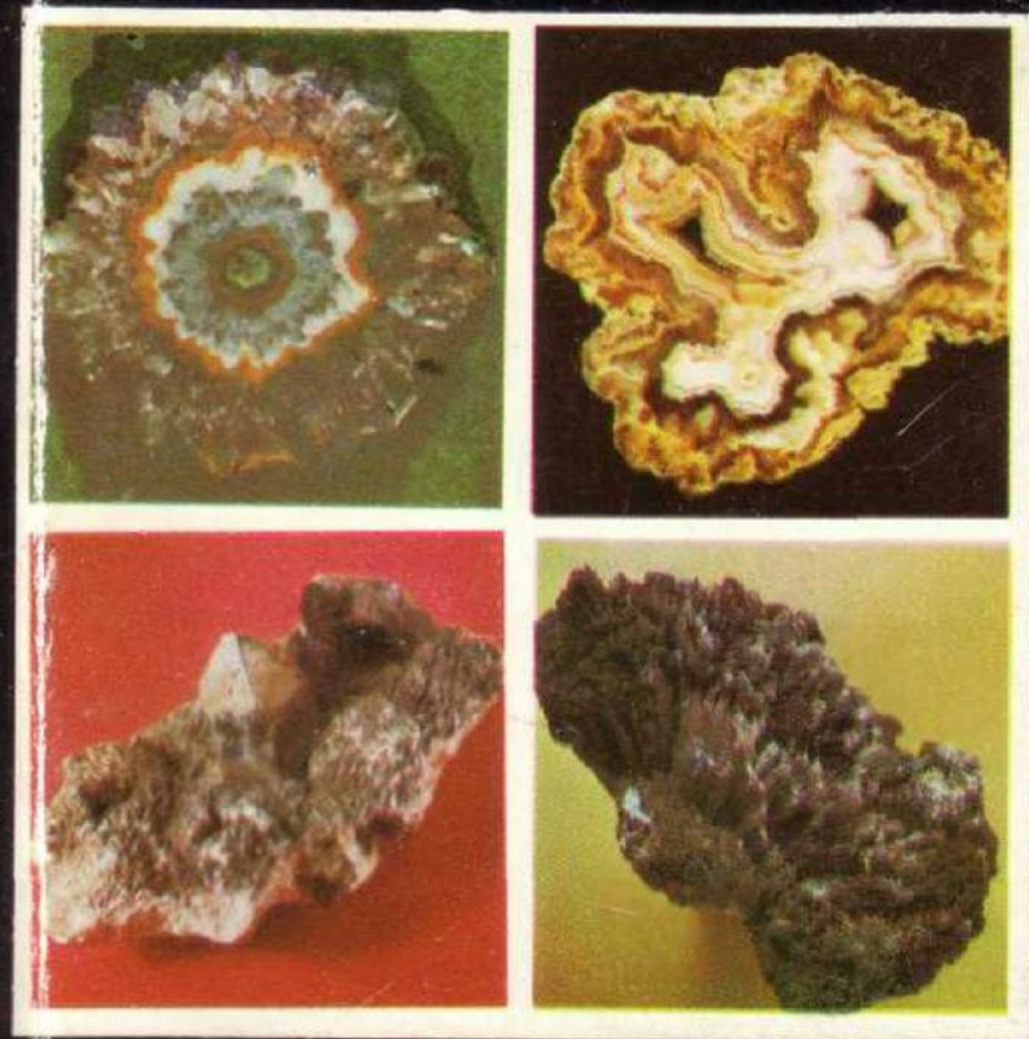


В.И.Павлишин
Н.П.Юшкин
В.А.Попов



ОНТОГЕНИЧЕСКИЙ МЕТОД В МИНЕРАЛОГИИ



АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНСКОЙ ССР
ИНСТИТУТ ГЕОХИМИИ И ФИЗИКИ МИНЕРАЛОВ
УКРАИНСКОЕ МИНЕРАЛОГИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО

*В.И.Павлишин
Н.Л.Юшкин
В.А.Попов*

ОНТОГЕНИЧЕСКИЙ МЕТОД В МИНЕРАЛОГИИ

*Сергей Павлов
в редакционном
и научном
Л. Попов*

УДК 549.0

Онтогенический метод в минералогии / Павлишин В.И., Юшкин Н.П., Попов В.А. - Киев : Наук. думка, 1988. - 120 с. - ISBN 5-12-000850-х,

В монографии проанализировано современное состояние генетической минералогии и ее методов, детально изложена сущность онтогенического метода как естественноисторического подхода к изучению объектов минералогии. Излагаются общая методика и практические приемы онтогенических исследований анатомии минеральных индивидов и пространственно-временных взаимоотношений между минералами. Предлагаются пути использования онтогенической информации для решения проблем минералогии, повышения эффективности поисковых и разведочных работ, совершенствования технологических процессов переработки минерального сырья.

Для специалистов геологоразведочных организаций и научных учреждений, а также преподавателей и студентов геологических факультетов.

Ил. 162. Табл. 7. Библиогр.: с.111—118 (314 назв.)

Ответственный редактор *Д.П. Григорьев*

Рецензенты *О.И. Матковский, А.А. Вальтер*

Редакция литературы о Земле

П 1904020000-118

М 221(04)-88

284-87 7

ISBN 5-12-000850-х

© Издательство "Наукова думка", 1988

В раскрытии минерально-сырьевых ресурсов, в эффективности освоения новых видов минерального сырья важное место занимает минералогия, которая, собственно, и сформировалась как наука благодаря запросам практики. Минералы являются источниками химических элементов и как носители полезных свойств широко используются в технике. Минерал — важнейший геологический документ, прочтение которого позволяет установить (смоделировать) условия и процессы, приведшие к образованию горных пород, жил, месторождений полезных ископаемых. Сохранение в "памяти" минералов материальных признаков их генезиса позволяет разрабатывать минералогические критерии поиска и оценки минерального сырья.

В настоящее время известно более 3000 минеральных видов и разновидностей, но всего лишь 15 % из них считаются полезными и применяются в промышленности. Это вызвано не только ограниченностью распространения в природе или рассеянностью некоторых минералов, но и неумением использовать их, незнанием их полезных свойств. Необходимо еще раз подчеркнуть, что нет бесполезных минералов. Свидетельство тому — вовлечение с каждым годом в сферу промышленного освоения все большего числа минеральных видов.

Минералогическая наука, являясь многоплановой, строится на генетической основе, поскольку все особенности и свойства минералов, в том числе полезные, делающие данные природные образования рудами, определяются их генезисом. По этому пути идут современные минералогические разработки, связанные с выявлением новых видов минерального сырья, решением проблем технологической и поисковой минералогии. Роль генетической

минералогии в нашей науке чрезвычайно весома и ответственна, интерес к ней со стороны теоретиков и практиков постоянно растет, что вызывает рождение и развитие новых направлений. Среди них самое почетное место занимает учение об онтогении минералов, созданное профессором Ленинградского горного института Д.П.Григорьевым.

Д.П.Григорьев определил онтогению минералов как учение об онтогенезе, индивидуальном развитии минералов, т.е. "...о генезисе минеральных индивидов и агрегатов" [64, с.17], причем в понятие генезиса вкладывается "... полная совокупность явлений их истории... от акта зарождения и до конца существования" [70, с.411].

Во введениях ко многим своим работам, посвященным данной теме, Д.П.Григорьев указывал, что впервые представление об онтогении минералов было высказано им на юбилейной сессии Всесоюзного минералогического общества в 1947 г. [55]. Однако, просматривая указатель научных трудов ученого, можно отметить, что первая его работа строго онтогенетического содержания вышла в свет еще в 1944 г. Это статья о результатах наблюдений гравитационного перемещения кристаллов в **жилах** альпийского типа на Приполярном Урале [54]. В последующие годы онтогенетическая тема становится основной в его трудах. К 1947 г. контуры учения об онтогении минералов определяются довольно четко, а в 1955 г. был впервые введен в минералогию сам термин **онтогения минералов** [61]. В 1961 г. во Львове благодаря инициативе и поддержке акад. АН УССР Е.К.Лазаренко и под его редакцией была опубликована фундаментальная монография Д.П.Григорьева "Онтогения минералов", обобщившая все достигнутое в этом направлении.

Один из авторов с благоговением вспоминает своего учителя акад. АН УССР Е.К.Лазаренко, который более четверти века назад обратил наше внимание - тогда молодых слушателей первых лекций Д.П.Григорьева по онтогении минералов во Львовском университете — на большое будущее этого нового направления в минералогии.

Учение об онтогении минералов не случайно возникло именно в нашей стране, где органическое единство теории и практики традиционно рассматривается как необходимое условие развития геологической науки.

Начиная с XVIII в. Россия становится страной с высокоразвитой горной промышленностью, одновременно превращаясь в одного из ведущих поставщиков на мировой рынок не только металлов и руд, но и драгоценных камней и уникальных коллекционных минералов. В светских кругах и в начинающей формироваться научной среде растет интерес к минералам и к минералогии. Энергичную пропаганду минералогических знаний ведет первый русский минералог М.В.Ломоносов, который сам плодотворно работает в области генезиса минералов, трудится над созданием первой минералогии России, высказывает ряд важных для последующего развития этой науки генетических и эволюционных идей.

Русские минералоги творчески воспринимали и развивали все ценное, что было сделано в мировой науке. В их работах нашли отражение идеи и труды Н.Стенона, А.Г.Вернера, А.Ф.Кронштедта, И.Г.Валле-рия, К.Линнея, Р.Ж.Гаюи, в которых минералы рассматривались как реальные физические тела.

Проблемам морфологии, строения и генезиса минеральных индивидов посвящены труды многих русских минералогов. После М.В.Ломоносова их развивал В.М.Севергин (1798-1809), в XIX в. - начале XX в. изучению минеральных индивидов много времени отдавали М.А.Толстопятков, М.В.Ерофеев, А.Н.Карножицкий, А.П.Карпинский, А.Е.Ферсман и др.

И все-таки в минералогии вплоть до начала XX в. доминировали статические представления, особенно ярко отражавшиеся в преподавании минералогии и кристаллографии. В.И.Вернадский по этому поводу писал, что он "в течение долгих лет, с 1890 по 1911 г., в полном несогласии с преподаванием минералогии на Западе и в России, стоял не на точке зрения системы

природы, а на точке зрения истории минералов" [26, с.313]. В.И.Вернадский в то время выступил, по меткому замечанию наших современников, как реформатор минералогической науки. Он фактически переработал минералогию на генетической основе, принципиально по-новому определил ее содержание и задачи [26, 27]. Ближайший ученик Владимира Ивановича А.Е.Ферсман в связи с этим писал, что "...создается настоящая точная наука о генезисе минералов, о законах их образования, накопления и распада, т.е. наука об истории химических соединений..." [241, с.416].

Если во времена И.И.Вернадского и раньше минерал, исходя из интересов рудного дела, рассматривался преимущественно с позиций химического соединения (вещества) - составной части рудных залежей (руд), являющихся источником извлечения химических элементов, то позднее, как подметил Д.П.Григорьев [62], в минералогии усилилось внимание (на этот раз исходя из интересов промышленности неметаллических полезных ископаемых) к минеральным индивидам и агрегатам, которые благодаря своим свойствам (пропускать и генерировать лучи, пьезооптическим, изоляционным и др.) находят применение без химического разрушения. Совершенно ясно, что старый подход (как к химическим веществам) к этим реально существующим составным частям горных пород и месторождений - минеральным индивидам и агрегатам — оказался явно недостаточным. Возникла необходимость проникнуть во внутренний мир сложно устроенных индивидов, понять генетическую природу их гетерогенного строения, дефектности, выяснить, почему в одних случаях образуются используемые промышленностью минеральные тела, а в других — такого же состава минералы оказываются непригодными для использования и т.д. Запросы науки и практики, среди которых следует упомянуть также положительную роль промышленного синтеза минералов, плодотворно стимулировали разработку новых представлений об объектах минералогии и в области генезиса минералов, завершившуюся созданием стройного учения об онтогении минералов. Замечательные работы, в значительной степени способствовавшие зарождению онтогении минералов и вошедшие в ее золотой фонд, создали Г.Г.Леммлейн, Г.Н.Вертушков, И.И.Шафрановский, А.В.Шубников, Е.К.Лазаренко, А.Е.Карякин и др.

После выхода в свет упоминавшейся монографии Д.П.Григорьева [64] учение об онтогении минералов, встречавшееся ранее несколько настороженно, получает широкое признание. Публикации, посвященные онтогении минералов, постоянно цитируются и обсуждаются на съездах ВМО, они переводятся на многие иностранные языки и распространяются в разных странах, онтогенетические представления включаются в университетские курсы и минералогические учебники, в частности в курсы минералогии Е.К.Лазаренко, А.А.Годовикова, И.Костова, И.Сунагавы и др.

Сформировалась советская школа минералов-онтогенистов.

Кроме обогащения минералогии и смежных наук фундаментальными теоретическими представлениями и положениями, определившими дальнейшие направления развития генетической и прикладной минералогии, учение об онтогении минералов внесло определенный вклад в методический аппарат минералогической науки. Оно дало принципиально новый онтогенетический метод исследования. Этот метод, в основе которого лежит сравнительно-исторический анализ [72], позволяет с высокой степенью надежности расшифровывать историю минералогических объектов, в том числе выявлять особенности процессов образования индивидов и агрегатов. По Д.П.Григорьеву, "... процедура онтогенетического познания складывается из двух этапов: первоначально на минералах известного по тем или иным данным генезиса раскрывается генетический "шифр" в его общем, модельном виде (т.е. с исключением частных особенностей изученных объектов), а затем шифр применяется при прочтении признаков генезиса у других минералов" [70, С.414].

Большую роль в распространении и развитии идей онтогении сыграли циклы лекций, читавшиеся специалистами в различных научных центрах Советского Союза — Москве, Ленинграде, Киеве, Львове, Алма-Ате, Баку, Тбилиси, Ереване, Свердловске, Новосибирске, Апатитах, Сыктывкаре и др., в университетах и исследовательских институтах Праги, Софии, а также многочисленные монографии и статьи Д.П.Григорьева, его учеников и последователей.

Большой материал по онтогении минералов собран в двух сборниках "Генезис минеральных индивидов и агрегатов. Онтогения минералов" [38] и "Онтогенетические методы изучения минералов" [168], вклю-

чающих статьи не только советских авторов, но и минералогов из ЧССР, ГДР, НРБ, США и Японии. Они издавались по инициативе и под редакцией А.Г.Жабина — наиболее последовательного ученика Д.П.Григорьева, внесшего крупный вклад в развитие онтогении минералов. Затем в Уральском научном центре АН СССР были подготовлены еще два, но уже более узких по тематике сборника* — "Онтогения пегматитов Урала" [170] и "Онтогения минералов в практике геологических работ" [169].

Д.П.Григорьевым и А.Г.Жабиным в 1975 г. в расширенном виде была переиздана первая часть "Онтогении минералов", относящаяся к индивидам [76]. "Века в развитии минералогической науки" — такова справедливая, на наш взгляд, оценка авторитетных ученых этого нового обобщения по онтогении [247]. Действительно, отличительной особенностью данной работы, как и учения в целом, является глубина проникновения в объекты минералогической науки с одновременным рассмотрением их в историческом аспекте, а также строгость и логичность научных построений и выводов, перекликающихся с ясной перспективой развития генетической минералогии. Продолжением этого труда является монография А.Г.Жабина "Онтогения минералов. Агрегаты" [105].

Большое значение для развития онтогении минералов имеют работы Б.В.Чеснокова "Относительный возраст минеральных индивидов и агрегатов" [250], В.А.Попова "Практическая кристалломорфология минералов" [188], Н.З.Евзиковой "Поисковая кристалломорфология" [97], монографии Ю.М.Дымкова [86, 89, 90] и др.

Несмотря на большой объем публикаций об онтогении минералов, существует серьезный пробел в изложении ее основных положений. Это касается главным образом ее методических основ — онтогенетического метода исследований, который весьма слабо освещен в литературе. Для ознакомления минералогов, в первую очередь молодых исследователей, с основами онтогенетического метода Всесоюзное минералогическое общество организовало школы по онтогении минералов в Ленинграде — в 1978 г. [270], Миассе — в 1982 г. [251], Сыктывкаре — в 1984 г. [284]. В процессе проведения этих школ возникла идея создания обобщающего труда по

* Во время подготовки рукописи к печати вышел в свет еще один солидный сборник научных трудов "Проблемы онтогении минералов" [202].

теории и практике онтогенического метода, практическим приемам и методикам онтогенических исследований, технике препарирования образцов, организации онтогенических лабораторий, выявлению и анализу анатомии минеральных индивидов, их возрастным взаимоотношениям и, наконец, по опыту онтогенических исследований в деле повышения эффективности геолого-разведочных и технологических работ.

Реализацией этой идеи и является предлагаемая книга. В ней авторы попытались обобщить методический опыт своих онтогенических исследований и исследований

коллег. Мы стремились охватить все аспекты онтогенического метода, но детальность и глубина анализа различных методических проблем в книге далеко не одинаковы, что определяется не только спецификой наших интересов, но и объективными причинами. Онтогенический метод — метод новый, и он еще далек от совершенства. Тем не менее мы надеемся, что наша книга окажется полезной для минералогов, осваивающих основы онтогенических исследований, и будет способствовать дальнейшему развитию онтогенического метода в минералогии.

* * *

Авторы выражают глубокую благодарность своим коллегам, оказавшим большую помощь в создании этой книги советами, обсуждением отдельных идей и положений, методических приемов. — Р.М.Алиеву, А.М.Асхабову, В.С.Балицкому, Р.Л.Бродской, В.В.Буканову, Г.Н.Вертушкову, Р.В.Галиулину, А.Э.Гликину, А.И.Глазову, Ю.М.Дымкову, Н.З.Евзиковой, А.Г.Жабиную, В.Н.Кадурину, С.К.Кузнецову, Е.Г.Макагонову, Ю.Б.Марину, Г.А.Марковой, В.В.Матиасу, Д.А.Минееву, И.Я.Некрасову, И.В.Носыреву, Б.И.Пирогову, А.Н.Платонову, В.И.Поповой, В.Н.Сер-

гееву, Н.Г.Стениной, В.И.Степанову, А.С.Таланцеву, В.А.Франк-Каменецкому, Б.В.Чеснокову, И.И.Шафрановскому, П.П.Юханову и др. Мы благодарны сотрудникам ИГФМ АН УССР и ИГ Коми ФАН СССР Н.П.Мозолева, Н.И.Бучинской, Л.Н.Божеско и В.С.Осташенко за оказание технической помощи при подготовке рукописи к печати, а также всем лицам, любезно предоставившим слайды для ее иллюстрирования.

Особенно признательны мы профессору Д.П.Григорьеву, вдохновившему нас на эту работу и взявшему на себя труд по ее редактированию.

ГЛАВА I

ГЕНЕТИЧЕСКАЯ МИНЕРАЛОГИЯ И ЕЕ МЕТОДЫ

Термин *генетическая минералогия* введен А.Е.Ферсманом в 1912 г. и может быть поэтому ее не совсем справедливо называют наукой XX в. Если мы перелистаем выдающиеся труды прошлого века, например "Учебник минералогии" Г.Чермака [248] или "Химическую минералогию" Р.Браунса [17], то по их генетическим разделам убедимся, что минералогенетические представления уже тогда были довольно глубокими и разносторонними и удовлетворительно объясняли природу и механизмы важнейших минералообразующих процессов.

Генетическая минералогия как вполне определенное научное направление стала оформляться с конца XVIII в., когда, с одной стороны, споры непутистов и плутоновистов всколыхнули интерес естествоиспытателей к природе всех геологических объектов, а с другой — в минералогию влилась живительная струя химических идей, раскрывающих причинность и динамичность минералообразующих процессов. Попытки же как-то объяснить генетическую природу минералов предпринимались в самых ранних камневедческих трудах. Однако генетические толкования древности и средневековья представляют собой трудно дифференцируемую смесь удачных и неудачных интерпретаций наблюдаемых фактов, гениальных догадок и мистических вымыслов.

Кристаллы горного хрусталя (как, впрочем, и другие кристаллы) рассматривались Аристотелем как образовавшиеся из льда под действием сильного холода (эти представления дошли даже до средневековья), Диодор Сицилийский считал их тоже образовавшимися из воды, но закристаллизовавшимися под действием "силы божественного солнца". Разнообра-

зие камней объяснялось различным сочетанием составляющих их начал. Так, согласно Платону, металлы (медь, золото) — это результат "сочетания" воды и земли, а камни состоят из чистой земли, они более красивы и прозрачны, когда сложены частицами одинаковой формы и размеров, и менее красивы, когда составлены разными частицами. Много "генетических" сведений приводится в "Естественной истории" Плиния, но сведения эти чрезвычайно курьезны: здесь фигурируют камни, падающие с неба во время лунных затмений; камни, вырезанные из мозга спящего дракона; всерьез обсуждается проблема "беременных камней", рождающих себе подобных (Плиний пишет, что это утверждали Теофраст и Мутианус), и т.п. Мистические представления были довольно живучими. Вплоть до конца XVII в. вели дискуссию две школы, представители одной из них считали, что жизнь и структура минералов полностью подобны жизни и структуре растений, что камни, как и растения, растут за счет земных соков, впитываемых и циркулирующих по порам, кавернам, трубчатым волокнам, каналам (Д.Кардано, И.Ф.Генкель и их последователи); представители другой утверждали, что минералы растут с поверхности, увеличиваясь в объеме за счет нарастающего вещества, свидетельством чему являются слои роста.

Мистические и полумистические представления о генезисе минералов сыграли определенную роль в формировании научных идей. Из идеи о кристаллах как затвердевшей воде, трансформировавшейся в идею о кристаллах как затвердевших соках земли, выросли представления о кристаллизации минералов из природных растворов. Эти представления уже довольно

четко оформились в трудах Г.Агриколы, который в качестве минералообразующих сред рассматривал подземные и поверхностные воды, проникшие на глубину и нагретые глубинным теплом. Декарт объяснял происхождение многих минералов из эксгаляций, поступающих из недр земли, о чем свидетельствуют наблюдения над вулканами. А.Г.Вернер и другие негпунисты проложили путь представлениям об осадочном минералообразовании, а Д.Хеттон и плутонисты — представлениям о магматогенном минералообразовании.

Ныне генетическая минералогия — одно из ведущих минералогических направлений. В нашей стране ее развитие связано с именами В.И.Вернадского, А.Е.Ферсмана, Д.П.Григорьева, Д.С.Коржинского, Е.К.Лазаренко, Г.Глеммлейна, Н.М.Федоровского, Ф.В.Чухрова, Н.П.Ермакова, А.Г.Жабина, В.Ф.Барабанова, Ю.М.Дымкова, А.А.Годовикова и других минералогов.

Генетические идеи формируются на основе данных об условиях нахождения минералов в природе, на основе наблюдений над современным минералообразованием и данных по экспериментальному моделированию минералогенетических процессов, а также на современных представлениях о конституции, морфологии и свойствах минералов. В частности, учет первых позволил разработать довольно совершенную теорию морфогенеза минеральных индивидов, существенно уточнить физико-химический аспект минералообразующих процессов, ввести энергетическую характеристику процессов. На основе кристаллохимических законов, свойств атомов и соответствующей данному принципу классификации минералов открылись широкие возможности для разработки минералогических прогнозов.

