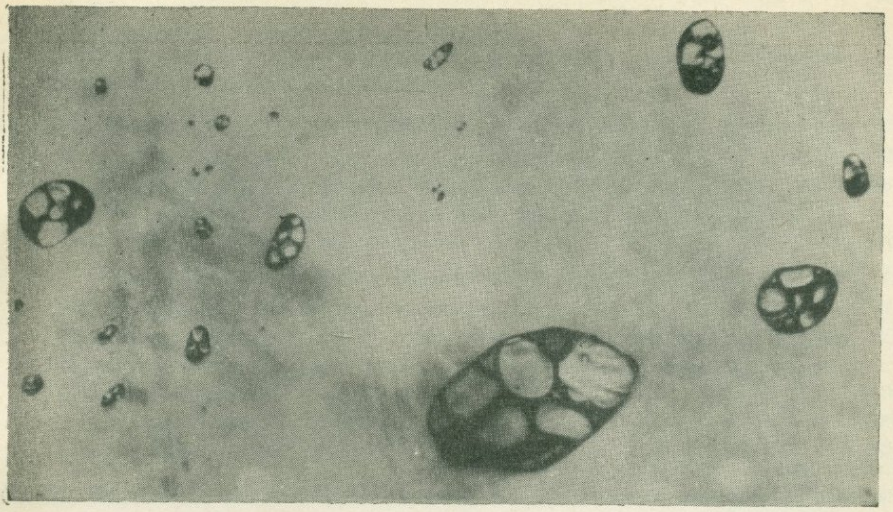
а



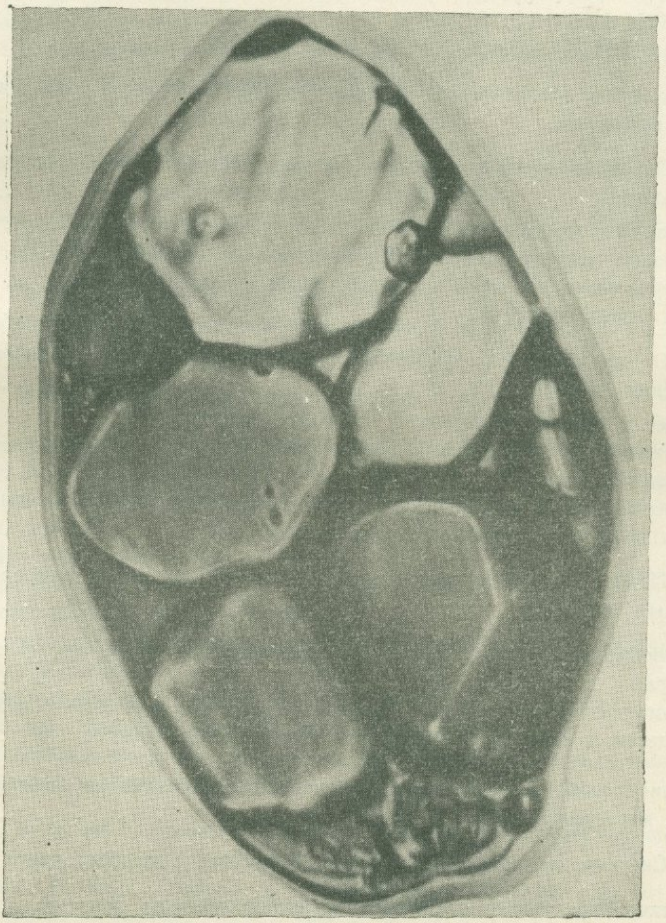
б



в



а



б

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие . . . . . 3
Введение . . . . . 7

РАЗДЕЛ ПЕРВЫЙ

ЭЛЕМЕНТЫ МЕТОДОЛОГИИ И ЗНАЧЕНИЕ СРЕДЫ В ПОЗНАНИИ ЭНДОГЕННОГО МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЯ

**Часть I. Основные и геологические формы движения материи и среда развития различных процессов.** . . . . . 17

Глава 1. Основная минералогическая форма движения среди других форм развития материи . . . . . 17
Некоторые особенности познания минерального мира . . . . . 17
Основная минералогическая форма движения материи . . . . . 20
Материальные носители основных форм движения материи на Земле и их взаимодействие . . . . . 28