Для современного этапа развития минералогии характерно повышенное внимание к реальным минеральным индивидам, их химическому составу, структуре, форме, анатомии, функциям. Успехи в учении о реальных минералах впечатляющи. Н.В.Белов оценил их как революцию в минералогии. Сформирова-

лись принципиально новые направления, среди которых выделяется своей актуальностью, логической стройностью и практической эффективностью учение об онтогении минералов [64, 102, 105, 285].

Результаты исследований 1960—1980-х гг. приводят к представлению о минерале как о организме и определяют принципиально новый путь [78, 283] развития минералогии: "Минералы, т.е. кристаллы и зерна, в форме которых реально существуют природные химические соединения и физико-химические фазы, выступают в нашей науке каждый как целостный организм, индивид, со своей анатомией, всегда по-своему живущий... Познание минерала как организма и его естественной истории, обуславливающей все качества, условия и места нахождения минералов, есть назначение и прерогатива минералогической науки" [69, с.6-7].

Представление о минерале как организме раскрывает такие стороны строения, формы и поведения минералов и такие их функции, которые раньше приписывались лишь биологическим объектам. Например, анатомия минеральных индивидов с относительно автономными анатомическими элементами, динамическое поведение минералов в меняющихся условиях, существование взаимосвязей между минералами и минералообразующей средой, в том числе и существование обратных связей, подчиненность всеобщим законам развития и направления эволюции, наследственность, существование регуляторных механизмов, саморегуляция и др. Конечно, все эти явления специфичны в соответствии со спецификой минерального мира. В таком подходе к минералу органически синтезируются традиционные физические, химические и кристаллохимические представления.

Общее состояние и пути развития генетической минералогии неоднократно рассматривались в печати [13, 25, 40, 41, 45, 55, 57, 61, 78, 107, 148-150, 154, 167, 182-184, 221, 222, 234, 252-254, 259, 266, 277, 278, 283, 287 и др.].

СТРУКТУРА ГЕНЕТИЧЕСКОЙ МИНЕРАЛОГИИ

Понимание структуры генетической минералогии облегчает раскрытие сущности ее методов.

"... Всесторонне понимаемое учение о генезисе минералов надо рассматривать как со-

четание двух разделов генетической минералогии — онтогении, т.е. учения о генезисе минеральных индивидов и агрегатов, и филогении, т.е. учения о генезисе минеральных видов и парагенезисов" [64, с. 16-17].

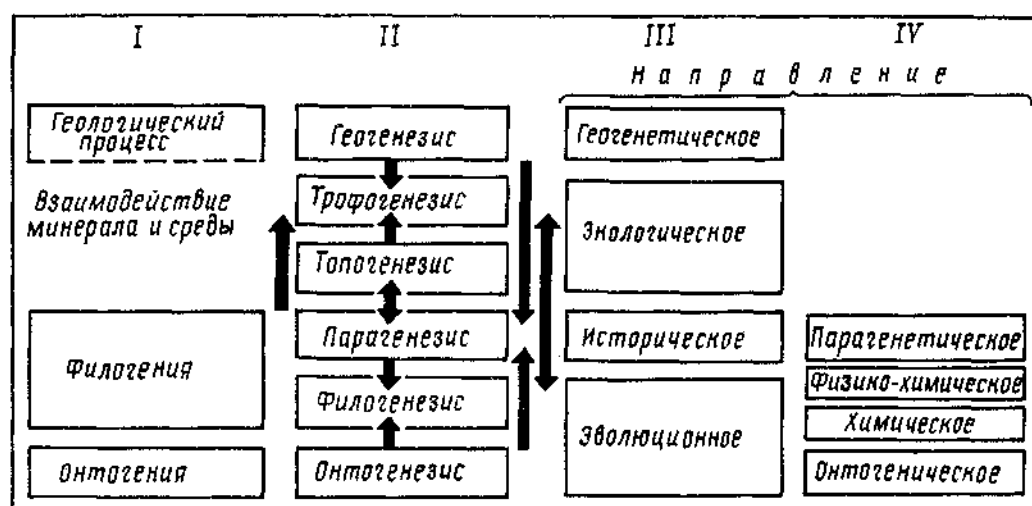


Рис. 1. Структурная схема генетической минералогии по данным разных авторов (составлена Ю.М.Дымковым, 1985): I – по Д.П.Григорьеву [64]; II – по Ю.М.Дымкову [89]; III – по Н.П.Юшкину, А.Г.Жабину [287]; IV – по А.И.Гинзбургу [45]

Проанализировав данные Д.П.Григорьева о генезисе минералов, предлагаем следующую структурную схему генетической минералогии [56]:

Явления минералогенезиса	Сущность явлений
Собственно образование минералов	Все моменты образования минералов: зарождение, рост и изменение, а также разрушение минералов
Способ образования	Физико-химический механизм генезиса – свободная кристаллизация, метасоматическое замещение, полиморфное превращение и др.
Геологический процесс минералообразования	Магматический, гидротермальный, осадочный и др.

Несколько иная структурная схема генетической минералогии предложена Ю.М.Дымковым [89]:

Явления минералогенезиса	Сущность явлений
Трофогенезис	Источники и механизм или способ питания минералов во время их образования
Геогенезис	Связь образования минералов с определенными геологическими процессами
Парагенезис	Процессы совместного образования минералов во времени
Топогенезис	Механизм распределения минералов в пространстве

Филогенезис

Онтогенезис

Механизм преобразования минералов как индивидуализированных химических и кристаллохимических соединений
Генетическая история минеральных индивидов и агрегатов

Обе схемы довольно близки по смыслу и отличаются только детальностью "деления" явления минералогенезиса.

А.И.Гинзбург [45] считает, что в современной генетической минералогии необходимо выделить следующие направления (разделы): химическое, физико-химическое, онтогенетическое, парагенетическое, введение же в генетическую минералогию экологического, эволюционного, геогенетического направлений (рассмотрены ниже) несколько преждевременно.

Анализ закономерностей образования и развития минералогических объектов и логика формирования генетических представлений в естествознании [23, 278] позволили заключить, что структурную основу генетической минералогии должны определять такие закономерности минералообразования [287]: а) структурные (конституционные); б) временные; в) пространственные.

Всесторонняя разработка триады "структура (конституция) – время – пространство" может быть обеспечена следующими взаимосвязанными направлениями:

– экологическая минералогия, изучающая функционирование

минералогенетических систем, причины и механизмы образования и существования минералов, взаимосвязи минерала и минералообразующей среды;

- историческая минералогия, раскрывающая историю минерального мира в связи с геологической историей Земли;

- эволюционная минералогия, изучающая законы развития минеральных индивидов и агрегатов (онтогенеза минералов) и минеральных видов и парагенезисов (филогения минералов);

- геогенетическая минералогия, раскрывающая минералогенетические аспекты геологических процессов.

Такая концепция генетической минералогии в общем согласуется с приведенными выше структурными схемами Д.П.Григорьева и Ю.М.Дымкова. В ней находят отражение и те эмпирически сложившиеся направления, о которых мы говорили при анализе современных тенденций в развитии генетической минералогии. Ю.М.Дымков [90] в одной из последних работ сопоставил все предложенные структурные схемы генетической минералогии, представив их в виде выразительной диаграммы (рис. 1).

Обратимся теперь к конкретным направлениям генетической минералогии.

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ МИНЕРАЛОГИЯ

Изучение условий образования и существования минералов, определение взаимосвязей между минералом и минералогенетической средой является главной задачей данного направления.

Минералогенетическая система - это физическое вещественное и энергетическое пространство, в котором зарождается и развивается минерал. Эволюционируя под действием внешних и внутренних факторов, минералогенетическая генеральная система (например, магматический расплав, гидротермальный раствор, метаморфизируемая порода и т.д.) при определенных условиях распадается на системы "минерал", "минералогенетическая среда" и взаимосвязи между ними [278]. Эту совокупность систем, благодаря функционированию взаимосвязей, можно и дальше рассматривать как единую минералогенетическую систему.

Взаимосвязи между минералом и средой в минералогенетической системе по характеру обмена подразделяются (табл. 1) на: а) энергетические, обеспечивающие обмен энергией; б) вещественные, обеспечивающие поступление вещества из среды, наборот, удаление вещества из минерала в среду и разрушение индивида; в) информационные, обеспечивающие передачу особенностей структурной организации вещества и энергии от среды к минералу и обратно. Каждой форме взаимодействия соответствуют два сопряженных параметра (табл. 2).

Взаимосвязи минерала и минералогенетической среды полностью определяют гене-

зис минерала, а анализ этих взаимосвязей и составляет сущность экологической минералогии. Анализ функционирования, например, энергетических связей является предметом минералогической термодинами-

Таблица 1. Природа взаимосвязей минерал - среда

Взаимосвязи	Обмен	Характер влияния на индивид
Энергетические	Энергией	Структурное преобразование (перераспределение дефектов, примесей, распад твердого раствора, полиморфные превращения и т.д.)
Вещественные	Веществом	Рост; уменьшение в объеме и разрушение; изменение формы вследствие перераспределения вещества; образование псевдоморфоз при замещении другим веществом
Информационные	Структурной организацией вещества и энергии	Формирование "штампа" (кода), по которому развиваются процессы первых двух групп

Таблица 2. Параметры минералогенетических систем

Элементарная система	Параметр	
	экстенсивный	интенсивный*
Механическая	Объем	Давление
Тепловая	Энтропия	Температура
Электрическая	Электрический заряд	Электрический потенциал
Химическая	Масса	Химический потенциал

* Не зависит от массы и размеров системы.

ки, анализ вещественных связей - предметом минералогической физхимии, учения о кристаллогенезисе и т.д.

Современная генетическая минералогия сосредоточила свои исследования на анализе пока еще ограниченного круга взаимосвязей минерала и среды, в первую очередь на связях, определяемых термодинамическими и физико-химическими параметрами. При этом генетические следствия изменения других важных параметров минералогической системы, таких, как электродинамические, электрохимические, биологические и др., изучаются очень слабо. Мало учитывается такой важный параметр, как время. В одной из своих работ В.И.Вернадский писал, что "... время есть одно из основных проявлений вещества, неотделимое от него его содержание" [28]. Да это и очевидно — без понятия *время* не может быть генетической минералогии как научного направления.

Почти совершенно не изучен характер структурных взаимодействий между минералом и средой, которыми создается своего рода "матрица" для постройки нового минерала [277, 278]. Яркие примеры проявления этих связей - эпитаксия, синтаксия, замещение на затравках и т.д. Их анализ может стать теоретической основой намечающегося учения о минералогической наследственности [245, 289]. Недостаточный учет всех факторов в современном физико-химическом анализе заставил ввести понятие об идеальных и реальных условиях образования минералов [50]. Приведенные примеры и соображения, по нашему мнению, убеждают в целесообразности перехода от минералогической термодинамики к минералогической экологии, т.е. к своего рода "широкой" физхимии. Подтверждение этой мысли - появление работ, обращающих внимание на неучитывавшиеся ранее факторы минералообразования. Например, совершенно исключительным оказалось влияние ударных волн на минералообразование (импактное). Оно выразилось в возникновении сверхплотных модификаций кремнезема (коэзита и стишовита), железа (эпсилон-железо), гексагональной модификации углерода и других минералов, в формировании особых минеральных ассоциаций и своеобразных деформационных структур минеральных индивидов. В этой связи минералам следует обратить внимание на влияние ударных и других волн более низких энергий на минералы, перейти от космических усло-

вий к условиям земным. Очевидно, что изменения минералов вызывают и сейсмические волны, генерируемые землетрясениями. Возможно, ими стимулируется механическая диффузия — из минеральных зерен "выжимаются" особо подвижные примеси, вовлекаемые затем в "газовое дыхание" сейсмически активных зон. Практически неисследованной областью является влияние космического излучения на ход земного минералообразования. А ведь минералы, особенно осадочного чехла, пропускали через себя потоки космической энергии несравнимо более длительное время, чем биологические виды. Они накопили огромную информацию о космическом влиянии, прочесть которую весьма заманчиво. Интересные перспективы в этом направлении исследований открывают работы А.Г.Жабина [103].

Новые данные показывают, что мы недооценивали влияние гравитации на процессы минералообразования [314]. Внимание минералогов привлекало главным образом влияние силы тяжести на рост и форму минеральных индивидов и агрегатов и возможность их использования в качестве минералогических отвесов и уровней (см. Приложение, рис. X, XI, XXXV-XLIV). Совершенно удивительные результаты о влиянии силы тяжести на рост кристаллов показали эксперименты, проведенные на борту советских и американских космических станций [311, 312]. В условиях близнулевой гравитации массоперенос осуществляется значительно энергичнее, чем в тех же условиях на Земле, выросшие кристаллы характеризуются высокой степенью совершенства, бездефектностью, форма их почти идеально совпадает с теоретической, рассчитанной по структурным данным. Отсюда следует, что можно надеяться на получение информации, "заложенной" в минералах, не только о направлении, но и о значении силы тяжести в геологическом прошлом, так как сила тяжести влияет не только на физическую, но и на химическую сторону минералогенезиса.

Еще в прошлом веке П.А.Земятченским и другими исследователями высказывалась мысль о расслоении под действием силы тяжести не только фазово-гетерогенных, но и истинных растворов. Новые экспериментальные данные полностью подтвердили идею расслоения, более того, характер изменения концентрации

раствора по вертикали удается наблюдать непосредственно на интерферограммах, полученных голографическим методом [4, 176, 177, 207]. Изменение свойств раствора по вертикали иллюстрируют эксперименты И.Г.Ганеева [37]. В изотермических и изодинамических условиях только под действием силы тяжести происходит дифференциация с образованием сверху относительно кислого, а внизу относительно щелочного раствора. Очевидно, гравитационная дифференциация растворов — серьезный минералогенетический фактор [5]. Наряду с гравитационным стоковским установлено кристаллогенетическое расслоение раствора, происходящее только в присутствии растущего или растворяющегося кристалла и связанное с этими процессами [177].

О большом значении биогенных факторов в минералообразовании свидетельствуют такие примеры. Процесс восстановления сульфатов до сероводорода, протекающий в различных геологических условиях при нормальных температуре и давлении в результате жизнедеятельности сульфатредуцирующих бактерий, в абиогенном варианте мог бы развиваться только при температуре в несколько сотен градусов. Таковы затраты энергии, источником которой в данном случае является деятельность микроорганизмов. С помощью серовосстанавливающих бактерий в нормальных термодинамических условиях удалось получить высокотемпературную модификацию ZnS — вюртцит [303]. Биогенное минералообразование считается широко распространенным явлением (см., например, [144, 294, 310 и др.]). Многие карбонаты, минералы фосфоритов, серу, экзогенные сульфиды, селитру и другие минералы мы считаем биогенными. Участие организмов в процессах пороодо- и минералообразования изучается широко, появились и обобщающие монографии [124, 144, 227]. Но исследуется главным образом геохимическая, а не минералогическая сторона этих процессов. Задача состоит в том, чтобы обратить внимание на минералогические следствия биологических процессов, на механизм формирования при участии организмов кристаллической структуры минералов, на формирование минерала не только как химического соединения, но и как физического тела. В мире микроорганизмов в общих чертах известны три механизма образования минеральной фазы [276]: первый — накопление минераль-

ного вещества внутри клетки вплоть до ее полной минерализации; второй — выделение минерального вещества клетками бактерий в среду в виде мельчайших кристалликов и стяжений, подвергающихся в дальнейшем собирательной перекристаллизации (так продуцируют серу тионовокислые бактерии [124]); третий — образование зародыша минерала происходит вне клетки организма в результате взаимодействия между выделенными клеткой химическими соединениями и компонентами окружающей среды. Интересные работы по прикладной биоминералогии ведутся Л.К.Яхонтовой с сотрудниками [290, 291].

Назрела необходимость усиления и координации изучения факторов минералообразования, создания биоминералогии. Последнее диктуется не только логикой развития минералогической науки, но и запросами биометаллургии, интенсивно развивающегося сейчас нового технологического направления.

В комплексе экологических проблем важной остается проблема воды — главного компонента минералогенетических систем. Экспериментальные и теоретические данные [16] свидетельствуют о том, что структура и свойства воды резко меняются с изменением термодинамических условий; эти изменения должны находить отражение в свойствах сформированных на водной основе растворов. Пока только сделаны первые шаги [166] на пути к интерпретации закономерностей гидротермального минералообразования на основе представлений о полиморфизме воды и ее "особых точках", в которых скачкообразно меняется структура. Ревизия фазовой диаграммы H_2O в широком диапазоне температур и давлений показала [22], что нет резких границ между полями надкритического газового (флюидного) и жидкого, жидкого и газового состояний H_2O .

Роль коллоидов в процессах минералообразования оценивается по-разному. В частности, индивидуиды и агрегаты со сферической поверхностью считались метакolloидными. По данным Д.П.Григорьева [59], Ю.М.Дымкова [88] и В.И.Степанова [229], такие образования могут не быть коллоидами и формироваться из ионных растворов. Исследования последних лет показали возможность роста монокристаллов и кристаллических агрегатов в коллоидных растворах в результате взаимориентированной агрегации частиц коллоидной фазы [79, 275 и др.]. На более высоком

уровне возрождается теория Федорова — Траубе — Баларева, открывая новый путь для познания кристаллизационной эволюции коллоидных систем, устанавливается особая роль гелей как среды кристаллообразования [39]. На месторождениях обнаружены разнообразные минералы коллоидного происхождения. Особенно большой материал получен по аллофанам и аллофаноидам. На хр.Пай-Хой, островах Вайгач и Новая Земля мы столкнулись с фактом интенсивной миграции фосфатов в виде гелей кремнеалюмофосфатно-сульфатного состава. Исключительно интересный материал о коллоидах дают исследования современного гидротермального минералообразования, особенно работы Л.М.Лебедева [157]. И тем не менее мы должны констатировать, что в настоящее время не располагаем системой обоснованных признаков коллоидного происхождения минералов и об их коллоидности судим косвенным образом. Для решения проблемы минералообразующих коллоидов необходимо существенно усилить исследования современных коллоидных систем, проследить их природную эволюцию, провести эксперименты по трансформации природных систем, используя в этих исследованиях современные физико-химические методы.

В своей знаменитой статье "Задачи минералогии в нашей стране" В.И.Вернадский заострил внимание на том, что на данном этапе "...вырисовывается новый неожиданный облик минералогии — облик пространственной химии планеты... Явления идут в пространстве, подчиненном симметрии, в геометрическом пространстве - векториальном, т.е. в таком, в котором приходится считаться не только со временем, но и с направлением" [25, с.24].

Проблема пространственной структуры минералообразующих систем и ее влияния на форму, распределение, строение минеральных индивидов, на структуру минеральных тел по-прежнему остается актуальной. Здесь, правда, есть существенный прогресс, связанный с внедрением И.И.Шафрановским в минера-

логическую теорию принципа симметрии Кюри. Сейчас задача состоит в том, чтобы, во-первых, расширить использование этого принципа на всю область минералообразования, а не только объяснять причины образования плоскогранных индивидов (перейти от минералогической кристаллографии к минералогии в целом); во-вторых, не только учитывать воздействие среды на минерал, но и основываться на их взаимодействии, принимать во внимание обратные связи; в-третьих, перейти к динамической симметрии минералогенетических систем [261]. В решении рассматриваемой проблемы важны исследования по градиентам параметров систем. Именно в градиентных полях (термо-, динамо-, хемо-, ОКВП-градиентных) наиболее интенсивно и разнообразно развиваются минералогенетические процессы. Очевидно, можно говорить даже о хроноградиенте, имея в виду промежутки времени, в которых минералогенетическая система находится в наиболее активном состоянии.

Голографический контроль процессов роста кристаллов показывает, что растущий кристалл глубоко перестраивает структуру раствора не только в дворике кристаллизации, но практически во всем объеме кристаллизатора. На интерферограммах помимо привычных конвекционных или концентрационных потоков видно и резкое расслоение раствора, которого нет, когда нет растущего кристалла. Интересные данные о реакции минералов на нагревание, вызывающее перестройку электрических и электромагнитных полей, получил В.Н.Сальников [215]. Ю.М.Дымков [87] систематизировал сведения о воздействии минерала на окружающие его минералы.

Приведенные данные отражают лишь некоторые стороны влияния минерала на окружающее его физическое пространство. Всего комплекса взаимодействий, их зависимости от природы и параметров минералогенетических систем, их механизма мы не знаем. Необходимы дальнейшие исследования и обобщения.

ИСТОРИЧЕСКАЯ МИНЕРАЛОГИЯ

Предмет исторической минералогии — история развития минералов и ее связь с геологической историей Земли. Необходимо установить, чем отличается минеральный мир одних геологических эпох от такового

других, как он менялся в геологической истории нашей планеты. Историческая минералогия - наиболее фактоемкое направление генетической минералогии. Его главный стержень - геологическое время.

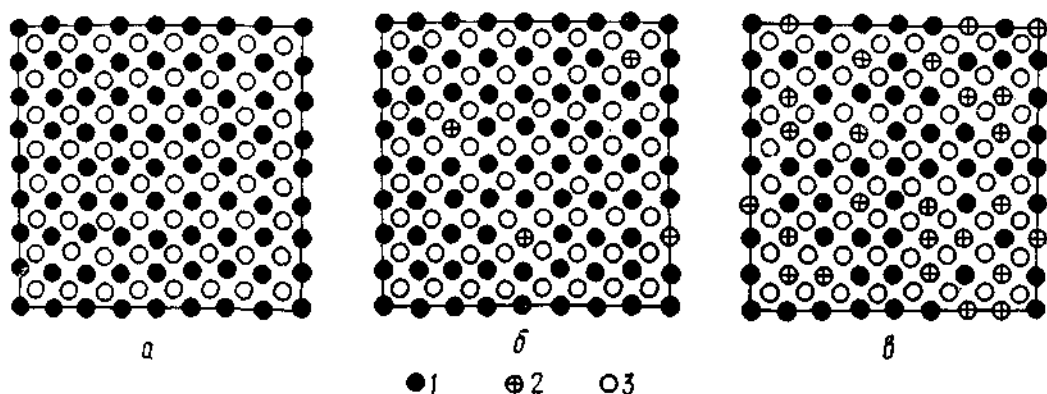


Рис. 2. Структура уранинита (UO_2) разного возраста (по А.И.Тугаринову [232]).
Уранинит: а - современный; б - возрастом 300 млн лет; в - 2000 млн лет. Ион: 1 - урана (U^{4+}); 2 - радиогенного свинца, возникающего вместо распавшегося иона урана (Pb^{2+}); 3 - кислорода

Таблица 3. Геохронологическая шкала и основные черты геологической эволюции Земли в докембрии (по [232])

Докембрий	Тектоно-магматическая эпоха (млн лет)	Осадкообразование и изменение содержания кислорода	Магматизм	Тектоника
Поздний	Катангинская (620)	25 % O_2	Интрузивные явления вдоль узких складчатых поясов либо образование локальных плутонов в краевых зонах платформ	Образование узких складчатых поясов, неравномерно развивающихся на разных континентах
	Гренвиллская (1000)	Возрастающая роль Сорг и карбонатов с постоянно уменьшающимся отношением Mg/Ca		
	Медвежьеозерная (1400)	Появление первых строматолитов (синезеленых водорослей)		
Средний	Беломорская (1900)	Появление первых карбонатных пород и первых сульфатов Массовое накопление железистых кварцитов и сланцев	Появление первых щелочных интрузий Широкое развитие гранитов Максимум магматической деятельности в истории Земли	Образование крупных платформ Складчатость на значительных площадях всех континентов
	Мелтоунайфская (2300)			
	Родезийская (2700)			
Ранний	Кольская (3100)	Массовое развитие конгломератов, гравеллитов. Первое появление биогенных осадков Появление жизни ≈ 0 % O_2 Преимущественно эффузивы и туфы основного состава, граувакки	Метасоматические граниты Мигматиты Плагิโอграниты	Зарождение ядер шитов
	Белозерская (3500)			

Примечание. Штриховкой в колонке "Осадкообразование..." показано изменение концентрации свободного кислорода в атмосфере, в колонке "Магматизм" - развитие магматизма, в колонке "Тектоника" - рост платформ

Таблица 4. Зависимость минерального состава продуктов выветривания гранитоидов от состава атмосферы (по [302])

Геологическое время	Состав атмосферы		Условия выветривания	Минеральный состав продуктов выветривания гранитоидов
	Преобладающие газы	Второстепенные газы		
Девон – кайнозой	N_2, O_2	CO_2	Кислые, окислительные	Гидрослюда, каолинит, хлорит
Средний протерозой – силур	N_2, CO_2, O_2	NH_3	Переходные	Монтмориллонит, гидрослюда, каолинит
Архей – ранний протерозой	CO_2, NH_3	N_2, CH_4, O_2	Преимущественно щелочные, восстановительные	Монтмориллонит с небольшим количеством каолинита в нижних частях разреза

Есть принципиальные трудности нанизывания минералогенетических событий на этот стержень. Историческая минералогия отстает от исторической геохимии, которая развивается более успешно [174, 216, 217].

Ныне минералогия располагает фактическим материалом, достаточным, чтобы создать лишь самую общую историческую схему [105] или чтобы наметить главные этапы минерального видообразования, опираясь также и на достижения смежных наук [84, 232, 233 и др.].

В исторической минералогии можно наметить три главных аспекта.

1. Изучение процессов естественного "старения" минералов, не зависящих или мало зависящих от изменения внешних условий, а также минералов, "стареющих" под влиянием постоянно действующих факторов. Имеются в виду радиолиз естественно радиоактивных калиевых, урановых, ториевых, рубидиевых и других минералов и накопление в них продуктов радиоактивного распада, изменение структуры и анатомии минералов в результате радиогенных процессов, действие радиоактивного излучения на минералы и т.д. Для иллюстрации приводим заимствованную у А.И.Тугаринова [232] схему (рис. 2) кристаллической структуры трех разновозрастных образцов уранинита: современного, с возрастом 300 и 2000 млн лет. Образцы старого уранинита насыщены атомами радиогенного свинца (Pb^{2+}), занявшими мес-

та распавшихся атомов урана (U^{4+}). Обстоятельный анализ этой проблемы дан в обзоре Ф.В.Чухрова [253].

2. Изучение конституции, свойств и ассоциаций минералов в различных геологических системах с точной геоисторической привязкой (например, в разновозрастных магматических породах и осадочных комплексах, в разных типах рудных месторождений и т.д.). Разработка этого направления дает возможность проследить историю минерального мира, опираясь на сравнительно-исторический метод.

3. Анализ минералогенетических следствий изменения условий минералообразования, связанных с геологической эволюцией Земли. Сейчас мы знаем в главных чертах эволюцию структуры Земли и земной коры, магматизма, осадкообразования, атмосферы и гидросферы, органического мира, т.е. почти всех основных минералогенетических систем (табл. 3). Опираясь на такие сведения, мы можем предсказать общий характер изменения минерального мира в истории Земли. Собственно, такие работы, уже есть. Например, Ю.П.Казанский [302] дал интересный прогноз продуктов выветривания гранитоидов в разные эпохи на основании изменения состава атмосферы и вытекающих из них условий выветривания (табл. 4).

Предполагается, что синтез данных по трем указанным аспектам составит общую структуру исторической минералогии.

ЭВОЛЮЦИОННАЯ МИНЕРАЛОГИЯ

Это самое молодое направление генетической минералогии, сформировавшееся за три последних десятилетия благодаря трудам Д.П.Григорьева, Г.Г.Леммлейна, И.И.Шафрановского, Г.Н.Вертуш-

кова. А.Г.Жабина и др. Его главная задача — раскрытие закономерностей развития минерального мира.

В эволюции минерального мира выделяются две линии - онтогенез и филогене-

нез, которые и составляют основу современной эволюционной минералогии [64, 76].

Необходимо сказать несколько слов о соотношении онтогении и типоморфизма минералов. Оба учения по своей сущности генетические, но в соответствии с их спецификой и тематической направленностью раскрывают различные стороны генезиса минералов, хотя объекты исследования у них одни и те же. Основываясь на расширенном представлении о генезисе минералов, выяснение их происхождения и развития (зарождение, рост и изменение минералов вплоть до исчезновения) относим к задачам онтогении минералов и ее методов, а выяснение условий (геологический процесс, температура кристаллизации и преобразования, давление, состав, Eh и pH среды и т.д.), при которых осуществлялись эти явления, — к задачам учения о типоморфизме минералов. Другими словами, учение об онтогении минералов отвечает на вопрос, как образовался минерал, а учение о типоморфизме минералов — в каких условиях и что было движущей силой этого явления.

При изучении типоморфизма минералов целесообразно учитывать достижения онтогении минералов, поскольку важны не сами по себе типоморфные признаки как некая статичная сумма информации, а важна система взаимосвязанных типоморфных признаков, дифференцированная в соответствии с "жизнью" минеральных индивидов. Такой подход — надежная основа для разработки высокоэффективных прикладных минералогических критериев.

Филогения минералов в отличие от онтогении практически не разработана и существует, по сути, только в программном виде. Разработка этого учения об эволюции минеральных видов сдерживается отсутствием четкой системы знания о минеральных видах [274], без которой нельзя проследить эволюцию их границ, уловить закономерности смены одних видов другими, а также отсутствием исторической минералогии как фактографической основы минералогии эволюционной. Очевидно, разработка филогении минералов — дело не очень близкого будущего. В этой ситуации особенно важны публикации А.Г.Жабина [105, 108] об общих законах эволюции видообразования на Земле, открывающие путь для широких филогенетических построений.

В результате онтогенетических и филогенетических исследований, наряду с выяв-

лением закономерностей развития конкретных геологических объектов, установлены следующие общие эволюционные закономерности.

Первая закономерность — усложнение структуры минерального мира, увеличение его разнообразия с течением геологического времени. Она выражается в различных конкретных явлениях, среди которых: ускорение темпов всех минералогических процессов; усложнение более поздних минеральных ассоциаций по сравнению с предшествующими; увеличение числа минералов, создаваемых более поздними процессами; увеличение роли наложенных процессов; накопление искажений в процессе роста и увеличения размеров минеральных индивидов; снижение симметрии минералогических объектов (как структурной, так и минералогической) на фоне сохраняющейся симметрии Земли.

Вторая закономерность — пульсационность минералогенетических явлений — носит в общем периодический и даже ритмический характер, при общей направленности накапливающихся изменений.

Анализ закономерностей позволяет предположить, что главная движущая сила эволюции минерального мира имеет энергетическую природу. Это стремление развивающихся минеральных систем к равновесному состоянию в условиях закономерно непрерывной потери тепла. Потеря тепла Землей происходит постепенно и в больших количествах: за $4,5$ млрд лет Земля потеряла около $7,1 \cdot 10^{29} \cdot 4,186$ Дж. Это мощный фактор изменения структуры планеты. Уменьшается общая энергия всей геологической системы, а изменение энергетических параметров минерального мира влечет за собой эволюцию и вещества, его слагающего, и структуры, в которую минеральное вещество организовано.

Потеря тепла литосферой идет с земной поверхности, поэтому и эволюционные процессы наиболее интенсивно и энергично протекают у поверхности геоида [212]. Сфера рудообразования по этой же причине занимает верхнюю часть литосферы выше изограны $600-700$ °C [210, 211]. Пульсационность минералогенетических процессов является следствием пульсационного "дыхания" Космоса и автоколебаний самих минералообразующих систем, а переходы с эволюционного на революционный путь развития — энергетических "скачков" в земной коре.

Основные минералообразующие процес-

сы протекают вблизи поверхности геоида в условиях направленного оттока тепла. Здесь формируются минералы и минеральные комплексы, направленность изменения которых является следствием снижения энергосодержания, - это прямая эволюционная тенденция. Если в каком-то участке Земли по ослабленным зонам произошел прорыв глубинного тепла и вещества, то минералообразование (в условиях притока энергии) развивается уже по обратной схеме. Этот путь приводит к формированию весьма важных минеральных комплексов, создающих минеральный облик литосферы, в том числе и месторождения полезных ископаемых. Затем поток энергии к веществу начнет ослабевать, минералообразование будет развиваться в условиях отступающего теплового фронта, опять станет реализовываться прямая эволюционная схема.

Важное достижение эволюционной минералогии — разработка понятий об эволюционных рядах минералов и эволюционной минералогической зональности. Эволюционный ряд минералов - это последовательность направленного изменения какой-то определенной характеристики минерала или совокупности характеристик в минералообразующем процессе.

Серьезную сложность в выявлении эволюционных рядов представляет учет революционных событий, прерывающих ряды или приводящих к повторению некоторых их отрезков. В связи с этим приобретают значение эволюционно-революционные модели развития минеральных месторождений, разрабатываемые сейчас В.А. Поповым [187], С.К. Кузнецовым и П.П. Юхановым [146].

Поскольку любой эволюционный ряд развивается направленно во времени, он будет развиваться строго направленно и в пространстве, выражаясь в виде пространственной эволюционной зональности. Такая зональность выявляется почти на всех месторождениях. Большой материал накоплен по кристалломорфологической эволюции минералов и кристалломорфологической зональности.

На основе анализа зональности разрабатываются поисковые и оценочные методы (среди которых отметим кристалломорфологический поисковый метод Н.З. Евзиковой [96, 97]). При этом необходимо учитывать широко развитые в природе явления прямой и обратной зональности, интерференции зон [223].

Главные задачи исследований в области эволюционной минералогии.

1. Критический анализ и обобщение всех данных по эволюции минералов (как современных, так и из наследия прошлого), создание современной концепции эволюции минерального мира.

2. Более энергичная разработка ключевых эволюционных проблем — наследственности, синэволюции (т.е. коллективного развития кристаллов одного и того же минерального вида, разных видов, эволюция парагенезисов, ассоциаций, комплексов), роли геологического пространства в эволюции и др.

3. Разработка новых эффективных методов анализа эволюции минералогических объектов, разработка и совершенствование минералогических методов поисков и оценки минеральных месторождений, основанных на критериях развития минералов, минеральных парагенезисов и комплексов.

В развитии минерального мира, как, впрочем, и любой другой естественной системы, органически объединяются две противоположные тенденции: а) появление и накопление принципиально нового в составе и структуре объектов в результате действия внешних эволюционных факторов; б) сохранение и использование в новых структурных постройках старого, первичного, в результате действия внутренних механизмов наследственности. Первая, эволюционная, тенденция находит отражение в минералогических построениях [282, 287], роль же второй, наследственной, тенденции недооценивается или игнорируется. Не существует даже общей научной концепции наследования в минералогенезе, на что уже обращалось внимание [279, 280, 282, 287]. Явление передачи определенных качеств от "минералов-предков" к "минералам-потомкам" или от ранних минеральных ассоциаций и комплексов к поздним, чем-то похожее на явление наследственности в органическом мире, давно обращало на себя внимание кристаллогенетиков и минералогов [24, 49, 143, 156, 203, 243, 248, 299], которые ввели в теоретический аппарат кристалломорфологии и минералогии различные термины: наследование, унаследованность, преемственность, заимствование и т.д.

В цепи последовательной смены поколений (зарождений) минералов каждое последующее поколение (зарождение) наследует определенные признаки минералов предыдущего поколения — в этом заклю-

чается смысл принципа наследования в минералогенезисе.

Анализ обширных данных из области кристаллогенезиса и генетической минералогии со всей очевидностью убеждает, что наследственность — это универсальное свойство кристаллических, в том числе минеральных систем, и явление наследования характерно в той или иной степени для всех минералогенетических процессов. Наследование в минеральном мире проявляется на всех структурных уровнях — от отдельного минерального индивида, даже от отдельных конституционных или анатомических элементов до минеральных агрегатов, парагенезисов, ассоциаций, комплексов. Особенно явно оно реализуется на уровне минеральных индивидов — кристаллов и зерен. Растущий кристалл можно всегда рассматривать как новообразованный по отношению к какому-то ранее существовавшему (или продолжающему существовать) исходным кристаллам, к его кристаллическим "предкам" (см. Приложение, рис. IX—XI, LX). Новообразованный кристалл, несомненно, заимствует конституционные или другие особенности исходных кристаллов, причем полнота преемственности зависит от степени родства кристаллических "предков" и "потомков", от длительности и сложности тех процессов, которые определяют их существование во времени и пространстве. Роль этого явления в кристаллогенезисе иногда настолько велика, что оно в значительной степени определяет природу важнейших полезных качеств кристаллов. Например, оптические свойства кристаллов CaF_2 , выращенных стокбаргеровским методом, непосредственным образом зависят

от состава и свойств исходной флюоритовой шихты [286].

Яркий пример наследования в минералогии представляют собой многообразные псевдоморфозы (см. Приложение, рис. II—IV) — минеральные индивиды и агрегаты, сохраняющие форму, а иногда и структуру более ранних минералов [64, 112, 307]. Учебным примером конституционно-родственных отношений, по крайней мере в пяти минеральных поколениях, является классическая "вилка Боуэна". Изменения любого признака минералов как в лейкократовом, так и в меланократовом ряду "вилки Боуэна" вполне закономерны [11, 53, 159]. Аналогичные ряды наследования конституции известны для сульфидов меди и железа, арсенидов кобальта и никеля, фосфатов железа и марганца, титанониибобцирконосиликатов, ниоботанталатов [289].

Во избежание неясности в терминологии приведем определения понятий наследственности и наследования в нашем понимании.

Наследственность — свойство новообразованных минеральных индивидов быть в чем-то похожими на генетически связанные с ними предшествующие минералы, т.е. свойство "минералов-потомков" быть похожими на "минералы-предки".

Наследование — приобретение новообразованным минеральным индивидом некоторых специфических качеств, характерных для более ранних кристаллов, находящихся с новообразованными кристаллами в прямых или косвенных генетических связях независимо от механизмов действия этих связей и от способов передачи наследственной информации.

ГЕОГЕНЕТИЧЕСКАЯ МИНЕРАЛОГИЯ

Геогенетическое (или динамическое) направление призвано выявлять связь минералообразования с геологическими факторами. Его современное состояние отражают работы Е.К.Лазаренко [148] и В.Ф.Барабанова [7], хотя методический подход в них различен. Е.К.Лазаренко выражает минералогическое содержание различных типов геологических процессов через формирующиеся в результате их развития минеральные ассоциации и уже на основе их анализа раскрывает особенности процессов. В.Ф.Барабанов, наоборот, основное внимание сосредоточивает на комплексном

анализе геологических и физико-химических процессов, формирующих тот или иной генетический тип минеральных месторождений и, уже как следствие этих процессов, раскрывает механизм образования минеральных ассоциаций. Эти два подхода характерны и для всего геогенетического направления в целом. Оба они правомерны, должны применяться в органическом единстве, но ведущим, несомненно, должен быть "минералогический" подход, так как именно минералы — наиболее объективные носители информации о геологических процессах.

Важнейшая проблема рассматриваемого направления — наследование процессов, в современном минералообразовании, процессов всех типов -- от вулканических до гипергенных [158, 162]. К этим исследованиям необходимо привлечь широкий круг специалистов, использовать весь арсенал современных методов. На наиболее важных объектах необходимо организовать постоянно действующие стационарные наблюдения. Необходимость серьезного изучения современных процессов диктуется опасностью кризиса генетических идей, в котором мы рискуем оказаться, особенно сейчас, в условиях лавинообразного накопления фактического материала. Для генетических интерпретаций есть только две опоры: модельный эксперимент и природные модели [278]. Эксперимент страдает мелкомасштабностью, и критерии подобия с природой здесь трудно выдерживать. Природные модели более надежны, а в сочетании с экспериментом они составят прочнейший фундамент минералогенетических теорий.

Минералоги получают много справедливых нареканий по поводу отставания в изучении минералогии осадочных комплексов, хотя практическая геология имеет дело

главным образом с осадочными породами, слагающими 75 % территории страны и содержащими от 75 до 100 % разведанных запасов главнейших полезных ископаемых. В области изучения осадочного минералообразования можно выделить работу А.В.Сидоренко и Е.К.Лазаренко [222].

Суть геогенетического направления минералогии состоит в изучении генезиса закономерных минеральных ассоциаций горных пород и руд. Значительным достижением этого направления стало бы создание полного кадастра-справочника минеральных ассоциаций.

В геогенетическом направлении конкретное геологическое пространство рассматривается как один из ведущих факторов генезиса минералов. Этим определяется органическая связь геогенетической минералогии и топоминералогии [278, 281]. Выяснение закономерностей пространственного распределения минералов и минеральных комплексов, раскрытие факторов пространственного контроля, установление минералогической зональности провинций и целый ряд других проблем решаются данными направлениями совместно. Наиболее сильным инструментом изучения пространственных закономерностей является минералогическое картирование.

МЕТОДЫ ГЕНЕТИЧЕСКОЙ МИНЕРАЛОГИИ

Генетические исследования в минералогии характеризуются широким разнообразием решаемых задач и разнообразием методических подходов, отражающих сложную структуру самой генетической минералогии. Однако если в настоящее время просматривается единая система теории генетической минералогии, пусть еще не очень четкая и общепризнанная, то единой методической системы не существует. Не было даже серьезных попыток ее создания ни на основе анализа теоретического знания, ни на основе синтеза существующих методических подходов. В этом можно убедиться, просматривая фундаментальные труды по генетической минералогии, в которых нашло отражение общее состояние генетической минералогии на отдельных этапах ее развития. Это монографии Н.М.Федоровского [235], Е.К.Лазаренко [148, 150], В.Ф.Барабанова [9] с одинаковыми или почти одинаковыми названиями "Генетическая минералогия". В каждой из них во введении или в специальных главах

даются те или иные сведения о методах минералогенетических исследований.

Н.М.Федоровский [235, 236] в качестве основных методов генетической минералогии называет анализ минеральных парагенезисов и искусственное получение минералов (в современной терминологии -- минералогенетический эксперимент). Особенно большая роль отводится парагенетическому анализу, который, по оценке Н.М.Федоровского, позволяет установить общие условия минералообразования, последовательность кристаллизации, развитие геохимического процесса.

Е.К.Лазаренко [148, 150] в качестве методических основ генетической минералогии рассматривает типоморфизм минералов.

В.Ф.Барабанов [9] главными методами генетической минералогии считает термодинамический — оценка возможности протекания процессов минералообразования, а также методы, позволяющие оценивать положение и динамику атомов и ионов в ми-

нералах, т.е. методы изучения самих минералов (но среди множества последних ограничивается почему-то рассмотрением лишь ИК-спектроскопии).

Отсутствие методических обобщений, работ общего теоретико-методического содержания, а также единой методической системы не означает, конечно, что генетическая минералогия не располагает своими специальными методами. Никакой науки не может быть без методической основы.

Методический аппарат генетической минералогии на современном этапе представляет собой стихийную систему методических подходов, приемов, правил, которые традиционно именуются "анализами". Среди них можно назвать:

- парагенетический анализ в его различных вариантах;

- кристаллогенетический, морфогенетический и подобные анализы;

- энергетический, термодинамический, физико-химический анализы;

- типоморфный анализ;

- методы минералогической термометрии и барометрии (в том числе термобарогеохимия);

- экспериментальное моделирование минералообразующих процессов, теоретическое моделирование и др.

Методология генетических исследований в науках геологического цикла укладывается в русле двух главных методических подходов:

- а) метод моделей, смысл которого состоит в генетической интерпретации установленных фактов путем их сравнения с явлениями и объектами известной природы и с генетическими моделями;

- б) сравнительно-исторический метод, позволяющий восстанавливать ход развития событий на основе выявления пространственно-временной последовательности формирования объектов исследования и их сравнительного анализа.

В каждом из перечисленных выше методов генетической минералогии есть элементы обоих методических подходов, но ведущим является модельный подход. Главный и пока единственный метод сравнительно-исторического направления — это онтогенетический метод (см. гл. II).

Проблема расшифровки генетической информации, "содержащейся" в минералах, положила начало развитию нового направления — генетико-информационной минералогии [277, 278]. Это учение о минералах как потенциальных носителях генетической

информации, закодированной в их составе, структуре, свойствах. Оно должно заложить теоретическую основу для методов расшифровки генетической информации. Основные задачи учения: а) изучение процессов записи, хранения и преобразования минералогенетической информации в ходе развития минеральных систем; б) разработка надежных методов ее расшифровки; в) использование генетической информации в познании генезиса и истории развития минералогических объектов, в практике поисков месторождений полезных ископаемых.

Минерал можно рассматривать как своего рода приемник информации, связанный с минералогенетической средой (с источником информации) системой входных и выходных функциональных каналов (прямых и обратных функциональных связей), по которым в процессе онтогенеза минерала осуществляется взаимообмен веществом-энергетическими сигналами. Каждый импульс вещества и энергии, воспринятый минералом, создает неопределенность в каком-то элементе структуры, т.е. вносит в минерал новую информацию из среды. Информация, приобретаемая минералом посредством химических, физических и других сигналов, закрепляется в виде компонентов структуры минерала — в его конституционных особенностях и связанных с ними свойствах.

Методические подходы к расшифровке генетической информации довольно разнообразны и зависят от цели исследования и уровня изученности объекта. Их можно объединить в два генеральных подхода — обобщенный и параметрический.

Обобщенный подход к расшифровке генетической информации, "содержащейся" в минералах, — это рассмотрение взаимосвязи минерала и среды как суммарной, вероятностно-статистической. Ведущим методом этого направления является типоморфный анализ, базирующийся на учении о типоморфизме минералов, т.е. их способности отражать условия минералообразования в своей конституции и свойствах.

При параметрическом подходе определяют конкретные параметры минералогенетической среды. Такой подход реализуется, например, в генетико-информационном анализе, базирующемся на гомоморфизме минералов, т.е. на наличии простых, строго функциональных динамических зависимостей: свойство минера-

ла — состояние среды. Примером такой зависимости могут служить распределение примеси между кристаллом и раствором (расплавом), известная функциональная зависимость температуры гомогенизации первичных газовой-жидких включений от температуры кристаллизации кристалла-хозяина, зависимости скоростей роста различных граней кристаллов от пересыщения и др.

Известно, что не все качества минералов одинаково чувствительны к изменениям параметров среды, поэтому для характеристики индикаторных (типоморфных) признаков предлагаются три показателя реакции: норма, чувствительность и емкость [278],

Задачей минералогенетических реконструкций является не только и не столько определение параметров минералогенетической среды в отдельные моменты истории минералов, о чем преимущественно шла речь до сих пор, сколько восстановление максимально полной последовательности всех событий, определяющих историю минералов и их сообществ на месторождении, воссоздание полной генетической картины месторождения. В решении этой задачи выделяются две последовательные стадии: 1) восстановление результатов минералогических процессов, например, последовательности кристаллизации минералов на месторождении; 2) восстановление самих процессов в последовательности всех составляющих их явлений.