Глава 2. О многообразии и разных уровнях проявления геологических форм движения материи . . . . . 32
Общее и частное в познании природы Земли . . . . . 32
Планетарно-геологическая форма движения и ее дифференциация в развитии Земли . . . . . 36
Строение геоида и сфера миграции (мигросфера) элементов земной коры в виде подвижных геохимических сред . . . . . 42

Глава 3. Понятие о среде развития различных процессов и самоорганизации природных объектов . . . . . 46
Разнообразие сред в спирали восходящего движения неорганической материи . . . . . 46
Взаимодействие и единство минералообразующей и геологической среды 51
Процессы и явления образования минеральных веществ . . . . . 54

**Часть II. Минералообразующая среда и геологическая обстановка формирования глубинных месторождений** . . . . . 57

Глава 4. Системы и процессы в средах глубинного рудообразования . . 57
Краткое определение некоторых термодинамических понятий . . . 57
Различия и переходы в агрегатных состояниях природных веществ . . 60
Сведения о строении и свойствах воды и гидрогеохимии ее растворов 64

**Глава** 5. Минералообразующие среды в земной коре . . . . . 69
Генетические сведения о магме и ее производных . . . . . 69
О формах переноса веществ и составе минералообразующих сред . . 74
Представление о подвижном уровне агрегатных превращений минералообразующих растворов по вертикальному разрезу и о телескопировании процессов минералообразования . . . . . 79

**Глава** 6. Важнейшие физико-химические свойства геологической среды . . 82
Фильтрационные свойства и генезис трещиноватости . . . . . 82
Некоторые физико-химические и теплофизические свойства горных пород 88
Тектонофизические особенности горных пород и их классификация по физическим и химическим свойствам . . . . . 92

**Глава** 7. Геологическая обстановка формирования эндогенных месторождений 96
Месторождения в геологическом аспекте . . . . . 96
Структуры месторождений и их разграничение по времени образования 99
Пространственное разграничение эндогенных структур локализации, их генезис и принципы классификации . . . . . 101
А. Тектоногенные структуры . . . . . 105
Б. Магмогенные структуры . . . . . 106

**Часть III. Введение к новой истории изучения и использования консерватов минералообразующих сред** . . . . . 110

**Глава** 8. Новые положения в термометрических исследованиях газово-жидких включений, выявленные к 1950 г. . . . . 111

**Глава** 9. Схема главнейших этапов и стадий рудообразующего процесса и принципы выяснения стадийности минералообразования . . . . . 117

## РАЗДЕЛ ВТОРОЙ

## КЛАССИФИКАЦИЯ ВКЛЮЧЕНИЙ И СОДЕРЖАЩАЯСЯ В НИХ ГЕНЕТИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Часть IV. Разнообразие вещества включений в минералах и его происхождение.** 127

**Глава** 10. Группы включений и главные определения . . . . . 127

**Глава** 11. Твердые включения сторонних веществ . . . . . 130
Включения минералов-«предшественников» и присыпок . . . . . 131
Включение минералов-«спутников» и вростков . . . . . 134

**Глава** 12. Углеводородные включения и битумы . . . . . 137

**Глава** 13. Классификация включений консерватов обычных минералообразующих сред по их составу и фазовому состоянию . . . . . 140
Принципы, номенклатура и классификация включений по их составу и состоянию . . . . . 143
Включения затвердевших расплавов . . . . . 154
Аморфные включения . . . . . 155
Раскристаллизованные включения . . . . . 158
Кристалло-флюидные (кристалло-газовые) включения остаточных расплавов-рассолов . . . . . 161
Включения газовых растворов и их смесей . . . . . 162
Включения жидких гидротермальных растворов . . . . . 170

**Часть V. Происхождение и относительное время формирования включений минералообразующих геохимических сред** . . . . . 178

**Глава** 14. Возрастное взаимоотношение включений и консервирующих их минералов . . . . . 178
Общее значение вопроса и трехчленное возрастное подразделение включений на классы . . . . . 178
Увязка состава и свойств минералообразующих сред со способами и временем их консервации во включениях . . . . . 184