На сложном и долгом пути минералогенетической информации от источника информации — минералообразующего процесса, удаленного от исследователя на многие миллионы лет, через минерал как носитель информации, через систему считывания и декодирования — до адреса (минералога) возникает большое количество самых разнообразных помех (шумов), существенно искажающих, а иногда и полностью заглушающих исходные моменты. Генезис минерала с точки зрения кибернетики является, следовательно, информационным процессом с шумом в каналах связи.

Общим методическим принципом расшифровки первичной минералогенетической информации в присутствии шума может служить принцип получения избыточной информации. На этом принципе основан целый ряд наиболее универсальных методов выделения первичной информации, главный из которых — метод на-

копления. Он заключается в многократном повторении одного и того же сигнала, т.е. в многократном повторении измерений (например, исследование одного и того же свойства, рассматриваемого как носитель информации, на большом количестве индивидов и т.д.). Смысл повторений опирается на случайный характер шума по отношению к информации. Если сложить (накопить) n независимых отсчетов (измерений) сигнала с помехой либо последовательно во времени в одном канале, либо одновременно в нескольких дублирующих друг друга каналах, то сумма сигналов увеличится в n раз, а сумма помех будет стремиться к нулю при увеличении n , так как среднее значение шума равно нулю. При повторении полезный сигнал будет увеличиваться, а помехи — гасить друг друга. Таким образом, отношение сигнал — шум с увеличением количества отсчетов увеличивается, если эти отсчеты независимы, т.е. если помехи в них не коррелируют. Метод накопления широко применяется во всех видах минералогенетических исследований.

Структура минерала, как мы неоднократно указывали, инерционно сопротивляется стиранию информации, и информация обычно не теряется полностью. На этом свойстве основан еще один метод — метод возбуждения минеральной памяти. Он заключается в восстановлении первичного структурного состояния минерала с помощью соответствующим образом организованного энергетического воздействия. Так, наложенная радиационная окраска кварца может быть снята гидротермальной обработкой. Первичный характер термолюминесценции того же кварца или кальцита, испытывавших термальный метаморфизм, может быть восстановлен гамма-облучением, возбуждающим погашенные метаморфизмом центры свечения. Радиационным облучением, структурным травлением, рентгенопогографией, катодолюминесценцией можно выявить исчезнувшую картину зональности.

Потеря минералогенетической информации связана с определенными физико-химическими процессами, протекающими по определенным законам. Зная характер последних и имея данные для количественного их описания, мы, очевидно, можем проследить процесс в ретроспективе и установить первичную структуру минералогенетической информации. Такой метод можно назвать кинетическим.

Он заключается в "обратной развертке" кинетики процесса вытеснения информации шумом. Особенно продуктивно он реали-

зуется в геохронологии как метод изохрон. Детально познакомиться с ним можно в книге Ю.Д.Пушкарева [2051].

ЭКСПЕРИМЕНТ В ГЕНЕТИЧЕСКОЙ МИНЕРАЛОГИИ

Экспериментальными, как известно, называются такие методы эмпирического исследования, при которых исследователь активно воздействует на изучаемые объекты или процессы специальными средствами с целью получения необходимой информации об их свойствах и особенностях.

Задачи и функции эксперимента в минералогии весьма широки и разнообразны. В огромной литературе по экспериментальной минералогии, в обобщающих и программных работах В.С.Балицкого [6], А.С.Гинзберга [43, 44], Д.П.Григорьева [60], А.А.Годовикова и др. [51], Э.Н.Елисеева [98], В.А.Жарикова [117], Г.Б.Жилинского [118], И.П.Иванова [123], А.П.Касаткина и др. [135], И.А.Островского [171], Г.Л.Поспелова [199], В.С.Соболева и др. [226], Н.И.Хитарова [244], И.Я.Некрасова [164] к многим другим минералогам, в трудах совещаний по экспериментальной минералогии и петрографии, в ежегодных отчетах Геофизической лаборатории института Карнеги (г.Вашингтон) и в трудах других институтов и лабораторий отражена вся многогранная структура этого минералогического направления.

Классификация экспериментальных методов в минералогии. Исходя из решаемой задачи можно выделить следующие направления в экспериментальных исследованиях; диагностическое, классификационное, модельное и технологическое.

Диагностический эксперимент — испытание различных свойств минерала с целью его диагностики или определения качественных особенностей. Теория диагностики детально разобрана в фундаментальном труде В.Г.Фекличева [239].

Классификационный эксперимент — разделение минералов по их свойствам или конституционным особенностям на качественно однородные группы на основе испытания свойств. Этот тип экспериментальных исследований еще не очень популярен, но довольно перспективен. В качестве примера можно напомнить различные опыты по химическому травлению минералов и минеральных агрегатов; по

данным о составе и температурах плавления Р.Томпсоном разработана классификация лав [308].

Модельный эксперимент — создание материальной модели изучаемого минералогического объекта или явления и исследование ее структуры, свойств, особенностей функционирования в строго регулируемых условиях с целью использования полученных данных для объяснения физической или генетической природы моделируемого объекта. В соответствии с поставленной целью модельный эксперимент разделяется на: минералогенетический — моделирование минералогенетических процессов и объектный (лабораторный синтез минералов) -- получение искусственных аналогов минералов для исследования их конституции и свойств.

Технологический эксперимент — решение практических задач, связанных с использованием минералов в сфере человеческой деятельности.

Экспериментально проверяемые минералогические теории характеризуются разным уровнем их разработки. Наряду с глубоко разработанными теориями, которые необходимо только подтвердить определенными опытами, в минералогии существует огромное количество теоретических набросков, для которых эксперимент важен не столько, чтобы проверить их положения, сколько для поисков путей их развития. Исходя из этого, экспериментальные исследования можно разделить на четыре группы.

Первая группа — наиболее строго обоснованные эксперименты, которые можно назвать уточняющими. Они ставятся для перепроверки уже верифицированных экспериментально теорий, если возникли какие-то сомнения в надежности или точности предыдущих проверок, либо для уточнения более или менее очевидных теоретических положений.

Вторая группа — проверочные эксперименты, методически строго базирующиеся на проверяемой теории, дающей количественный или полуколичественный прогноз ожидаемых результатов. Это, например, исследования предварительно расчи-

танных физико-химических систем, выращивание кристаллов в гидротермальных условиях на основе известных РТХ-диаграмм, получение кристаллов с заранее заданными свойствами. Сюда же относятся и измерительные эксперименты, например изучение растворимости минералов.

Третья группа — поисковые эксперименты, основанные на относительно слабо разработанных теоретических положениях и ставящие задачу собрать эмпирическую информацию для совершенствования теории (исследование физико-химических систем, поведение которых невозможно прогнозировать, опыты по кристаллизации веществ с неизвестной растворимостью).

Четвертая группа — теоретически почти не обоснованные эксперименты, эвристические, которые проводятся по принципу "А что получится?". К ним относятся экспериментальные исследования поведения минералов в условиях сверхвысоких давлений, а также опыты по выращиванию кристаллов на борту космических станций, для которых никакая теория не предполагала сочетания исключительного совершенства кристаллов с очень высокой скоростью их роста [312]. Так же был установлен, например, эффект периодического погружения, характеризующийся резко ускоренным ростом кристалла, периодически погружающегося в раствор, по сравнению с кристаллами, все время находящимися в растворе [176].

Основные направления развития минералогенетического эксперимента. 1. Наиболее распространены топологические исследования физико-химических диаграмм состояния одно- и многокомпонентных систем в условиях, соответствующих или близких к условиям природного минералообразования. К настоящему времени экспериментально исследованы тысячи (большой частью закрытых) систем. Только в двух томах справочника "Минералы" (1974) собраны 2454 фазовые диаграммы, имеющие отношение к условиям минералообразования. Однако состояние экспериментальной изученности этой проблемы еще очень далеко от того, чтобы удовлетворить хотя бы основные запросы минералогов. Ограниченность минералогенетических приложений результатов связана, в первую очередь, с узостью условий проведения экспериментов и частой несопоставимостью их с геологическими условиями.

2. Экспериментальное исследование явлений, связанных с сокристаллизацией и со-

существованием различных минералов (распределение и перераспределение примесных компонентов между ними, равновесность, ионный и изотопный обмен, диффузионные процессы и т.д.), зависимость их от термодинамических условий. Эти данные прежде всего необходимы для установления надежных количественных индикаторов условий минералообразования.

3. Получение различных физико-химических констант минералов, необходимых для конструирования теоретических минералогенетических моделей, для планирования экспериментов и технологических разработок. В первую очередь это относится к растворимости минералов в различных РТХ-условиях, к комплексу термодинамических констант.

4. Изучение кинетики минералогенетических процессов, поскольку ход процесса во времени часто оказывается теоретически непредсказуемым. Например, на кривых растворимости часто фиксируются устойчивые максимумы или минимумы, пульсационно меняется скорость химических реакций и т.д. Без учета подобных кинетических аномалий нельзя построить удовлетворительную теоретическую модель процесса.

5. Исследование структуры, свойств и динамики растворов и расплавов как минералогенетической системы и минералогенетической среды, изучение условий их миграции, массо- и теплопереноса, различных эффектов, связанных с переносом вещества и энергии (диффузией, фильтрацией и др.).

6. Изучение взаимодействий между минералом (растущим или разрушающимся) и минералогенетической средой. В качестве примера укажем исследование взаимодействия между алмазом и нагретым кимберлитом [300], в результате которого раскрывается механизм коррозии алмаза и формирования вокруг кристаллов реакционных оторочек [288].

7. Исследование изменения конституции и свойств минералов с изменением внешних условий (в первую очередь, температуры, давления, химических особенностей среды) и исследование фазовых трансформаций при изменении параметров среды, особенно трансформаций при высоких температуре и давлении.

8. Те же исследования, но проводящиеся при сверхвысоких параметрах (давление 10^3 – 10^4 МПа, температура выше 1000°C), составляют самостоятельную эксперимен-

тельную область, поскольку существенно отличаются методической и, особенно, технологической постановкой экспериментов. Данные подобных исследований имеют исключительно большое значение для разработки минералогических моделей верхней мантии Земли (см., например, [313]).

9. Выявление функциональных зависимостей состава и свойств минералов от условий их роста с целью градуировки минералогических термометров и барометров, а также уточнения других минералогенетических индикаторов.

10. Выращивание кристаллов для исследования различных сторон механизма кристаллизации.

11. Эксперименты с включениями (твердыми, жидкими, газообразными, многофазными) в минеральных индивидах, на основании которых разрабатываются методы расшифровки минералогенетической информации, а также решаются вопросы сохранения, преобразования и потери минералогенетической информации в процессе "жизни" минерала.

12. Изучение комплексных минералогенетических моделей. Широко моделируются процессы метасоматоза и метасоматическая зональность, процессы перекристаллизации минеральных агрегатов, метаморфизма, отложения минералов в открытых породах и т.д.

13. Синтез искусственных аналогов минералов. В настоящее время синтезированы сотни минералов. При этом решается и обратная задача - использование данных о природном минералообразовании для определения оптимальных условий выращивания монокристаллов.

Этот перечень, конечно, не охватывает всего разнообразия проблем, решаемых с помощью минералогенетического эксперимента. Но и из него, и из учета известных факторов минералообразования следует, что во всем этом сложном комплексе проблем намечаются четыре главных направления: физическое — экспериментальное изучение физических сторон минералообразования (рост кристаллов, генезис минеральных индивидов и агрегатов и т.д.); физико-химическое — экспериментальное изучение физико-химических аспектов минералообразования; минералого-биологическое — изучение влияния биогенных факторов на минералогенетические процессы; комплексное — моделирование минералогенетических процессов в условиях, максимально приближенных к природным,

и экспериментальное изучение геологических условий их протекания.

Качественный и количественный эксперимент. Эксперимент может быть качественным и количественным, статистическим и нестатистическим. Обычно как важное достоинство минералогенетического эксперимента подчеркивается возможность получать с его помощью количественные результаты, а сам эксперимент рассматривается односторонне, как метод частных количественных решений, как поставщик количественных данных о параметрах процессов, необходимых для создания теоретических минералогенетических моделей [116]. Хотелось бы подчеркнуть значение качественного эксперимента. Экспериментальное доказательство принципиальной возможности какого-то явления, например биогенной редукции сульфат-иона при нормальных термодинамических условиях [124], может оказать более существенное влияние на развитие минералогической теории, чем несколько новых цифр, характеризующих уже известное явление. К сожалению, строгий качественный эксперимент используется в нашей науке не очень часто.

Принципы моделирования минералогенетических процессов. Минералогенетические процессы от чисто химических или физических процессов отличаются прежде всего тем, что они геологические. Характерные их особенности — строгое положение в координатах время — пространство; широкие масштабы проявления, охватывающие большое пространство и огромные объемы вещества; большая геологическая продолжительность; сложность, определяющаяся влиянием большого числа внешних и внутренних факторов; нередко специфические условия протекания процессов (очень высокие температура и давление), недостижимые на современном техническом уровне. Такие особенности создают серьезные препятствия для их моделирования. В связи с этим важной методической задачей в области минералогенетического эксперимента является разработка принципов минералогенетического моделирования. Современные методические разработки [42, 135, 208] позволяют выделить пять основных их принципов.

1. Принцип подобия моделей минералогенетическим явлениям: результаты исследования модели могут переноситься на моделируемое явление в том случае, если доказано их подобие. Для больших моде-

лей, в том числе и для природных, этот принцип формируется как принцип приближенного подобия [208], хотя абсолютного подобия мы, очевидно, не сможем достичь ни в каком виде моделирования.

2. Принцип избирательности модели относительно природного минералогенетического явления: на модели воспроизводится не все явление в целом, а только некоторые составляющие его процессы.

3. Принцип раздельного исследования факторов: разные факторы, действующие в природе совместно, на моделях исследуются раздельно.

4. Принцип последовательного приближения к полному подобию минералогенетического явления и его модели: при проведении серии экспериментальных исследований степень подобия модели явления должна непрерывно повышаться.

5. Принцип статистической обоснованности экспериментальных результатов: пакет результатов* всей совокупности экспериментов, моделирующих минералогенетическое явление, должен быть достаточным для строгих статистических обобщений.

Опыт экспериментальных исследований свидетельствует, что можно успешно моделировать широкий круг минералогенетических процессов, если строго соблюдать условия подобия.

Сущность минералогенетического процесса, который нам не известен и который мы к тому же не можем непосредственно наблюдать, представим как нечто, заключенное в непроницаемый для исследователя "черный ящик". Это, впрочем, вполне соответствует истине. Вне "черного ящика" останутся входные сигналы, определяющие функционирование процесса (параметры минералогенетической среды), и выходные сигналы, составляющие результат процесса (минералы или конституционные особенности и свойства минералов).

Для минерала недоступно не только содержание "черного ящика", но и входные сигналы; он имеет возможность исследовать своими традиционными методами только продукты минералогенетического

процесса, выходные сигналы. На основании данных о структуре выходных сигналов и закономерностях ее изменения делается прогноз и о структуре входных сигналов, и о механизме процесса внутри "черного ящика". Именно так можно представить себе минералогическое наблюдение и генетическую интерпретацию его результатов.

В процессе минералогенетического эксперимента мы подбираем такую модель "черного ящика", которая характеризуется близкой к наблюдаемой в природе структурой выходных сигналов, а структура входных сигналов не противоречит прогнозам, основанным на данных наблюдения. Ее мы и принимаем за эквивалент изучаемого природного явления. На этой модели мы уже имеем доступ к системе входных сигналов и можем как угодно изменять их, наблюдая, как меняются при этом выходные сигналы. Имея достаточное время, нетрудно найти функциональные зависимости между входными и выходными сигналами и методом проб и ошибок "испытать", "просветить" содержимое "черного ящика", расшифровать механизм минералогенетического процесса.

Значение минералогенетического эксперимента и организационные проблемы. Минералогенетический эксперимент, несомненно, позволяет глубже понять механизм минералогенетического процесса, чем одно только исследование результатов этого процесса, но полностью заменить наблюдение он не может. Эксперимент дополняет и расшифровывает наблюдение. Главная трудность в приложении результатов эксперимента к генетической интерпретации минералогических наблюдений часто связана с неизвестной степенью подобия условий эксперимента условиям природного минералообразования.

Вклад, который внесли экспериментальные исследования в развитие генетической минералогии, трудно переоценить. Расшифровка механизмов кристаллизации, физико-химическая интерпретация минералогенетических процессов, генетико-информационный анализ, получение искусственных аналогов минералов и многие другие разделы теоретической и прикладной минералогии развивались главным образом на данных минералогенетического эксперимента. Поэтому не случайно экспериментальные исследования занимают одно из ведущих мест в современной минералогии.

Лаборатории и отделы экспериментальной минералогии созданы сейчас почти во

* Термином *пакет результатов* в теории эксперимента называется совокупность всех экспериментальных результатов со строгой их дифференциацией на результаты конкретных опытов. Если оформить результат каждого эксперимента в виде протокола, а потом все протоколы одноцелевых экспериментов сложить вместе, мы получим пачку протоколов, которая и является пакетом результатов.

всех научно-исследовательских геологических института академического и прикладного профиля. В ряде стран функционируют мощные экспериментальные центры, подобные Институту экспериментальной минералогии АН СССР, Всесоюзному научно-исследовательскому институту синтеза минерального сырья Мингео СССР или Геофизической лаборатории института Карнеги (США). Результаты экспериментальных исследований в СССР обсуждаются на регулярных всесоюзных совещаниях по экспериментальной и технической минералогии и петрографии, которые проводятся начиная с 1934 г.

Однако организационная сторона экспериментальных исследований страдает очень серьезными недостатками. В области минералогенетического эксперимента работают специалисты самого разного профиля, поскольку высшие учебные заведения не готовят минералогов или петрографов с экспериментальным уклоном. Самообразование и переквалификация других специалистов и экспериментаторов затруднены, в первую очередь, из-за отсутствия крупных методических руководств. Более того, до сих пор нет даже элементарного учебника по экспериментальной минералогии. При существующей пестроте методик, применяемых разными лабораториями, их обобщение и разработка единого методического справочника - весьма актуальная задача. Пора, очевидно, начать подготовку минералогов-экспериментаторов в одном из университетов.

Неэффективна пока координация экспериментальных исследований. Ведущие центры не оказывают серьезной помощи новым лабораториям, особенно периферийным. При большом количестве "белых пятен" неоправданной является концентрация сил на изблюбленных темах, порождаю-

щая многочисленные повторения экспериментов, дублирование исследований. В то же время результаты экспериментов далеко не всегда оперативно публикуются. Одному из экспериментальных центров было бы целесообразно взять на себя роль координирующего центра, осуществляющего сбор результатов исследований и их систематизацию, подобно тому, как это делается в области кристаллоструктурных исследований. Вне внимания экспериментаторов все еще остаются вопросы синтеза впервые открываемых минералов, что следовало бы реализовать в тесном контакте с Комиссией по новым минералам ВМО АН СССР.

Большие трудности существуют в конструировании и изготовлении экспериментальных установок, в создании технической базы минералогенетического эксперимента. Даже установки, ставшие, по сути дела, стандартными (автоклавы, экзоклавы, камеры высокого давления и т.д.), до сих пор изготавливают кустарно.

Что же касается проблематики минералогенетического эксперимента, то обращает на себя внимание существенное отставание физического эксперимента от физико-химического, отставание экспериментального исследования генезиса минерала как твердого тела. В физико-химической области наиболее актуальны исследования минералогенетических систем в сложных условиях (открытые системы, системы с водой и летучими веществами, условия сверхвысоких температур и давлений и др.) и кинетики процессов. Требуют более интенсивного развития комплексные эксперименты, методы больших моделей, пригодное моделирование. Только они позволят перейти от моделирования отдельных явлений к моделированию минералогенетической системы в целом.

История зарождения, роста и изменения минеральных индивидов или их агрегатов непременно отражается в явном или скрытом виде в морфологии, анатомии, взаимоотношениях индивидов и других их особенностях. Минералог, за редчайшим исключением, не имеет возможности непосредственно наблюдать сам процесс минералообразования. Он имеет дело с результатами процесса и по ним с тем или иным приближением к истине (но никогда абсолютно точно) восстанавливает процесс, вернее, создает его ретроспективную модель. Ретроспективность онтогении минералов, как и генетической минералогии в целом, подразумевает необходимость использования сравнительно-исторического метода [72], который позволяет получать сведения об онтогенезе путем выявления генетической информации по тем или иным признакам минералов. Если говорить в общем, то сравнительно-исторический метод заключается в выявлении материальных признаков генетических событий, установлении временной последовательности формирования признаков в ходе генезиса и в итоге в создании картины генезиса в целом.

В минералогии сравнительно-исторический подход к генетическим исследованиям выражает онтогенический метод, сформировавшийся в процессе развития учения об онтогении минералов. Сознательно или непроизвольно онтогенический подход довольно широко используется в генетической минералогии и в смежных науках, однако его сущность, процедура, возможности, преимущества и ограничения, практическая эффективность в методическом аспекте специально не рассматривались. Может быть поэтому нередко приходится сталкиваться с непониманием самой сущ-

ности онтогенического метода, искажением его смысла, приравниванием к методам классической кристаллографии или минералогии.

Специфика онтогенического метода вытекает из самой сущности онтогении минералов, которая, как показано выше, представляет собой учение о генезисе, истории, эволюции минеральных индивидов и агрегатов. Следует специально подчеркнуть, поскольку это не всегда воспринимается с очевидностью, что онтогения минералов — учение не просто о генезисе, а об эволюции, развитии минеральных индивидов и агрегатов. На этом акцентировали внимание рецензенты второго издания "Онтогении минералов" [64] В.А.Черепанов, И.И.Шафрановский, Д.В.Рундквист, указавшие, что "...принципиальное и крупное достоинство... онтогенического направления заключается в идее развития минерального индивида" [247, с.368].

Онтогения минералов определяет реально существующие минеральные индивиды (кристаллы и зерна) как элементарные объекты минералогической науки. Только их изучение дает объективные знания для различного рода таксономических и генетических построений, для создания идеализированных кристаллохимических, физических, химических и иных моделей. Минеральные индивиды как реальные физические тела геологических образований характеризуются специфическими конституционными особенностями, строго определенной (индивидуальной) морфологией, анатомией, определенным образом реагируют на изменения внешней среды, обладают способностью к саморегуляции структуры (см. Приложение, рис. I-VIII). Специфичность и динамичность структуры мине-

рального индивида, сложность и разнообразие его функций позволяют рассматривать минеральный индивид как сложный организм [69]. Такой подход становится все более популярным [115].

Большое влияние на утверждение идеи о минеральных индивидах имели поиски общих закономерностей в строении живого и минерального мира. Очень четко и ярко развитие этого подхода показал Н.И.Кокшаров [138, с.4]: "...В начале 19 столетия барон Галлер сделал ясный намек на ту связь, которая существует между оформленными телами природы: животными, растениями и кристаллами", "Жизнь степенью выше растительности, — говорит он, — а эта последняя степенью выше кристаллизации". "Животные живут, растения прозябают", -- сказал знаменитый Линней, "... а минералы кристаллизуются", — прибавлял Байен. В этих словах заключены первые попытки провести одну общую нить между животными, растениями и кристаллами, — связать в одну общую нить звенья трех, по наружности столь различных между собой тел природы". Из этой же идеи исходил и Н.И.Кокшаров, обосновывая свои представления о минеральных индивидах.

Под индивидами он понимал не только кристаллы, но и монокристаллические образования любой формы: "... минеральные неделимые были часто образованы в стесненном пространстве и, поэтому, или скристаллизовались только отчасти, или иногда даже вовсе не окристаллизовывались" [137, с.7].

Следующее положение, связанное с онтогенезом минералов, которое ранее не учитывалось или мало учитывалось, заключается в определении генезиса как процесса "... саморазвития минералов при взаимодействии и взаимовлиянии со средой их образования" [70, с.411]. Все особенности минералов обуславливаются их генезисом, поэтому генезис фиксируется в конституции и свойствах минералов. Отсюда следует, что изучение конституции и свойств минералов является основой для познания их генезиса.

Еще одно фундаментальное положение, вытекающее из учения об онтогенезе минералов: закон прохождения минерального индивида через этапы зарождения, роста (см. Приложение, рис. VII, VIII), изменения и разрушения (рис. LI—LIX) (для более сложных минеральных систем, чем индивид или агрегат этот закон извест-

тен как закон стадийного развития, а метод исследования — как стадийный анализ по А.Г.Жабину [105]).

Идеи, вызванные развитием онтогенеза минералов, прочно вошли в минералогическую теорию и практику, используются и разрабатываются большой армией минералогов разных стран. Они оказались весьма плодотворными и в других науках геологического профиля, в первую очередь в петрографии и литологии, в учении о месторождениях полезных ископаемых, где именно на них опирается анализ кристаллизационной истории горных пород и руд. Разработка онтогенеза минералов послужила своеобразным толчком для развития многих отраслей геологического знания. Все это стало возможным благодаря в значительной мере продуктивно "работающему" онтогенетическому методу, который позволяет с высокой надежностью расшифровывать историю минералогических объектов. Ясно, что для такого рода анализа необходимо добывать сведения изнутри кристалла (зерна) или иного объекта, где, как известно, "зашифрована" основная часть признаков генезиса, и которые, как этого требует сравнительно-исторический анализ, "выстраиваются" во временной ряд.

Таким образом, сущностью онтогенетического метода являются изучение структуры минералогических объектов, анализ анатомии минеральных индивидов и возрастных взаимоотношений между ними с целью установления кристаллизационной истории минеральных агрегатов и минеральных тел.

Зачатки онтогенетического метода содержатся в текстурно-структурном анализе минеральных агрегатов. Труды минералогов, особенно А.Г.Бетехтина, в текстурно-структурный анализ вводятся элементы сравнительно-исторического подхода, разрабатываются приемы изучения границ между минералами и выяснения последовательности кристаллизации. Развитие именно этих тенденций и привело к возникновению онтогенетического метода. Но эти два подхода все-таки принципиально различны по своей методической основе и итоговому результату.

Главная задача текстурно-структурного анализа — типизация структурных построек из минералов в минеральных телах. В результате его устанавливаются структурный и текстурный типы агрегатов (например,

друзовая текстура, графическая и микропертитовая структуры и т.д.). Определив тип структуры или текстуры агрегатов, можно, исходя из аналогий, получить представление об их генезисе. Это обычный модельный подход.

При онтогеническом методе, благодаря которому создаются исторические реконструкции, приемы типизации если и используются, то во временном аспекте, т.е. для сравнительного анализа отдельных отрезков истории минералов.

Онтогенический метод опирается, как указывалось выше, на фундаментальные эволюционные закономерности. В этом, собственно, и заключается его принципиальное преимущество перед другими методами (см. гл. I) генетической минералогии, которые либо не вскрывают развития, либо ему придают мало значения. Будучи глубоко историчным, онтогенический метод дает возможность рассматривать минеральный индивид, с одной стороны, как неделимое целое (относительная однородность индивида как элементарного объекта минерального мира), а с другой - как гетерогенную систему элементов (частей) анатомии индивида (внутренняя неоднородность индивида). Без такого представления невозможно изображать результаты изучения генезиса телесно, т.е. создавать телесные модели генезиса минералов [71]. Кроме того, онтогенический метод иерархичен, поскольку применим при генетических исследованиях не только минеральных индивидов, но и образований более высокого уровня организации минерального вещества. Но независимо от этого, во всех случаях устанавливаются признаки развития последовательно сменяющихся стадий (стадиальный анализ, по А.Г.Жабину): сингенеза, диагенеза и метаморфизма. Теоретически онтогенический метод должен также быть эффективен при выявлении закономерностей по наследованию минералами структурных особенностей минералогенетических

систем и минералов-предшественников, но здесь пока нет надлежащих разработок.

Главные "инструменты" онтогенического метода — прямые и косвенные критерии одновременного и последовательного роста, критерии замещения или перекристаллизации минералов [1, 250, 282]. Метод весьма перспективен. Уже ныне просматривается путь (см. гл. III) перехода исследований от макро- к микроанатомическому уровню строения индивидов. Об эффективности этого метода можно судить по расширяющейся сфере его применения — в настоящее время он используется не только в минералогии, но и в петрологии, металловедении, гляциологии и других аналогичных областях веществоведения и естествознания.

Онтогенический метод — это сложный и длительный процесс минералогенетического исследования, позволяющего "... открывать непрерывную смену событий в истории минералов, а не представлять их в течение миллионов лет застывшими, <мертвыми>" [201, с.6]. Он осуществляется в несколько последовательных этапов:

- полевая минералогическая документация и отбор представительных образцов для лабораторных исследований;
- изучение формы и анатомии минеральных индивидов;
- изучение поверхностей соприкосновения между индивидами;
- стереологические реконструкции (создание телесных моделей объектов);
- выявление пространственно-временных взаимоотношений между минералами;
- восстановление кристаллизационной истории минералогических объектов;
- минералогенетические реконструкции и разработка прикладных минералогических проблем.

Все это, т.е. теория и практика онтогенического метода, а также условия, в которых осуществляется исследование (онтогеническая лаборатория), рассматривается в последующих главах.

Каждый новый, проверенный практикой научный метод рано или поздно приобретает свое организационное оформление. Так было со стадийным анализом в литологии, ядерными методами в геофизике, с геологической микробиологией и т.д. Ныне, когда учение об онтогении минералов является одним из наиболее разработанных разделов минералогии, пришло время обсудить методологию, функции и структуру специализированной онтогенической лаборатории.

Методологические основы онтогенической лаборатории. Выше отмечалось, что, несмотря на наличие специальных монографий и статей, раскрывающих принципиальные особенности и практическую эффективность онтогенического метода в минералогии [70, 76, 105, 278], некоторые минералоги неправильно понимают сущность самого понятия *онтогения минералов* и онтогенического метода в минералогии. Нередко онтогения минералов отождествляется с тривиальным морфологическим описанием повышенной детальности, т.е. подробной морфологической характеристикой какого-то конечного (статического) состояния объекта: индивида, агрегата, рудного тела и т.д.

Именно статическому, без раскрытия развития, описанию объектов минералогии и противостоит онтогенический метод. Его сущность (см. гл. II): поиск, установление критериев зарождения, развития (эволюции), изменения. В таком контексте онтогенический метод, берущийся на вооружение онтогенической лабораторией, имеет принципиальные преимущества среди других методов (см. гл. I) генетической минералогии, поскольку он:

— *стадиален*, т.е. глубоко историчен во всех своих компонентах;

— *системен*, т.е. минеральный индивид исследуется как неделимое целое, как система;

— *иерархичен*, т.е. применим на нескольких уровнях организации вещества минерального мира: индивиды • агрегаты • геологические тела;

— позволяет создавать *телесные модели*, т.е. строить стереологические реконструкции.

В разных местах этой книги отмечается, что онтогенический метод исследования минералов - один из основных методов получения генетической информации в минералогии. Но что такое генезис минералов? На этот вопрос даются разные ответы. По нашему мнению, наиболее емким является ответ Д.П.Григорьева [70]: "...генезис минералов в натуре (не в мыслях, не в словах, не на бумаге) есть полная совокупность явлений их истории как кристаллов от акта зарождения и до конца существования" (с.411), а выявление (раскрытие) генезиса есть "...познание качеств минералов, т.е. выявление, измерение и интерпретирование генетических признаков, "записанных" в конституции, морфологии и свойствах минеральных индивидов и агрегатов" (с. 412).

При таком понимании генезиса минералов в онтогеническом методе необходимо выделить следующие его особенности (без их знания невозможно понять специфику онтогенической лаборатории):

— активное использование генетических признаков, "записанных" в самих минера-

* Глава написана совместно с А.Г.Жабиным.

лах, для выявления которых требуется владение методиками препарирования индивидов и агрегатов;

- выявление, расшифровка в эталонных образцах связей между прошлыми явлениями генезиса и ныне наблюдаемыми их признаками, распространение выявленных признаков (шифров) на другие случаи — генетическое "чтение";

- минералогические объекты независимо от уровня организации — индивиды, агрегаты, рудные тела — исследуются стадийно; выявляются материальные признаки динамики развития последовательных стадий сингенеза (зарождения и первичного роста), диагенеза (автометаморфизма) и метаморфизма (вплоть до уничтожения).

При этом важную роль играют следующие методические приемы описания объектов, получения исходной информации, установления типовых явлений и процессов, тенденций и закономерностей:

- препарирование минеральных индивидов и агрегатов для вскрытия их анатомического строения (см. также гл. V);

- минералогическое картирование как способ выявления анатомии геологических тел: рудных жил, пластов, зон брекчий и т.д. (см. [282])*;

- стадийный анализ, заключающийся в последовательном "снятии информации" от молодых к древним с выделением последовательных стадий развития объекта: сингенеза, диагенеза и метаморфизма (вплоть до уничтожения);

- построение типовых телесных моделей процессов и явлений: секториально-зональный рост кристаллов, друзовый агрегатный рост, крустификационная жила выполнения трещинных полосей, псевдоморфизация и т.д.;

- выявление эволюции смены кристаллических форм кристаллов в истории роста индивидов, агрегатов, рудных жил и пегматитов, т.е. использование кристалломорфологических методик [95,97];

- выявление трехмерного распределения физических и химических свойств кристаллов: физическая и химическая природа зональности, секто-

риальности, блокирования, виды дефектов, специфических центров окраски и люминесценции, электрических, пьезоэлектрических, магнитных и других свойств.

Как указывалось, онтогенения минералов — ретроспективное учение, поэтому знания о генезисе добываются путем привлечения сравнительно-исторического анализа [72]. Основу его составляют два принципа: **детерминизм** (обусловленность результатов породившими их процессами) и **инерционность** (способность минералов сохранять первичные генетические признаки при наложении на них новых процессов).

Именно эти особенности онтогенения минералов и онтогенического метода и определяют специфику онтогенической лаборатории, круг ее методов и эффективность решаемых задач научного и прикладного характера.

Статус онтогенической лаборатории. Онтогеническая лаборатория в общем виде предназначена для проведения научно-исследовательских работ, которые в зависимости от кадровой обеспеченности и технической оснащенности могут различаться по объему исследований. Важен вопрос о месте онтогенической лаборатории в геологической службе. Кажется целесообразным организовывать и развивать онтогенические лаборатории в первую очередь в научно-исследовательских учреждениях Академии наук и отраслевых институтах, а также при кафедрах минералогии (кристаллографии) высших учебных заведений. В зависимости от профиля учреждения, решаемых им задач и других причин может быть различным статус онтогенического подразделения — от потенциальной лаборатории, кабинета, объединяющих сотрудников идейно и входящих в минералогическое подразделение более широкого профиля, до самостоятельного (например, на правах структурной общегосударственной лаборатории) подразделения, т.е. ведущего широкомасштабные исследования в области онтогенения минералов. В настоящее время, учитывая общую специфику организационной структуры геологической науки, наиболее оптимальной представляется относительно небольшая или средняя онтогеническая лаборатория в составе более общего минералого-кристаллографического подразделения, например отдела или кафедры — основных структурных ячеек в системе АН СССР и Минвуза СССР соответственно.

* Анатомическое описание, графическое документирование минерального индивида — это, в сущности, также методика минералогического картирования в соответствующем масштабе.

Задачи онтогенической лаборатории. В общем виде они тесно переплетаются с основной задачей самого учения об онтогении минералов — объемное исследование минеральных индивидов и агрегатов, направленное на создание генетических моделей и решение практических задач минералогии в общей системе поисковых, оценочных и геологоразведочных работ.

Более конкретно задачи онтогенической лаборатории можно сформулировать, привлекая упоминавшиеся выше представления об эволюционной сущности онтогении минералов — развитии минеральных индивидов и агрегатов во времени и пространстве. Но для того чтобы судить об эволюции минералов, необходимо глубоко проникнуть во внутренний мир индивидов и раскрыть природу их возрастных взаимоотношений в агрегате. Отсюда логически вытекают две основные задачи онтогенической лаборатории: выявление анатомии минеральных индивидов и установление природы границ соприкасающихся индивидов и их возрастного соотношения. Первая задача практически безгранична по глубине познания минеральных образований, вторая методически более ограничена и обычно сводится к поиску "записанных" в минерале критериев одновременного или последовательного роста индивидов, перекристаллизации или замещения, разрушения или регенерации. При переходе от визуально-оптического к электронно-оптическому уровню наблюдений указанные задачи могут переплетаться и усложняться. Нередко однородный визуально и в поляризационном микроскопе "индивид" под электронным микроскопом оказывается сложно устроенным гетерогенным агрегатом, состоящим из продуктов распада некогда гомогенного твердого раствора. При этом продукты распада могут быть результатом более чем одной стадии. Так, по мнению В.С.Гайдуковой и соавторов [36], в магнетите из кальцит-форстерит-магнетитовых руд Ковдорского месторождения имеются включения разных минералов, образовавшихся в процессе пяти последовательных стадий распада.

Задачи онтогенической лаборатории — давать по исследуемым объектам эффективные научные и прикладные заключения — реализуются следующим образом:

1) использованием локальных скоростных методов препарирования минеральных индивидов и агрегатов: резка алмазными пилами, пробоотбор микроколичеств

вещества; механическая и химическая очистка от посторонних минералов, пленок; истирание; фазовая сепарация. Теория и практика препарирования образцов минералов обстоятельно изложены Б.З.Кантором в его книге [131];

2) вычерчиванием трехмерных телесных (анатомических) моделей изучаемых объектов, их зарисовкой и фотографированием;

3) проведением с помощью гониометров кристалломорфологического анализа (соотношение простых форм, габитусные количественные характеристики, рельеф граней и др.) с учетом динамики роста и изменения индивидов;

4) препарированием агрегатов с целью выявления онтогенических стадий — сингенеза, диагенеза и метаморфизма;

5) сбором фактического материала (в поле и лаборатории) по изучаемым и уже исследованным объектам; фактографией и хранением образцов; формированием банка минералогических данных [239];

6) использованием при исследовании объектов в рудных телах и на месторождениях метода минералогического картирования, характеризующегося высокой эффективностью при решении прикладных задач.

В связи с задачами и возможностями онтогенической лаборатории полезно упомянуть проблему парагенезиса минералов и парагенетического анализа. Последний, равно как и метод фазового соответствия, не учитывает данных по онтогении минералов, а лишь использует простое наблюдение в плоскости — совместное нахождение минеральных видов. Такой подход, игнорирующий возрастные взаимоотношения индивидов (не говоря уже об их анатомии), не может всегда давать корректные данные о температуре и давлении.

Совершенно очевидно также, что анатомическое препарирование минеральных индивидов и минералогическое картирование сложных ими рудных тел есть объективная основа типоморфного анализа — важнейшего теоретического и прикладного метода современной минералогии. В настоящее время успех этого метода определяется не количеством, "вслепую" полученных измерений, а аналитическими данными, имеющими привязку к конкретным анатомическим частям индивидов, поскольку у последних отдельные зоны роста (изохроны) или отдельные

пирамиды роста разных граней могут существенно различаться физическими свойствами и химическим составом. Если указанное условие не будет выполняться, мы и дальше будем оперировать некими интегральными данными, которые могут привести к ложным корреляциям или иллюзорным закономерностям.

Приборы, оборудование и приспособления онтогенической лаборатории. "Жизнь" минералов и минеральных агрегатов "записана" в их анатомической картине и поверхностях. Следовательно, онтогеническая лаборатория должна быть оснащена аппаратурой, приборами и механизмами для выявления анатомии минеральных тел, изучения их поверхностей и документирования снимаемой информации.

Для изучения поверхностей минеральных индивидов необходимо их вскрыть, очистить от пленок, отпрепарировать. В зависимости от сложности задачи в конкретных случаях используются молоточки, зубильца, ножи, иглы, ультразвуковые аппараты, щетки, замораживание и нагревание с водой, растворы кислот, щелочей, солей, адиабатические явления в автоклавах и другие приемы.

Отпрепарированные индивиды изучаются визуально, гониометрически, оптически, на стереоскане, на электронном микроскопе, на интерферометрах и т.д. Весьма желательно изучать термо-эдс на разных поверхностях, смачиваемость их и другие поверхностные свойства. Очень важно определять генетический тип поверхностей.

Для выявления и изучения анатомии минеральных тел применяются их ориентированные сечения. Крупные образцы индивидов и агрегатов могут иметь естественные разноориентированные сколы, дающие предварительную информацию об их внутреннем устройстве. После предварительного изучения образца делают ориентированные разрезы алмазной пилой, шлифуют и полируют. Часто в процессе шлифовки (до полировки) хорошо видны некоторые анатомические детали минерального тела, которые исчезают при полировании. Минеральные индивиды желательно разрезать с учетом кристаллографической ориентировки (существенно упрощается анализ анатомических элементов). Соответственно размерам образцов надо иметь разнокалиберные отрезные станки и круги. Для выявления анатомии некоторых агрегатов широко применяется способ покрытия срезанных поверхностей прозрачным лаком, который

как бы усиливает текстурный рисунок агрегата.

Если индивиды (или агрегаты) очень мелкие, применяют шлифы и аншлифы с какой-либо связующей массой (эпоксидная смола, шеллак, зубной цемент и др.) или такие же препараты из естественных агрегатов.

После приготовления препаратов с ориентированными сечениями переходят к выявлению анатомии и изучению ее. Выявление анатомической картины производят травлением, окрашиванием, облучением, снятием "отпечатков" и т.д. Для всех этих методов требуется соответствующая аппаратура, химические реактивы, установки: вытяжные шкафы, боксы, темная комната для наблюдения и регистрации люминесценции, источники инфракрасного, ультрафиолетового, рентгеновского излучения и γ -излучения, источники нейтронов, микронзонды, автоклавы, фотоматериалы.

Анатомия минерального тела только потому и выявляется, что имеется неоднородность в распределении атомов элементов, дислокаций и включений в нем. Следовательно, анатомия - понятие очень емкое, многогранное. Отсюда много методов ее выявления, много задач, решаемых с ее помощью. Все это определяет довольно большой набор аппаратуры (в том числе очень сложной), необходимый для функционирования современной онтогенической лаборатории. Однако и практическая отдача такой лаборатории может быть весьма значительной, особенно для технологии минерального сырья.

Таким образом, для оснащения онтогенической лаборатории помимо собственно аналитической и обычной минералогической аппаратуры по определению состава и свойств минералов требуются также:

- гониометры, включая простейшие и фотогониометры;

- камнерезные пилы с алмазной кромкой стальных дисков, для крупных штучков с дисками до 50 см в диаметре, с толщиной щели надреза 3 мм; для мелких монокристаллов диаметр диска 2 см, толщина щели надреза 0,8 мм;

- пробоотборники макроскопические (буры трубчатые с алмазной кромкой, диаметром "керна" от 2 до 10 мм) и микроскопические, армированные твердыми сплавами, типа стоматологических буров (ямка опробования от 1 до 3 мм, проба порошковая);

- ручной пресс для запрессовки с по-

догревом препаратов в полистироле, для последующего приготовления ориентированных шлифов и исследования в проходящем и отраженном свете;

- шлифовальный станок настольный с набором порошков для приготовления последовательных срезов и других операций (например, для получения кристаллографически ориентированных препаратов);

- фотонасадки для производства микроснимков через микроскопы и бинокulary;

- установка для получения F-радиографических снимков;

- рамки и сетчатые трафареты для рисовки штудов и экспрессного подсчета количественного минерального состава.

Повысить качество, скорость и эффективность получения генетической информации, заложенной в анатомическом строении минеральных индивидов и агрегатов, можно путем сосредоточения в онтогенетической лаборатории и активного использования справочников, атласов и монографий по текстурам и структурам руд, росту и растворению кристаллов; таблиц с рисунками кристаллических форм (визуальная экспресс-диагностика), образцов двойникового срастания по всем законам, эндотаксических и эпитахсических закономерных сростков разных видов, таблиц с рисунками форм зерен разной степени окатанности, номограмм для определения формы зерен и идиоморфных вкрапленников по набору плоских сечений в шлифа; анатомических рисунков кристаллов по зональности, секториальности, блокованию, расщеплению, структурам распада, доменному строению и т.д.

Полезно иметь в лаборатории настенную графику, суммирующую критерии относительной последовательности кристаллизации минералов, динамические мульти-схемы роста основных типов минеральных агрегатов (друзовых, зернистых, параллельно-шестоватых, эвтектических, порфировых, псевдоморфоз), а также критерии метасоматического и метаморфического преобразования и разрушения минералов.

Оснащенность лаборатории специальными справочниками, атласами и диагностическими таблицами позволит оказывать консультационную помощь по кристалломоρφологии, интерпретации текстурно-структурных рисунков минеральных агрегатов, критериям синхронности и последовательности кристаллизации, типам псевдоморфоз и т.д. Подобные консультации, особенно

необходимые при изучении препарированных образцов, одновременно будут лучшей формой активной пропаганды, распространения и внедрения идей онтогенеза в практику научной деятельности.

Тематическая направленность онтогенетической лаборатории. Чтобы установленные минералогические закономерности можно было эффективно использовать на определенных объектах, находящихся на разных стадиях поисковых, разведочных и эксплуатационных работ, необходим выбор объекта-эталоны.

Выбор объекта-эталоны как полигона для проведения научно-исследовательских тематических работ должен отвечать следующим требованиям: 1) он должен быть типичным в формационном отношении; 2) желательно, чтобы в эталонном объекте было минимальное число усложняющих, "посторонних" элементов: наложений других рудных формаций, стадий регионального метаморфизма, динамометаморфизма, контактовых воздействий со стороны интрузий и т.д.; 3) объект должен находиться на стадии детальной или предэксплуатационной разведки, когда количество буровых скважин и горных выработок будет достаточным для проведения минералогического картирования, выявления стадийности, диагностики числа генераций основных минералов и т.д.

Формационная типичность эталонного объекта позволит в будущем осуществить три логические операции: проверить реализацию, повторение ("воспроизводимость") обнаруженных на эталонном объекте закономерностей на других представителях месторождений и рудопроявлений этого же типа; дать прикладные рекомендации на всю совокупность формационно-однородных объектов; указать роль названных выше, усложняющих "посторонних" элементов.

Таким образом, основой тематической направленности онтогенетической лаборатории должен быть выбор объектов, которые интересуют промышленность минерального сырья или смогут заинтересовать ее в ближайшем будущем.