Глава 15. Современная генетическая классификация нормальных включений минералообразующих сред . . . . . 189
Критическое рассмотрение существующих классификаций . . . . 189
Генетическое разнообразие видов и разновидностей нормальных включений . . . . . 194
Первичные включения (зональные и азональные) . . . . . 194
Мнимовторичные субсингенетические включения (первично-вторичные, псевдовторичные) . . . . . 202
Вторичные эпигенетические включения . . . . . 210
Общие выводы по генезису нормальных включений растворов и расплавов . . . . . 212
Глава 16. Аномальные газово-жидкие включения в минералах . . . . 214

## РАЗДЕЛ ТРЕТИЙ
## МЕТОДЫ И ТЕХНИКА ИЗУЧЕНИЯ СИСТЕМ ВКЛЮЧЕНИЙ В СТАТИЧЕСКОМ СОСТОЯНИИ

**Часть VI. Макроскопия, микроскопия и интроскопия минералов и включений** . 223

Глава 17. Макроскопия включающих минералов . . . . . 223
Программа макровизуального изучения включающих кристаллов и их агрегатов . . . . . 223
Онтография минералов и дефектология кристаллов на примере флюорита . . . . . 225

Глава 18. Оптическая микроскопия систем включений в минералах . . . 236
Макропрепараты для микроскопического изучения включений . . . 236
Оптические способы визуального изучения и распознавание природы включений . . . . . 239
Микрокристалломорфология вакуолей включений и измерение соотношений фаз . . . . . 246

Глава 19. Перспективы применения новейшей техники в изучении включений 253
От увеличительной линзы до лазерного микроспектроанализатора . . 253
Электронография ультрамикрорельефа вакуолей включений и их твердых фаз . . . . . 254
Микрорентгеноспектроанализаторы при изучении состава твердых фаз включений расплавов и растворов в минералах . . . . . 258
Специальная интроскопия для выявления включений в непрозрачных минералах . . . . . 261
Лазерный микроспектральный анализ . . . . . 263

**Часть VII. Использование включений растворов и расплавов в статическом состоянии** . . . . . 265

Глава 20. Внутривакуольная ультрамикроминералогия многофазовых включений . . . . . 265
Начало становления методики и техники ультрамикроминералогии . . 265
Определения минералов-узников многофазовых газово-жидких включений . . . . . 269
Изучение микроминералов во включениях затвердевших расплавов . . 287

Глава 21. Минералогическая термометрия глубинных процессов рудообразования . . . . . 291
Основные направления развития геологической и минералогической термометрии . . . . . 291
Визуально-вычислительные методы . . . . . 297
Сопоставление рассмотренных методов определения температур по включениям . . . . . 302

Глава 22. Суждения о концентрациях заключенных растворов (микрорефрактометрия и интерферометрия включений) 304

Глава 23. Отражение содержимого включений на свойствах и элементном составе минералов . . . . . 310
Потери при прокаливании безводных минералов . . . . . 311
Вариации в удельном весе минералов . . . . . 315
Значение включений при интерпретации спектральных анализов минералов и мономинеральных фракций . . . . . 317
Современное развитие исследований включений растворов и расплавов и их координация . . . . . 321
Списки литературы по разделам . . . . . 327
Фототаблицы . . . . . 339

*Ермаков Николай Порфирьевич*

**Геохимические системы включений в минералах**

Научный редактор *Д. Н. Хитаров*
Редактор издательства *В. А. Крыжановский*
Техн. редактор *В. И. Калужина*
Корректор *М. П. Курылева*

Сдано в набор 8/VII 1971 г.
Подписано в печать 10/I 1972 г.
Т-02327 Формат 70×108¹/₁₆ Печ. л. 23,5
Усл. печ. л. 32,9 Уч.-изд. л. 32,83
Бумага № 1 и мелов. Индекс 1-4-1 Заказ 369/2800-2
Тираж 3000 экз. Цена 3 р. 86 к.

Издательство «Недра».
Москва, К-12, Третьяковский проезд, д. 1/19.

Московская типография № 6 Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР
Москва, Ж-88, 1-й Южно-портовый пр., 17.

45