Таким образом, онтогенетическая лаборатория — новое научное подразделение в геологических учреждениях, призванное вести оригинальные исследования в области генетической и прикладной минералогии. Генетические

и прикладные заключения даются на основе выявления и расшифровки анатомического строения индивидов и агрегатов, установления возрастных взаимоотношений индивидов в агрегатах с широким применением минералогического картирования.

Положительный опыт, накопленный минералогами по использованию генетической информации в практике геологоразведочных работ [46, 97, 113, 169, 282] (см. гл. XI), — убедительный аргумент в пользу целесообразности создания онтогенических лабораторий. При этом методически важно непременно соблюдать требование комплексности исследований, а именно полученную в онтогенической лаборатории информацию комплексировать с данными о типоморфизме минералов, выявлении технологических характеристик, критериев зональности и т.д., ибо только такой подход позволяет разрабатывать надежные минералогические критерии поиска и оценки месторождений полезных ископаемых.

Некоторые соображения о перспективах развития онтогенических лабораторий. Анатомия индивидов иногда вскрывается самой природой, но это встречается относительно редко. Обычно же она проявляется после специальной обработки — травления, облучения ионизирующим излучением, гидротермального травления, диффузии, автордиографии с привлечением методов рентгеновской дифракционной и секционной топографии, световой и электронной микроскопии, интерферометрии, фазового контраста.

Указанные методы, методики, приемы исследований и соответствующая аппаратура дают возможность выявлять анатомическое макростроение минералов, фиксируемое окраской, глубиной и направлением растворения или различной густоты (контрастности) изображениями на фотоматериале. В связи с этим оснащение онтогенической лаборатории, в том числе кадрами, должно осуществляться с учетом обеспечения отмеченного уровня исследований.

В ближайшем будущем видится широкое использование аппаратуры и для вскры-

тия анатомического микростроения минералов. Здесь особое положение займет электронная микроскопия, главным образом новое направление — высоковольтная просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ), нередко именуемая за рубежом "электронной петрографией" [173, 228, 267].

Микростроение минералов изучается с помощью ПЭМ (плюс комплекс вспомогательных аналитических методов) в значительной мере благодаря разработке универсального способа препарирования минеральных объектов — ионного утонения. Последнее позволяет довести образец до толщины 10—30 нм без нарушения конституции минерала. В ПЭМ выделяются: обычная (100 кВ), когда используется электронный микроскоп просвечивающего типа с ускоряющим напряжением до 100 кВ; высоковольтная, когда используется электронный микроскоп с ускоряющим напряжением 200, 300, 400, 1000, 3000 кВ и более (редко). Граница между обычным и высоковольтным микроскопами условная, но, как правило, высоковольтными считаются приборы с ускоряющим напряжением около 10^6 В, выпускаемые в основном японской фирмой "Geol". С помощью таких микроскопов можно наблюдать невидимые в оптическом микроскопе дефекты кристаллической структуры: дислокации, включения, микродвойники, микронеоднородности и т.д.

В последние годы интенсивно развивается так называемая высокоразрешающая электронная микроскопия. Ультрасовременные электронные микроскопы фирмы "Geol" имеют разрешение около 0,2 нм. Такое высокое разрешение позволит развивать качественно новое направление (на атомном уровне) в онтогенических исследованиях, поскольку дает возможность наблюдать атомные плоскости и структурные мотивы кристаллов.

Круг онтогенических задач, которые могут решаться с помощью современных электронных микроскопов, практически неограничен, но для этого необходимо преодолеть ряд технических и методических барьеров, чтобы ПЭМ стала массовым методом.

СТЕРЕОЛОГИЧЕСКИЕ РЕКОНСТРУКЦИИ
(ТЕЛЕСНЫЕ МОДЕЛИ)

Стереологические реконструкции широко используются не только в минералогии [111а], их применяют в металлографических исследованиях [214, 249], топоминералогии [282], металлогении [165]. Они позволяют понять, что представляет собой изучаемый объект в объеме, какова его структура, из каких индивидов он состоит, каковы их форма и размеры, распределение в пространстве, особенности сочленения и взаимоотношений друг с другом и в итоге — какова последовательность минералогических событий. В результате стереологических операций получаем объемный рисунок (или объемную модель), на котором отражены результаты изучения генезиса минералов от акта зарождения до последнего момента их развития, т.е. воссоздается телесная модель исследуемого объекта [71]. Д.П.Григорьев подчеркивает, что, если в итоге исследования воспроизвести модель генезиса телесно невозможно, это значит, что процесс не установлен достаточно точно.

Пример телесной модели, полученной в результате стереологического реконструирования, приводится в работе [71]. В шпинелевом троктолите импактного происхождения, доставленном АЛС "Луна-20", форма выделений оливина в шлифе имеет, кроме одного случая, очень сложный вид. На рис. 3 показаны кристаллы оливина, послужившие основой для построения объемной картины процесса его образования с учетом первого закона анатомии кристаллов (см. гл. V). Проследить ход процесса помогают зарисовки контура таблитчатого кристалла с гранями двух ромбических призм k и m и пинакоида b (рис. 4). Теоретически каждый кристалл

мог бы вырасти в форме комбинации этих двух призм и пинакоида. Однако быстрое охлаждение в лунных условиях позволило нормально развиваться пирамидам нарастания граней одной вертикальной призмы (рис. 4, а), в результате чего получилось четыре пирамиды нарастания этих граней. Нормальный рост последних сопровождался скелетной кристаллизацией — отложением вещества на ребрах между возможными гранями m и b , приведшей к образованию сочленяющихся попарно восьмью поверхностями нарастания ребер (рис. 4, б) и пирамид нарастания граней k (рис. 4, в). Затем вдруг изменившиеся условия прервали нормальный рост граней k и началось тангенциальное разрастание обеих граней b по направлениям от ребер b : k и b ; m к центрам граней b . Однако внезапно этот рост примерно "на середине" приостановился, из-за чего пинакоидальные грани успели развиваться лишь на половину возможной их площади. Посредине их возникали своеобразные "окна" (рис. 4, з). Так изображается процесс на рисунке с помощью линий и плоскостей. Кристаллы оливина в натуре имеют сверху и снизу как бы надпилы, углубленные посредине почти до точки зарождения, а с боков — "окна". Придание на чертеже поверхностям нарастания ребер и тангенциально росшим граням некоторой толщины завершает создание телесной модели (рис. 5), на которой можно увидеть отмеченные выше сечения и контуры кристалла оливина в целом. Конечно, природная кристаллизация была не столь геометрична, как это иллюстрируется рассмотренной идеальной (обобщающей) моделью, позволяющей расшифровывать частные случаи.

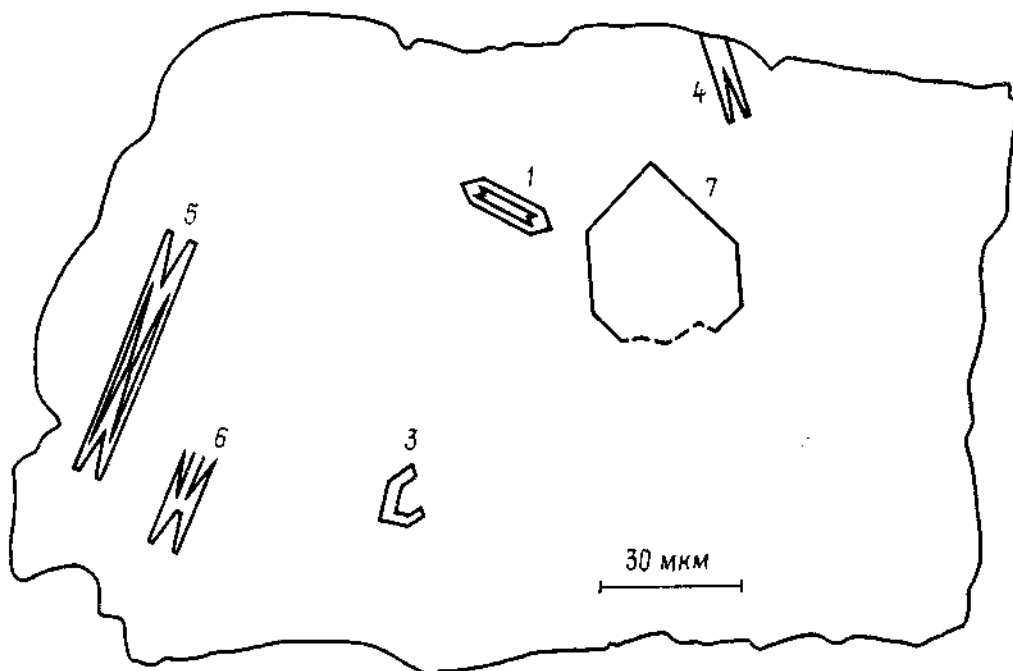


Рис. 3. Контуры скелетных кристаллов оливина из шпинелевого троктолита, выбранных для построения телесной модели его анатомии [71].
Номера кристаллов соответствуют рис. 5

Приведенный пример, оцененный автором как "графическая головоломка" [71], показывает принципиальное значение телесных моделей для расшифровки генезиса минералов. Не менее важно также то, что на основе таких или подобных моделей, например агрегатов в рудах, даются практические заключения по технологии переработки руд с тем, чтобы наиболее рационально выделять полезные минералы. Большой вклад в разработку методики стереологических исследований руд для технологических целей внесли Б.И.Пирогов [180], М.Жюль [119], В.Шанти [255] и др.

К сожалению, в практике онтогенетических исследований минералоги нередко пренебрегают телесным моделированием, и это приводит к серьезным ошибкам, особенно в тех случаях, когда заключение о генезисе делается по одному-двум случайным плоским сечениям. Часто на основании изучения отдельных плоских разрезов за разные морфологические образования принимаются разные срезы одного и того же скелетного индивида, эвтектических структур, мирмекитов и т.д. Неправильно интерпретируется форма кристаллов, зерен, пластинчатые кристаллы нередко принимаются за игольчатые, столбчатые — за изометричные. В разных разрезах минеральный агрегат может быть представлен по-разному.

Методика стереологических реконструкций достаточно хорошо разработана и в минералогии, особенно в металловедении, но технически стереологические исследования осуществить непросто, в этом основная причина, сдерживающая их применение.

О некоторых минералогических объектах можно получать пространственное, стереографическое представление из прямых наблюдений, не применяя каких-либо специальных методов. К таким объектам относятся, например, различные неилотные минеральные агрегаты (друзы, щетки и т.д.) или прозрачные тела (кристаллы-фантомы с видимой анатомией, агрегаты прозрачных кристаллов и зерен и др.). Измеряя, зарисовывая, фотографируя подобные агрегаты, можно довольно точно восстановить последовательность зарождения отдельных индивидов и особенности их роста. Данные, полученные при исследовании смежных поверхностей скола, полированных и индуцированных поверхностей, дают довольно точное представление, например, об истории сложного сферолита настурана. Стереологические исследования таких объектов можно проводить непосредственно в поле, прослеживая при этом взаимоотношения анатомических элементов и структурных особенностей изучаемого минерального образования с особенностями вмещающей геологической среды.

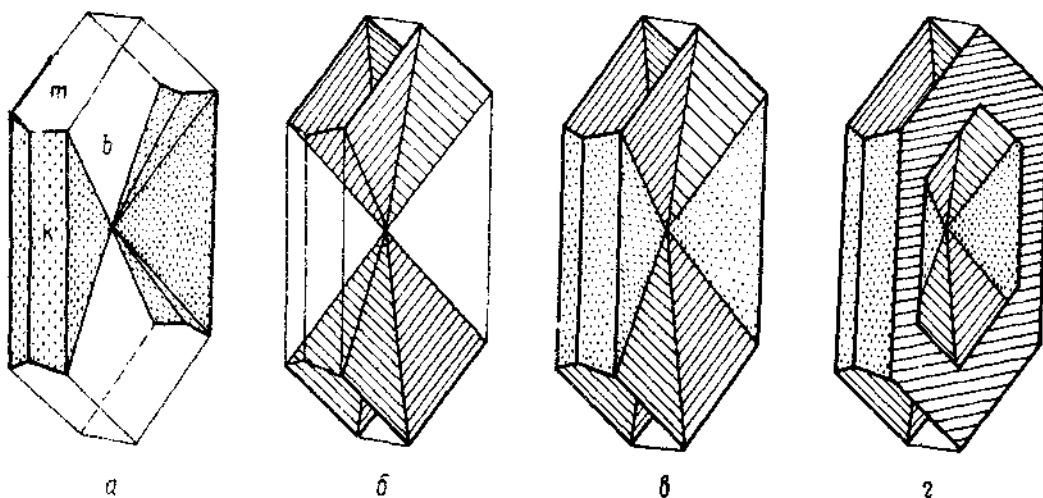


Рис. 4. Схема роста скелетного кристалла лунного оливина [71]:
а-г - стадии роста

Необходимо подчеркнуть, что любые стереологические исследования должны быть обеспечены соответствующей полевой документацией, отражающей пространственное положение, структурный контроль и ориентировку изучаемых объектов. Одним из наиболее эффективных видов такой документации является объемное минералогическое картирование. Методические особенности пространственных минералогических исследований подробно рассмотрены в книге Н.П.Юшкина [282].

В минералогии, кроме прямых наблюдений, используются специальные стереологические методики, которые рассмотрим ниже.

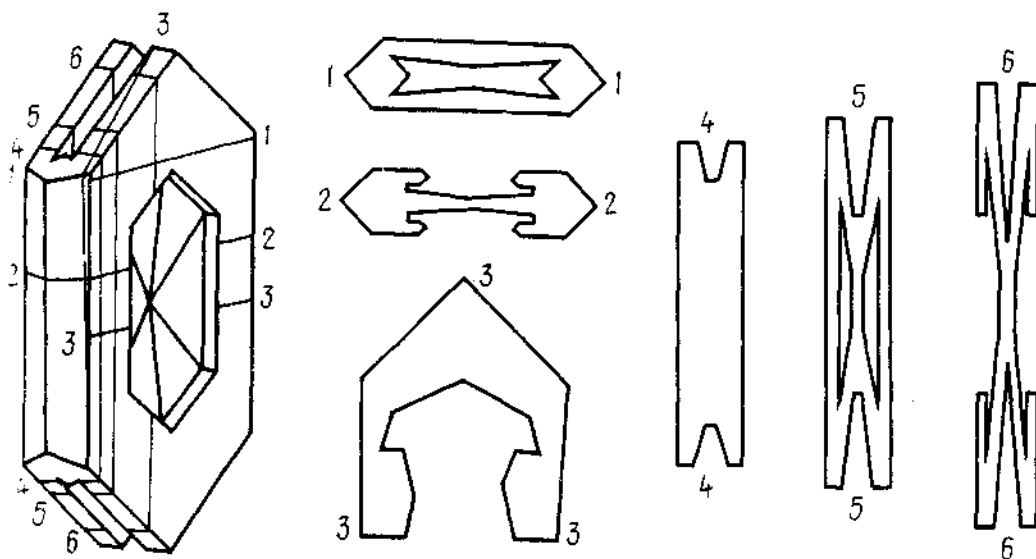
Расчленение минеральных агрегатов на индивиды. Смысл его достаточно ясен: каким-либо образом агрегат расчленяется на отдельные составляющие его кристаллы или зерна и затем изучается пространственное строение агрегата. Самое сложное в этой методике - препарировка индивидов. Специальной техники разделения агрегата на зерна без их разрушения нет, и в каждом отдельном случае приходится подыскивать подходящий метод. Наиболее обычный прием - это последовательное скалывание кусочков, соизмеримых с размерами индивидов, слагающих агрегат. Конечно, таким образом отдельные индивиды выделить не всегда удастся, но строение агрегата при достаточно большом числе сколов определяется вполне достоверно. Иногда оказывается эффективной обработка агрегата перед препарировкой ультразвуком, растворителями, нагреванием или охлаждением, гидроуда-

ром. Под действием этих факторов зерна могут "расшатываться", сцепление между ними ослабевает и препарировка осуществляется легче. В процессе расчленения агрегата ведутся зарисовки их внутреннего строения и составляются кристаллизационные диаграммы, которые мы рассмотрим в следующих главах.

Раскрытие внутреннего строения минеральных тел **параллельными срезами**. Если разрезать агрегат на пластины небольшой толщины, то по срезам легко восстановить объемное строение. Разработаны даже машинные методы структурного анализа срезов и синтеза на их основе телесной модели объекта [249]. Задача получения трехмерного изображения тела по двумерным разрезам решается математическим путем; благодаря использованию томографов достигается весьма высокая достоверность создания объемной модели.

Раскрытие внутреннего строения минеральных тел пересекающимися срезами. Этот способ мало отличается от предыдущего, но позволяет ограничиться меньшим количеством (двумя-тремя) срезов для получения достоверной картины благодаря выбору наиболее информативных их направлений.

Раскрытие внутреннего строения минеральных тел одним оптимальным срезом. Расчленение или распиливание минеральных агрегатов - дело трудоемкое и долгое. Однако во многих случаях нет необходимости анатомировать агрегат множеством срезов. Можно подобрать такое оптимальное направление единственного среза, которое позволит получить главней-



Фиг. 5. Телесная модель оливина [71]

шую информацию о истории роста индивида или агрегата: срез крустификационного агрегата перпендикулярно к поверхности обрастания, поперечный срез жилы, параллельно-шестоватого агрегата, центральный срез жеоды, осевой срез монокристалла и т.д. Благодаря именно таким характеристическим срезам и были выяснены основные онтогенетические закономерности. В случае необходимости, характеристические срезы могут дополняться серией уточняющих срезов.

Избирательное растворение. Очень эффективный, но, к сожалению, все еще ограниченно применяемый в минералогической практике метод избирательного растворения минералов. Если выправить из биминерального агрегата один минерал, то останется текстурная постройка второго нерастворенного минерала, конфигурация которой отражает пространственное положение плоскостей срастания. Очень интересны и показательны, например, слюдяные скелеты в мраморах, проявляющиеся при растворении карбонатов. Исследуя их, можно легко установить последовательность кристаллизации минералов. Метод применим не только к биминеральным, но и к полиминеральным агрегатам.

Конечно, наиболее надежны результаты, полученные для агрегата, в котором все индивиды удалось перебрать, сосчитать и описать. Но такие объекты относительно редки. В природе резко доминируют визуально плохо различимые и микроскопические индивиды (зерна), ела-гающие горные породы и руды. Для сте-

реологических реконструкций это трудные объекты, поскольку даже самые прямые методы микроскопии, в том числе растворяющая электронная микроскопия, позволяют получить лишь некоторую, в той или иной мере приближенную, информацию.

Кроме рассмотренных выше прямых (эмпирических) методов стереологических исследований минералогических объектов, разработано и разрабатывается много различных аналитических методов, основанных на использовании фундаментальных свойств полиэдров и закономерностей строения и эволюции границ в зернах [295, 298 и др.]. Все эти методы, нередко реализованные в компьютерных вариантах, чрезвычайно удобных для использования, ставят целью получение объемного представления о структуре и текстуре сложных объектов по их плоским срезам, в том числе и по одному срезу. Особенно интенсивно эти методы разрабатываются в металловедении, где существует даже особое методическое направление - стереометрическая металлография [214, 249]. В приложении к минералогическим объектам этот подход продуктивно разрабатывают А.Г.Жабин [101, 104, 114], Р.Л.Бродская и Ю.Б.Марин' [19], Н.В.Путивцева [204], Г.Амштутц и Х.Гигер [292], Р.Эрлих и Б.Вейнберг [297], Ф.Дж.Смит [225], Дж.Рисс и М.Дуранд [306] и др.

Нужно, однако, отметить, что эмпирические методы стереологии более эвристичны и позволяют создавать более достоверные телесные модели, чем аналитические. Аналитические же методы удобнее

в сравнительных исследованиях, так как позволяют вывести некоторые количественные характеристические показатели.

В основе аналитических методов лежат два принципа:

1) оценка микроструктуры агрегата должна быть строго количественной, выраженной конкретными значениями геометрических параметров микроскопического строения;

2) для рациональной оценки микроструктуры необходим выбор геометрических параметров пространственного микроскопического строения в качестве критериев оценки. Этот принцип вытекает из следующих соображений: при пересечении трехмерных объектов вероятность попадания крупных и мелких зерен неодинакова (поэтому в шлифе крупных зерен относительно больше, чем в агрегате в целом), а средний размер плоского зерна в срезе создает ложное представление об истинных размерах зерен.

Определенные достижения имеются в использовании стереометрических методов при решении задач онтогении магматических горных пород [19], благодаря которым осуществляется переход от описательной к стереометрической петрографии.

Здесь прежде всего выдвигается положение о наличии вероятностной периодичности в структуре магматических пород, т.е. положении об элементарной ячейке структуры горных пород. В связи с этим для изучения структуры минеральных агрегатов предлагается подход, аналогичный применяемому при расшифровке кристаллической структуры минеральных индивидов. Для получения дифракционной картины рекомендуется использовать лазерное, радиоволновое или другое подходящее излучение. Первые эксперименты показали обнадеживающие результаты [19] — выявлены своеобразные "плоские сетки" в структуре гранитов и пегматитов графической структуры. Это новое слово в онтогении горных пород, но знание формы и размеров элементарной ячейки мало или ничего не говорит об анатомии самой ячейки. Такая задача, как уже отмечалось, решается с помощью стереологии путем перевода параметров (элементов структуры) горных пород, доступных для измерения на плоскости, в объемные характеристики, количественно оценивающие пространственные отношения индивидов в агрегате. Это возможно, но при условии применения новых автоматических средств [19].

Измерение элементов структуры горных пород — сложное дело. Особо затруднена количественная оценка формы зерен, да и размеров тоже. А между тем "...размер зерна является мерой реакционной способности или восприимчивости к перекристаллизации минерального агрегата" [296, с.667]. Рекомендуется определять размер зерен измерением длины границ их сечений или их площади, поскольку последняя дает представление о поверхностной энергии индивидов. Изучение формы минеральных зерен проводится в связи с выявлением равновесности структуры минерального агрегата, для чего необходимо измерять линейные и угловые величины между индивидами [102]. Форма равновесных зерен соответствует так называемой ячейке Коксетера — "гибриду" пентагон-додекаэдра и кубооктаэдра (угол между общими ребрами зерен равен 120°).

Специального внимания заслуживает метод выражения формы минеральных зерен, разработанный Р.Эрлихом и Б.Вейнбергом [297]. В шлифе определяются полярные координаты точек на контуре зерна, измеряются длины радиусов-векторов (обычно от центра до периферии зерна) и углы между радиусами-векторами. Затем составляется • соответствующее уравнение и в зависимости от количества измерений рассчитывается количество гармоник: первая отражает симметрию зерна, вторая — относительное удлинение, третья — меру приближения к треугольнику и т.д. Этот метод широко применяется при решении онтогенических задач. Так, авторы метода, изучая границы зерен плагиоклаза и калиевого полевого шпата в разной степени метаморфизованных ортогнейсов, установили, что: а) реакционная способность зернистой структуры зависит от степени метаморфизма; б) "балансирование" поверхностной энергии минерального агрегата и внешней изменяющейся энергии геологических факторов совершается по-разному — рост "старых" зерен, изменение их агрегации и образование новых зерен.

Таким образом, использование стереометрического подхода в исследовании горных пород и руд позволяет принципиально по-новому оценивать их генетические особенности.

В онтогеническом анализе стереологические реконструкции минералогических объектов создают основу для установления их кристаллизационной истории, для выяснения генезиса.

ИЗУЧЕНИЕ АНАТОМИИ МИНЕРАЛЬНЫХ ИНДИВИДОВ

Стереологический анализ, как указывалось, позволяет получить представление об объемном строении агрегатов и минеральных тел, сложенных индивидами. Но этого недостаточно для восстановления пространственно-временной картины минералообразования. Чтобы решить эту задачу, необходимо исследовать анатомию (прежде всего зонально-секториальное строение) минеральных индивидов и поверхности срастания между ними.

Изучение анатомии индивидов — центральное звено в онтогенетическом методе. Анатомия — важнейший источник информации практически при всех минералогенетических построениях, в том числе при восстановлении пространственно-временной картины минералообразования. Принципиально важно и то, что многие качества кристаллов связаны со строением не только атомным, но и более высокого порядка. Поэтому без знания анатомии не может быть полного представления о реальном кристалле — носителе генетических признаков. "Для минералога ...макрокристалл оказался открытой книгой, в которой записана его собственная история и судьбы месторождения. Для кристаллографа это объект проявления, изучения и использования поразительных свойств кристалла, непрерывно революционизирующих науку и технику" [10, с.3].

Еще на первых этапах развития минералогии естествоиспытатели убедились в макроскопической неоднородности минеральных индивидов. Во многих работах тем или иным образом указывалось на внутреннее строение индивидов, "внутреннюю неоднородность", "внутреннюю морфологию", но серьезных попыток найти

в этом определенные закономерности не предпринималось. Наоборот, все внутренние неоднородности рассматривались как аномалии; впрочем, так иногда делается и до сих пор. Только Ф.Бекке [293] обратил внимание на то, что сложение кристалла из пирамид нарастания его граней носит не случайный, а закономерный характер, и этот вывод вошел в минералогию позднее как закон Бекке [265]. Особое внимание пирамидам нарастания граней уделял Г.Г.Леммлейн [160], который наряду с ними выделил еще один важный элемент внутреннего строения кристалла — следы перемещения ребер, разделяющих пирамиды. Интересное исследование зональности было выполнено Н.Н.Шефталем [264], согласно которому кристаллизационная ритмичность и связанная с ней зональность обусловлены главным образом изменением температуры и давления в процессе роста, а не изменением состава среды, как это еще недавно было общепринятым.

Качественно новый этап познания внутреннего строения минералов связан с работами Д.П.Григорьева [67, 73 и др.], который раскрыл закономерный характер внутренних неоднородностей, показал их связь со структурой, морфологией и развитием индивида и сформулировал представление об анатомии минералов. Им же дано определение и сформулированы законы анатомии реальных кристаллов, анатомическое строение которых формируется во время роста (так называемая первичная анатомия) [67]:

1) реальный кристалл сложен пирамидами нарастания граней, поверхностями нарастания ребер и линиями нарастания вершин; пирамиды нарастания разных гранных форм,

поверхности нарастания разных реберных форм, линии нарастания разных вершинных форм химически и физически различны;

2) при росте реальный кристалл приобретает зональное строение, его пирамиды нарастания граней — пластинчатое, поверхности нарастания ребер — полосчатое, а линии нарастания вершин оказываются состоящими из отрезков;

3) при росте реальный кристалл может стать мозаичным во всем объеме или в отдельных частях, и тогда пластинки в пирамидах нарастания граней, полосы поверхностей нарастания ребер и отрезки линий нарастания вершин будут состоять из блоков, несколько повернутых друг относительно друга;

4) при росте части реального кристалла из-за развития в одном направлении приобретают полярность и по симметрии в чем-либо отличаются от кристалла как целого;

5) при росте кристалл обнажает в форме и каких-либо чертах конституции и анатомии только те элементы своей симметрии, которые были общими как для кристалла, так и для питающего пространства.

Для удобства использования мы предлагаем несколько иную, более краткую формулировку перечисленных законов с присвоением им авторских названий:

1) закон перемещения элементов ограничения кристалла (закон Бекке - Леммлейна - Григорьева) — реальный кристалл сложен пирамидами нарастания граней, поверхностями нарастания ребер и линиями нарастания вершин; грани "торможения" не образуют своих пирамид нарастания, точнее, образуют вырожденные в поверхности "пирамиды" нарастания (рис. 6);

2) закон зональности (закон Шефталя) — реальный кристалл внутри всегда зонален вследствие отложения вещества микро- и макрослоями (рис. 7). Соответственно, пирамиды нарастания граней приобретают пластинчатое сложение, поверхности нарастания ребер — полосчатое, линии нарастания вершин состоят из отрезков;

3) закон мозаичности (закон Ерофеева) — при росте реальный кристалл может стать мозаичным во всем объеме или в отдельных своих частях (см. Приложение, рис. LXI). Соответственно, пластинки в пирамидах нарастания граней, полосы поверхностей нарастания ребер, отрезки линий нарастания вершин состоят из фрагментов, не-

сколько повернутых относительно друг друга. Мозаичность кристаллов — это результат их расщепления, которое может приводить к образованию полных сферокристаллов (рис. 8) •,

4) закон полярности (закон Шубникова) — при росте элементы анатомии реального кристалла приобретают полярность вследствие развития в одном направлении и по симметрии чем-либо отличаются от кристалла как целого. Элементами анатомии являющиеся части кристалла, чем-либо отличающиеся друг от друга и располагающиеся внутри индивида соответственно законам анатомии, т.е. пирамиды нарастания граней, пластинки пирамид нарастания (зоны), полосы поверхностей нарастания, блоки и т.д. Примером действия закона полярности могут быть кристаллы кубической сингонии с аномальным двупреломлением;

5) закон диссимметризации (закон Шубникова — Леммлейна — Шафрановского) — при росте кристалл отражает в своей форме и каких-либо чертах конституции и анатомии только те элементы симметрии, которые являются общими для него и окружающей среды. Пример действия закона диссимметризации — искажение идеальных форм кристаллов в гравитационном поле (см. Приложение, рис. LXII), в поле "анизотропного питания", приобретение полярной намагниченности в поле земного магнетизма и т.д.

Для большей полноты охвата элементов анатомии кристаллов предлагаются формулировки еще двух законов;

6) закон вырождения (и регенерации) — при резком изменении формы кристаллов в процессе роста на "неравновесных" поверхностях формируются тела вырождения, имеющие специфические химические и физические свойства. Специфика тел вырождения определяется появлением дополнительных граней (иногда со сложными индексами), "проколов" (каналов), трансляционных вершинных и реберных форм на вырождающихся поверхностях (рис. 9). "Равновесные" грани в период вырождения "неравновесных" почти не растут, как бы ожидая отставшие поверхности. Регенерация частично растворенных, окатанных или обломанных кристаллов — это частный случай изменения формы минеральных индивидов;

7) закон усложнения — при росте кристалл взаимодействует с встре-

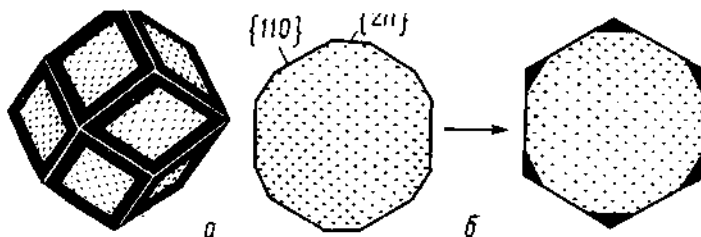
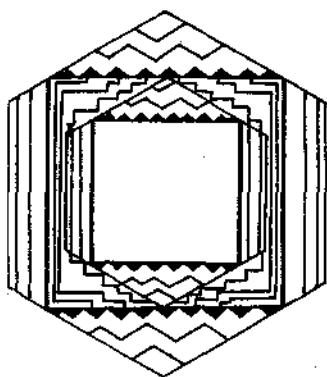


Рис. 9. Формирование тел вырождения при резкой смене формы кристаллов пирита по схеме $\{100\}-\{210\}-\{100\}-\{210\}$

Рис. 11. Схема строения реберных форм на кристаллах граната (а) и их образование (б) при смене формы и состава данного минерала

чающимися твердыми телами с образованием дополнительных элементов, усложняющих его анатомию. Дополнительные элементы анатомии возникают в районе двойниковых швов, случайных и синтаксических вrostков и связаны с образованием "теней" на месте замещаемых минералов (рис. 10), шлейфов за препятствиями, огибаний и утыканий слоев роста и т.д. Существенные аномалии состава и свойств кристаллов наблюдаются в области двойниковых швов и границ синтаксических вrostков. Здесь могут появляться дополнительные грани и особая дислокационная структура кристаллов, ведущие к изменению захвата изоморфных и других примесей. Р.В.Галиулиным зафиксирован факт самого высокого оптического совершенства кристаллов кальцита в районе двойникового шва.

Разные элементы анатомии кристалла, возникающие в процессе его роста, физически и химически различны. Собственно говоря, мы можем их установить или выявить только потому, что они различны. Надо отметить, что поверхности нарастания ребер и линии нарастания вершин еще слабо изучены. Теоретически они бестелесны и вряд ли будут в дальнейшем широко использоваться. Если же в районе ребра или вершины появляются мелкие дополнительные грани, то их передвижение в пространстве оставляет заметный след (рис. 11). Эти элементы анатомии требуют внимательного изучения.

Законы вторичной анатомии (возникшей в ходе преобразования первичной анатомии) еще не сформулированы, однако главные генетические типы анатомических элементов можно достаточно определенно связывать с явлениями: а) самоупорядочения структуры индивида; б) внешнего энергетического воздействия на индивид; в) внешнего вещественного воздействия на индивид.

Самоупорядочение структуры индивидов выражается в движении дислокаций и диффузии атомов в кристаллической решетке. Неупорядоченное распределение дислокаций стремится к упорядоченному - ячеистому, что ведет к блокированию напряженных кристаллов или к перекристаллизации (см. Приложение, рис. LXIII). Самодиффузия атомов в кристаллах (движение диполонов и другие явления) ведет к гомогенизации кристаллов, к исчезновению зональности и секториальности. Морфологические детали этих процессов еще плохо изучены.

Внешние энергетические и вещественные воздействия на кристалл вызывают различные анатомические изменения, вернее, формирование вторичной анатомической картины. Изменение температуры и давления может привести к формированию структур распада твердых растворов (рис. 12), стимулировать диффузию атомов. Магнитные воздействия изменяют строение и распределение магнитных доменов. Механическое воздействие выражается в образовании деформационных текстур (зон напряжений, полос деформации, плоскостей скольжения, механических двойников, трещин хрупкого разрушения и др. (рис. 13)).

Под действием различных излучений меняются характер и распределение окраски в кристаллах, их изотопный состав, валентность атомов, формируются треки движения частиц, изменяется энергетическое состояние атомов и т.д.

Вещественное воздействие на индивид может выразиться в изменении химического состава его путем диффузии атомов. Морфологические признаки наложенных диффузионных явлений надо отличать от первичных ростовых признаков. Укажем, что наиболее общим правилом служит текущее положение элементов вторичной

анатомии по отношению к элементам первичной анатомии минеральных индивидов и агрегатов.

Выявление и изучение анатомии кристаллов представляет огромный научный и практический интерес. Не следует рассматривать индивид только как гомогенное тело. Надо обязательно учитывать неоднородность его внутреннего строения.

Между первичной анатомией, формой кристалла и кристаллической структурой имеется строгое соответствие. Анатомия минерального индивида — это своего рода "кинограмма" его внешней формы, непрерывно фиксирующая ее развитие в процессе роста и взаимодействия со средой.

В минеральных индивидах, как правило, находятся различные включения: твердые, жидкие, газообразные, многофазные. По относительному времени формирования они могут быть прото-, син- и эпигенетическими. Протогенетические включения образовались раньше рассматриваемого индивида и по отношению к нему могут быть индифферентными ("безразличными") или служить ориентирующей подложкой для него.

Сингенетические включения соответствуют по составу и (или) форме рассматриваемому индивиду и могут быть ориентированными по отношению к нему (синтаксические вrostки) или не ориентированными. Наличие синтаксических срастаний все чаще обнаруживается при детальных исследованиях (от макроуровня, например в пегматитах, до уровня в несколько единиц или десятков элементарных ячеек, например в биопириболах, пириболах и т.д.).

Эпигенетические включения возникают в индивиде позднее его образования вследствие распада твердых растворов, метасоматоза и других явлений. Продукты распада твердых растворов очень важно отличать от синтаксических вrostков. Эти типы включений похожи друг на друга ориентировкой в матрице, однако тела распада идиоморфны, в то время как синтаксические вrostки имеют индукционную поверхность (рис. 14). На основе определения продуктов распада в значительной мере строится анализ "изоморфной емкости" минералов и предсказание технологических свойств их. Изоморфная емкость разных пирамид нарастания кристаллов различна, поэтому первичные зональность и секторальность кристаллов отражаются в картине распределения продук-

тов распада твердого раствора в минеральном индивиде (рис. 15).

С соотношением (сложением, суперпозицией) картин первичной и вторичной анатомии минеральных индивидов связана реконструкция онтогенеза минерального индивида и его строения на любой заданный отрезок времени в истории его "жизни". Можно мысленно реконструировать минеральный индивид на период его кристаллизации или на период первой ступени распада твердого раствора, или на период второй (третьей ...) ступени распада, либо на период блокирования после пластической деформации и т.д. Такие индивиды, мысленно реконструированные на какой-нибудь момент их "жизни", мы называем "ретроспективными индивидами" [188]. Их можно использовать в ретроспективном моделировании процессов минералообразования.

Иногда при синтаксии или распаде твердых растворов образуются минералы с очень близкими составами и структурами, когда обычной межфазовой границы между минералами не наблюдается, а имеется более или менее напряженная дислокационная граница с почти непрерывным плавным переходом от включения к матрице. По этим границам минералы почти так же трудно разделить, как части монокристалла. Таковы соотношения в полевых шпатах, пироксенах, амфиболах, слюдах. Иногда такие границы возникают между пироксенами и амфиболами, биотитами и амфиболами и т.д. Не менее сложны случаи медленных полиморфных превращений с одновременным распадом твердого раствора (например, кубический CuFeS_2 с изоморфной примесью цинка - тетрагональный CuFeS_2 + сфалерит в виде "звездочек"). Морфологические детали таких явлений пока слабо изучены.

В.Ю.Эшкин и Т.А.Карякина [271] предложили аналитический способ выражения анатомии кристаллов, позволяющий компактно, с количественными показателями описывать сложные анатомические явления.

Например, формула анатомии сложного кристалла с двумя генерациями кварца может быть выражена формулой

$$\underbrace{\{ \underbrace{\langle A \rangle_a + \langle B \rangle_b + \langle C \rangle_c}_I d \rightarrow \underbrace{\langle C \rangle_f + \langle D \rangle_g}_\text{II} k \}_t}_{\text{Первая генерация}} \rightarrow \underbrace{\{ \underbrace{\langle A \rangle_m + \langle E \rangle_n}_\text{Вторая генерация} p \}_r}_{\text{Вторая генерация}}$$

где A, B, C, D, E — пирамиды роста граней;
 a, b, c, f, g, m, n — объемы пирамид нарастания кристалла (в %); $a + b + c = 100, f + g = 100, m + n = 100, d + k$ — объемы кристалла соответственно I и II периодов первой генерации; $d + k = 100$; l и p — объемы кристалла соответственно первой и второй генераций; $l + p = 100$; стрелкой показана смена периодов и генераций.

Чтобы отразить одновременно эволюцию формы и анатомии кристаллов, В.Ю.Эшкин и Т.А.Карякина предлагают записывать две формулы, одна из которых отражала бы изменение внутреннего строения кристалла, другая — изменение морфологии в разные периоды и стадии роста. Для одного из кристаллов пирита эволюцию секториального строения и изменения в морфологии можно, например, записать так:

$$\frac{[\langle 100 \rangle_a]_b \rightarrow [\langle 111 \rangle_c + \langle 100 \rangle_d]_f \rightarrow}{\begin{matrix} \{100\} \rightarrow \{111\} + \{100\} \\ \rightarrow S \quad \rightarrow S \quad \rightarrow 0 \end{matrix}} \rightarrow [\langle 100 \rangle_k + \langle 111 \rangle_l]_n$$

$$\frac{\rightarrow \{111\}}{\rightarrow S_1} \rightarrow \frac{\{\{111\} + \{100\}\}}{\rightarrow S_2}$$

где S_1, S_2 — площади соответствующих граней; $S_1 + S_2 + \dots + S_i$ — площадь поверхности кристалла; $\rightarrow S$ и $\rightarrow 0$ — площадь грани соответственно увеличивается и уменьшается. Предложенная В.Ю.Эшкиным и Т.А.Карякиной форма записи секториального строения индивидов помогает, во-первых, при расшифровке эволюционного развития процессов минералообразования, наглядно показывая смену условий роста кристаллов (на этой основе облегчается сопоставление времени формирования разных кристаллов соответствующего минерального вида), во-вторых, при количественной оценке качества монокристалльного сырья.

Анатомия индивидов легко выявляется в плоских ориентированных препаратах, если кристаллы имеют видимую неоднородность окраски, пористости, включений (см. Приложение, рис. LXIV). Обычно же для этого требуется специальная обработка или специальные методы наблюдения (см. ниже и гл. III). Остановимся на методах, наиболее часто используемых в практике.

Структурное травление. Методики структурного травления, но преимущественно для непрозрачных минералов, изложены в работах П.Рамдора [305], А.Г.Бетехтина и др. [14], Ю.П.Пшеничникова [206]

и других исследователей. Там же описаны реактивы и опыт их применения. Кроме выявления структуры минеральных агрегатов, этот метод позволяет увидеть элементы анатомии индивидов.

В.И.Попова и Б.В.Чесноков [198] применили электролитическое травление кристаллов пирита методом тампона. Электролитическое полирование или травление производилось переменным током силой 0,5 — 2,5 А при рабочем напряжении 5 — 10 В в течение 0,5 — 10 мин. Электролит представлял собой смесь ортофосфорной, хромовой, соляной кислот и воды в соотношениях: 1) 4:1,5:7:1; 2) 3:0,8:5:1,2; 3) 3:1:5:2; 4) 1:2:4:0; 5) 1:0:1:1; тампон — колпачок из амфибол-асбестовой ткани, который надевается на коническую часть электрода из нержавеющей стали. В кристаллах пирита выявлены зональность, смена форм во времени (см. Приложение, рис. LXV), блочность, дробление, растворение и регенерация (рис. LXVI). Этим способом часто выявляется теневая структура замещающей породы, если изучаются метакристаллы. На Березовском месторождении в метакристаллах пирита часто "просвечивает" структура замещаемого субстрата — березита, гранит-порфира, жильного кварца. А.Ф.Бушмакин в метакристаллах пирита наблюдал теневую структуру черных сланцев Якутии (рис. 16). Очевидно, что "тень" замещаемого субстрата — наиболее наглядный признак образования кристаллов метасоматически (метакристаллов).

Интересные результаты по онтогении магнетита получены В.Н.Сергеевым [218, 219 и др.] методом травления в плавиковой кислоте. Им выявлены зональность, секториальность кристаллов, скелетный рост, смена форм и другие особенности (см. Приложение, рис. LXVII, а, б), по которым была восстановлена история кристаллов и агрегатов этого весьма полезного минерала. Заслуживают внимания также выявляемые этим методом анатомические картины сдвойниковых кристаллов кварца (см. рис. LXVII, в, г), позволяющие не только диагностировать закон двойникования, но и видеть распределение внутри кристалла двойниковых границ, которое отражает соответствующие условия роста кристаллов [172].

На минеральных индивидах часто встречаются признаки природного травления (растворения) минералов (рис. 17). Искусственно подбирая растворители и тер-

модинамические условия, можно моделировать природное растворение, а также получать важную информацию об анатомической картине индивидов (работы В.Г.Фекличева, Г.В.Клещева, Ю.М.Дымкова).

Ионизирующее облучение. Обзор методов облучения в связи с исследованием и использованием самоцветов сделан недавно А.Н.Платоновым с соавторами [181]. Они показали, что в практических целях широкое применение находят установки гамма-облучения с радиоактивным изотопом ^{60}Co . Лучи обладают высокими энергиями и большой проникающей способностью. Продолжительность облучения до насыщения потенциальных центров окраски в зависимости от мощности источников изменения от нескольких минут до 3 ч. Размер образцов может быть самым разным (до десятков сантиметров). Вторичной радиоактивности образцов не возникает. Наиболее яркие и интересные результаты получены этим методом (гамма-облучением) для кварца. В.С.Балицким, В.В.Букановым, Т.А.Карякиной, А.М.Асхабовым, нами и многими другими исследователями изучены анатомические картины природных и искусственных кристаллов кварца, выявлены детали механизма роста, обнаружены неоднократное дробление, растворение и регенерация кристаллов, описаны закономерности изменения цвета от ранних генераций кварца к поздним и др.

Одним из наиболее информативных методов, взятых в последнее время на вооружение минералогами, является нейтронно-активационная радиография [194]. Активация объектов достигается путем облучения нейтронами. Радиография заключается в регистрации радиоактивного излучения объектов на фотоматериалах. Метод применим к очень широкому кругу объектов и позволяет в зависимости от выбранного режима облучения анализировать последовательно получаемые картины распределения различных изотопов соответственно периодам их полураспада. Облучение можно производить в ядерных реакторах или искусственными источниками нейтронов. В.И.Попова использовала поток тепловых нейтронов $(3-8)10^{10}$ нейтр./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ и получила радиографии нескольких десятков минералов (см. Приложение, рис. LXIX), в большинстве которых проявились зональность и секториальность состава индивидов. Не установлено особых деталей анатомии в районе поверхностей нарастания ребер и линий нарастания вершин.

Анализ радиографий циркона показал, что примеси не оказывали существенного влияния на форму его кристаллов, что границы зон с разными элементами-примесями не совпадают и что по некоторым элементам секториальности в кристаллах нет.

Оптические исследования. В познании анатомии кристаллов большая роль отводится оптическим наблюдениям в ориентированных сечениях. Такие наблюдения проводятся очень давно — с момента появления микроскопа. Благодаря им стали известны, например, аномальное двупреломление, аномальная двуосность, различие оптических свойств кристаллов не только в разных зонах роста, но и в пирамидах нарастания граней разных простых форм,

Наглядную диссимметризацию в кристаллах эвдиалита показал Д.П.Григорьев (см. Приложение, рис. LXX). Сложная зональность и секториальность оптических свойств обнаружена Н.П.Юшкиным в везувитане (см. Приложение, рис. LXXI). Зональность и секториальность граната, а также еще более сильную диссимметризацию отмечал в оптических свойствах Н.Т.Кулкашев [147]. Уникальная оптическая чистота обнаружена Р.В.Галиулиным в области двойникового шва анатомии кальцита. Многократно описаны зональные по оптическим свойствам плагиоклазы, зональные и секториальные кристаллы титанавгита, касситерита, турмалина и других минералов. Методики оптических наблюдений большей частью общеизвестны. Некоторые специальные приемы изложены в работах В.Г.Фекличева [237, 238]. Этим же автором подробно описаны оптические аномалии в берилле. Возможности получения анатомических картин индивидов расширились в связи с использованием микрозондов. Но и ограничения их существенны: полную картину анатомии можно получить для сравнительно небольших индивидов, для которых трудно изготовить ориентированные сечения.

Применение комбинации различных способов анатомирования индивидов обычно дает больший эффект, чем использование одного метода (например, травление и нейтронно-активационная радиография, катодолюминесценция и микрозондовые исследования и т.д.). Важные результаты получены [209] при исследовании анатомии кристаллов пренита. Фактически в одном его индивиде обнаружен весь спектр оптических свойств и состава, отмечавшихся в нем ранее. И это не исключительный случай.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ СОПРИКОСНОВЕНИЯ МЕЖДУ ИНДИВИДАМИ

Исследование поверхностей соприкосновения (срастания) индивидов необходимо главным образом для определения их относительного возраста. Для этого устанавливаются общий рисунок границ между индивидами, отражающий геометрию агрегата, а также морфология поверхностей соприкосновения, отражающая их природу. Для изучения названных поверхностей эффективны методы гониометрии, фотогониометрии, растровой электронной и световой микроскопии, а также визуальные наблюдения, с помощью которых можно получить принципиально важную для онтогенетического анализа информацию: какова поверхность срастания — гранная, ксеноморфная или индукционная. Индукционные поверхности необходимо оценивать количественно

(кристаллографическая ориентировка, форма и размеры индукционных ступенек), после чего можно переходить к оценке скоростей роста.

Поверхности соприкосновения минеральных индивидов изучают с разной степенью детальности и для решения разных задач — генетических, морфологических, технологических. Приемы исследования такого рода поверхностей изложены в работах И.И.Шафрановского [256, 258, 260], В.Г.Фекличева [237, 238], Г.И.Доливо-Добровольской [83] и др.

Для определения онтогенеза минеральных индивидов или агрегатов прежде всего важно знание происхождения поверхности (рис. 18). Ниже даем классификацию поверхностей минеральных индивидов (табл. 5) и комментарии к ней.

ПЕРВИЧНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ

Идиоморфная поверхность — собственная (ростовая) поверхность кристаллов (гранные формы, скелеты, анти-скелеты, многоглавые регенерационные формы и др.). Определить идиоморфную (как и любую другую) поверхность можно только при объемных исследованиях, специально "рассматривая ростовую скульптуру индивида. Не рекомендуется употреблять термин *идиоморфный* в сравнительной степени (этот индивид "идиоморфнее", чем тот): первичная поверхность может быть только идиоморфной, ксеноморфной, индукционной или комбинационной (часть поверхности относится к одному классу, часть — к другому). Идиоморфной может оказаться сложная поверхность сильно растворенного индивида с последующей (слабой) регенерацией. Сложной и извилистой границей могут обладать в сечении блочные, многоглавые, расщепленные и

скелетные кристаллы. Однако это не всегда надежный признак ксеноморфизма: надо отпрепарировать и изучить поверхность объемно. Могут встретиться сложные случаи, когда на макроуровне поверхность относится к одному классу, а на микроуровне — к другому. Например, на макроуровне — индукционная поверхность, на микроуровне — идиоморфная (регенерационная).

Ксеноморфная поверхность — поверхность отпечатывания чужой формы (см. рис. 18, в). Обычно она не бывает точным антисимметричным отражением чужой формы. Антисимметричность ее существует лишь на макроуровне. Термин *ксеноморфный* нередко в геологической и петрографической литературе интерпретируется как синоним термина *аллотриоморфный*. Анализ использования этих терминов показал, что исследователи упот-

Таблица 5. Генетическая классификация поверхностей минеральных индивидов

Поверхность индивида			
Первичная (ростовая)	Вторичная	Перекристаллизационная	Комбинированная
Идиоморфная Ксеноморфная Индукционная	Растворения Оплавления Окатывания Дробления Пластической деформации (реоморфная)	Рекристалломорфная Грануломорфная (полиэдрическая)	Теоретически возможна любая комбинация первичных, вторичных и перекристаллизационных поверхностей

ребляют их там, где в плоских сечениях агрегата (шлифе, аншлифе) индивиды не имеют ровной, кристаллографически определенной границы. Однако индукционные поверхности тоже не идиоморфны, но это не означает, что их надо относить к классу ксеноморфных (аллотриоморфных) поверхностей. В действительности чаще всего ксеноморфные поверхности путают с индукционными.

Индукционная поверхность — компромиссная поверхность, возникающая в процессе "борьбы" за пространство двух или более одновременно увеличивающихся в объеме индивидов. А.Е.Ферсман сформулировал закон кристаллографической индукции для одновременного совместного роста кристаллов минералов: "...разграничение двух одновременно кристаллизующихся веществ определяется цилиндрически искривленной поверхностью, образуемой ритмическим перемещением ребра между двумя возможными в месте соприкосновения гранями того и другого вещества" [242, с.651]. А.Е.Ферсман исключительно точно охарактеризовал возникающую индукционную поверхность как цилиндрически искривленную (для совместного роста плоскогранных кристаллов линия пересечения граней является прямой, которая перемещается в пространстве параллельно себе самой). По современным представлениям, индукционная поверхность весьма сходна с "поверхностью" [262], разделяющей пирамиды нарастания разных граней в самом кристалле, т.е. с поверхностью, образованной ребром между двумя гранями при росте кристалла (рис.19).

Элементы строения индукционной поверхности имеют свои названия — псевдогрань, псевдорребро, индукционная грань (рис. 20). Кристаллографическую индукционную поверхность частично можно описать в рамках геометрической кристаллографии, поскольку линия пересечения двух граней, образуемая при перемещении в пространстве поверхность псевдограницы, может быть представлена на стереографической проекции сростка в виде оси пояса [104]. Часть поверхности псевдограницы может давать сигнал на гониометре, т.е. может быть представлена так называемыми индукционными гранями, которые, строго говоря, не являются результатом одновременной кристаллизации соприкасающихся индивидов. Чаще всего индукционные грани возникают на псевдогранице при более поздней частичной перестройке поверхности в межзерновом пространстве. Б.В.Чесноков заметил, что при совместном одновременном выращивании кристаллов квасцов с хорошим перемешиванием пересыщенного раствора можно получить два разных результата в строении индукционных поверхностей. Если выращенный сросток сразу вынуть из раствора, фильтровальной бумагой снять оставшиеся капли и разделить индивиды, то на них видны как бы матовые псевдограницы, на которых нет блестящих площадок (индукционных граней). Если сросток кристаллов дать возможность постоять некоторое время в насыщенном растворе, то псевдограницы несколько преобразуются — на них появляются блестящие фрагменты, дающие сигнал на гониометре и располагающиеся в одном поясе на стереографической проекции. Эти фрагменты псевдограней и были названы индукционными гранями, которые в общем случае не следует относить к поверхностям одновременного роста. Их надо относить к комбинированным поверхностям: макроуровень — индукционная поверхность (псевдогрань), микроуровень — сочетание фрагментов кривой цилиндрической поверхности с фрагментами идиоморфной поверхности ("индукционные грани"). Надо отметить, что слабая регенерация индукционных поверхностей — явление исключительно широко распространенное и многократно описанное.

А.Е.Ферсман прекрасно понимал этимологическую условность введенного им термина "индукционная поверхность", "...так как оба одновременно кристалли-

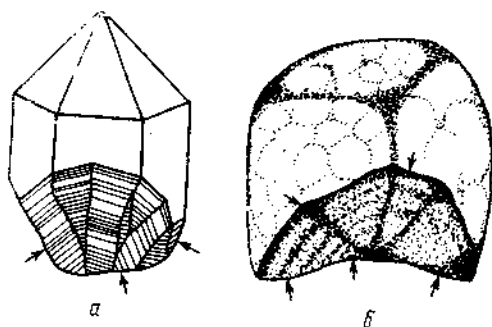


Рис. 20.

Элементы индукционных форм на кристаллах, росших плоскими (а) и округлыми или более сложными "гранями" (б).

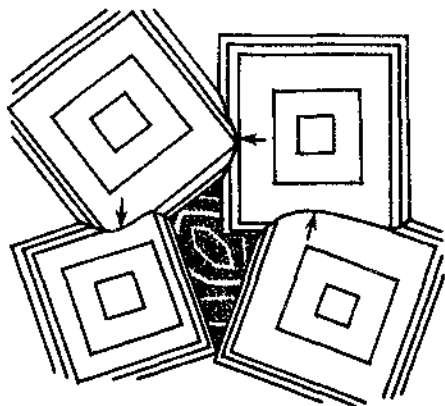
Стрелками показаны псевдоребра, разделяющие псевдограницы, на которых имеются резкие или плавные перегибы

зующихся тела влияют друг на друга" [242, с.645]. Таким образом, нет "наведения", "особого влияния" одного кристалла на другой. Суть индукционной поверхности состоит в одновременном "захвате" пространства двумя соприкасающимися и увеличивающимися в объеме индивидами. Геометрия возникающей поверхности раздела полностью определяется геометрией соприкасающихся тел и относительными скоростями их увеличения в различных направлениях в месте соприкосновения.

Известно, что минеральные индивиды могут расти не только в виде плоских многогранников (объектов классической кристаллографии), но и в виде скелетов, антискелетов, расщепленных, блочных кристаллов, сферокристаллов, твердых гелей и т.д. Отметим также, что синхронно могут

Рис. 21.

Выход зон роста кристаллов на индукционную (светлые кристаллы с темными зонами) и на ксеноморфную (темный индивид со светлыми зонами - в центре) поверхности



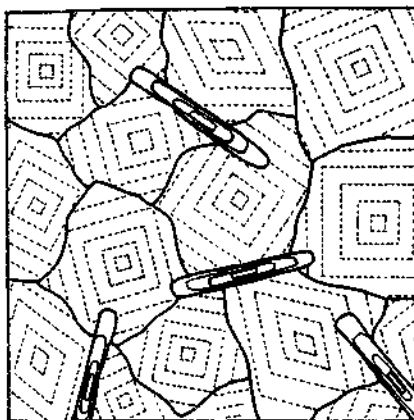
расти гигантские индивиды (например, с грубыми меандрирующими слоями роста) и очень мелкие кристаллы. Индукционные поверхности между такими объектами минералогии уже невозможно описать в рамках классической кристаллографии. Надо привлекать геометрию. Поэтому закон индукции целесообразно расширить до закона минералогической индукции: если два (или более) минеральных тела совместно и одновременно увеличиваются в объеме, то в месте их соприкосновения возникает индукционная (компромиссная) поверхность, форма которой определяется соотношением скоростей передвижения поверхностей рассматриваемых твердых тел в различных направлениях.

Из данного определения следует, что индукционные поверхности можно устанавливать в любых случаях. Важно подчеркнуть, что на образование таких поверхностей не оказывает влияние "кристаллизационная сила", или "кристаллизационная способность", минералов.

Ранее для доказательства наличия индукционной поверхности требовались гониометрические исследования, в нашем рассмотрении подчеркивается, что в общем случае на индукционной поверхности не обязательны индукционные грани. Следовательно, вместо казалось бы строгого кристаллографического "доказательства" предлагаются общие геометрические образы. Здесь можно сослаться на аналогии: биолог не описывает строго математически форму

Рис. 22.

Кажущийся идиоморфизм индукционных поверхностей при срастаниях изометричных кристаллов с анизометричными (плоскими, игольчатыми)



пальца, носа, головы и т.д., но оперирует их функциями, их образами и легко узнает. То же делает минералог: постоянно работая с первичными поверхностями на минеральных индивидах - идиоморфной, ксеноморфной и индукционной, он узнает их, оперируя образами, даже в сложных случаях. Можно рекомендовать также общую проверку "индукционности" поверхностей через анатомию кристаллов: зоны роста всех индивидов выходят на индукционную поверхность (т.е. как бы срезаются ею) (рис. 21).

Индукционные поверхности, пожалуй, самый трудный и больной вопрос в расшифровке последовательности кристаллизации минералов. Поэтому мы акцентируем внимание на практических аспектах интерпретации поверхностей. Можно сформулировать такое правило: если совместно и одновременно кристаллизуются изометричные и резко неизометричные (сильно

удлиненные или уплощенные) индивиды, то возникает индукционная поверхность, очень близкая по положению к идиоморфной у неизометричных кристаллов (рис. 22). Такая поверхность часто при быстром просмотре или при исследовании в плоских сечениях неверно интерпретируется. Например, синхронный с изометричным кварцем игольчатый турмалин кажется идиоморфным (рис. 23), так же, как пластинчатый биотит с изометричным полевым шпатом (рис. 24). При совместном одновременном росте гигантских или крупных индивидов с мелкозернистой (наслаивающейся) массой могут возникать индукционные поверхности нескольких порядков.

Индукционные поверхности совместно с одновременного роста имеют одинаковые морфологические проявления как при росте минералов в полостях, так и при метасоматическом росте (в метасоматических и метаморфических породах) (рис. 25).

ВТОРИЧНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ

Реоморфная поверхность -- поверхность минеральных индивидов, перетерпевших пластическую деформацию (реологическое состояние). Очевидно, что любые поверхности в процессе реологии могут быть гомологически преобразованы в реоморфные. Например, при пластической деформации (реологии) горной породы кристаллы механически сдвойниваются (рис. 26), катятся, царапают друг друга, развальцовываются, дробятся, аморфизуются и растворяются на поверхности. В полости, инкрустированные достаточно жесткими минералами, иногда вдавливаются пластичное вещество из соседних участков. Б.В.Чесноков [250] описал экструзию кристалла галенита в полость, инкрустированную кварцем, а также пластическую деформацию галенита в районе газово-жидких включений, близких к поверхности кристаллов. Вообще же реоморфные поверхности и их фрагменты исключительно широко распространены, поскольку очень редко можно встретить горные породы, не претерпевшие пластических деформаций.

Поверхности растворения — следствие воздействия растворов и газов — достаточно часты. Общей их особенностью в анатомии кристаллов является "срезание" элементов первичного ростового строения, видимого в сечении индивидов, образование конусной макро-

скульптуры поверхности (см. Приложение, рис. LXXII), каналов и щелей растворения вдоль винтовых и краевых дислокаций, границ блоков и т.д. Растворение, как правило, начинается с периферии кристаллов и вдоль трещин. Наглядно поверхности растворения можно изображать с помощью фотогониометра [47]. На поверхностях оплавления не отмечена конусная макроскульптура, на них нет каналов растворения, имеются мелкие конусы взрыва перегретых включений.

Поверхности дробления легко узнаются в процессе исследований, поскольку индивиды имеют характерные морфологические признаки обломков, а сами поверхности представляют собой плоскости спайности, отдельности, поверхности "раковистого излома" или еще более сложной формы. Значительно труднее определять поверхности окатывания и отличать их от поверхностей округлых индивидов другого происхождения. Поверхность окатывания "срезает" первичную ростовую анатомию. На микроуровне она всегда шероховата со следами ударов и царапания. Если поверхность окатывания в дальнейшем преобразована явлениями реологии, регенерации или растворения, то требуется системный анализ агрегата, чтобы правдоподобно объяснить ее происхождение.

ПЕРЕКРИСТАЛЛИЗАЦИОННЫЕ ПОВЕРХНОСТИ

Чтобы описать поверхности полиэдров перекристаллизации, необходимо хотя бы кратко изложить суть процессов перекристаллизации в нашем понимании. К явлениям собственно перекристаллизации будем относить изменения формы и размеров кристаллов, всесторонне соприкасающихся с другими кристаллами без изменения фазового состава системы [188].

Перекристаллизация всегда начинается с рекристаллизации, т.е. в напряженных (несовершенных) индивидах зарождаются новые более мелкие ненапряженные индивиды этого же минерала (рис. 27). Они растут за счет напряженной матрицы, "съедая" сначала самые деформированные (аморфизованные) участки. До соприкосновения друг с другом вновь образованные индивиды в сечении обычно имеют сложную форму. После соприкосновения начинается изометризация индивидов, образуются "некристаллографические" полиэдры перекристаллизации (рис. 28). Их поверхности достаточно сложно описывать математически и кристаллографически. "Грани" полиэдров в общем случае не совпадают с кристаллографически возможными гранями индивидов; они плавно изогнуты, поэтому им нельзя дать какой-либо символ. Такую поверхность следует называть г р а н у -

л о м о р ф н о й (гранула-полиэдр перекристаллизации). Можно, конечно, говорить о некотором приближении (стремлении?) полиэдров перекристаллизации к математическому образу — "ячейке Коксера" [104]. Однако подчеркнем, что реальные агрегаты перекристаллизации всегда состоят из гранул-полиэдров, имеющих изогнутые поверхности "граней" при большой гомогенности и совершенстве внутреннего строения. Практически это выражается в отсутствии ростовой зональности и секториальности полиэдров, расщепленности, блочности и скрученности их.

Несмотря на отсутствие наглядного математического (или кристаллографического) аппарата описания приведенных генетических типов поверхностей, минералог сможет их различать на уровне образов, заданных описанием экспериментальных данных. Такое состояние рассматриваемого вопроса не следует считать временными затруднениями, поскольку образное мышление является вполне научным. Комбинируя данные наблюдений поверхностей кристаллов и их анатомии, в большинстве случаев можно весьма надежно решать генетические вопросы минералогии. Внедряемые в минералогию методы стереометрии (см. гл. IV) позволяют вводить в эти исследования количественную оценку формы минеральных индивидов.

ВЫЯВЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ВЗАИМООТНОШЕНИЙ МЕЖДУ МИНЕРАЛАМИ

Онтогенические исследования призваны дать ответ на вопросы: что в исследуемом объекте сформировалось раньше, что позже, что одновременно? Эта методическая проблема разрабатывалась специально [76, 90, 188, 250, 282], тем не менее она все еще недостаточно решена, несмотря на исключительную важность пространственно-временных взаимоотношений в онтогенических построениях. Эти исследования неоправданно отстают от изучения конституции и свойств минералов. Сравнивая современное состоя-

ние исследований в области диагностики минералов и в области восстановления кристаллизованной истории, В.И.Степанов [230] оценивает воспроизводимость (степень объективности) первых примерно в 70 %, а вторых - лишь в 5 %, подчеркивая при этом, что "...в области изучения последовательности кристаллизации рудных минеральных ассоциаций мы почти не имеем основной особенности науки - преемственности знаний" [230, с.5].

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ВРЕМЕНИ В МИНЕРАЛЬНОМ ОБЪЕКТЕ

В первичной анатомической картине минеральных индивидов и агрегатов всегда имеется зональность, образующаяся вследствие послойного отложения минерального вещества (см. Приложение, рис. VI1-XI) [23-29]. Как следует из закона Стенона, покрывающий слой хронологически моложе подстилающего. Для кристаллов, следовательно, центральные зоны роста являются более ранними, чем внешние.

Возрастные (хронологические) соотношения соприкасающихся минеральных тел можно определить путем изучения поверхностей их соприкосновения. В основе перевода пространственных взаимоотношений в хронологические лежат следующие законы и принципы.

1. Закон минералогической индукции (в частных случаях — кристаллографической индукции [240]). Одновременное увеличение в объеме двух или более твердых, жестко закрепленных относительно друг друга, со-

прикасающихся тел ведет к обязательному формированию между ними индукционной (компромиссной) поверхности.

2. Закон послойного наращивания минерального вещества. Если минеральное вещество отлагается в виде слоев (зон в кристаллах, моно- или полиминеральных зон в полосках, слоев в осадках), то общее свойство его — симметрия конуса (стрелы, вектора), проявляющаяся в направленном изменении каких-либо характеристик минерального вещества перпендикулярно к слоям. Направление вектора совпадает с необратимым "ходом" времени. Определение направления вектора в минеральном индивиде облегчается наличием центра и периферии кристалла, в минеральном агрегате — проявлениями силы тяжести, геометрическим отбором и другими реперными характеристиками.

3. Принцип нарушенного целого. Любой объект представляет собой нечто целое, а нарушение (разруше-

ние) его возможно только после возникновения целого. Следовательно, все, что "сечет" (нарушает) целое, надо считать более поздним. Секущими могут быть трещины с минеральным выполнением, метакристаллы (рассекают анатомическую картину предшествующего твердого тела), псевдоморфозы (рассекают, уничтожают анатомическую картину протокристаллов), полосы скольжения или перегиба в кристаллах и т.д.

4. Принцип трансформации. Любой объект может быть трансформирован (преобразован) после его возникновения. Следовательно, преобразованный объект более поздний по отношению к непреобразованному (первичному). К преобразованиям относятся перекристаллизация, пластическая деформация, полиморфные превращения, распад твердых растворов и т.д.

Значительно сложнее построить топологическую структуру времени пространственно разобщенных (несоприкасающихся) минеральных тел (например, при картировании генераций минералов). Выявление отношений одновременности и временного порядка называется синхронизацией минеральных образований [192]. Имеет смысл синхронизировать несоприкасающиеся минеральные образования, относящиеся к одной системе (например, "сообщающихся сосудов") в пределах рудного поля или месторождения. Синхронизация минеральных объектов разных систем — геологическая (а не минералогическая) задача.

Для несоприкасающихся минеральных объектов операция синхронизации состоит из некоторой последовательности действий. Сначала "сложный" геологический объект расчленяется на "простые" объекты по относительному времени их возникновения, т.е. строится топологическая мегаструктура времени объекта. Эту операцию можно назвать "мелкомасштабной синхронизацией". Ей обычно соответствует построение стратиграфической колонки к геологической карте, куда вынесен также

относительный возраст магматических, вулканических тел и разломов.

Далее на основе закартированных (задокументированных) пересечений строится топологическая структура времени развития типов минерализации. Это уже более крупномасштабная, более детальная синхронизация объектов. Типы минерализации обычно развиты в определенных элементах структуры геологического объекта, что позволяет предполагать систему "сообщающихся сосудов".

Теперь можно переходить к синхронизации достаточно мелких минеральных тел вплоть до отдельных индивидов одной генерации минералов. На этой стадии исследований синхронизацию целесообразно проводить на основе принципа последовательности появления и изменения признаков: инвариантное свойство продуктов минералообразования в различных участках системы "сообщающихся сосудов" — это последовательность появления и изменения признаков, отражающих физико-химические условия кристаллизации минералов.

Желательно процедуру синхронизации минералов и минеральных комплексов всегда проводить в полном объеме, не упуская из виду мелкомасштабные работы. Метасоматиты или рассеянные метакристаллы могут находиться в слабо заметных секущих трещинных структурах, причем часто развиваются разновременные, но сходные типы минерализации. Поэтому важна достаточная полнота онтогенетических наблюдений и использование принципа последовательности появления и изменения признаков. Естественно, сами признаки плавно или резко фациально изменяются в пространстве системы.

Теперь рассмотрим процедуру восстановления пространственно-временных взаимоотношений в минеральном индивиде, агрегате и полиагрегатном минеральном теле.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ВЗАИМООТНОШЕНИЙ В МИНЕРАЛЬНОМ ИНДИВИДЕ

Выявление пространственно-временных взаимоотношений частей минерального индивида не вызывает затруднений. Оно основано на анализе зональности, к которой

применим главный принцип стратиграфии: каждый покрывающий слой моложе подстилающего. Необходимо, конечно, учитывать возможное искажение последователь-

кости зон наложенными процессами замещения, перераспределения вещества, диффузии и др. Нужно иметь в виду, что и первичная зональность может иметь разную природу (связана с колебаниями параметров минералообразующей среды, с автоколебаниями системы минерал - среда, эволюционная зональность, диффузионная и др.).

Вторичные анатомические элементы (локальные, линейные, плоскостные, объемные) генетически могут быть связаны с самоупорядочением структуры индивида, с внешним энергетическим воздействием на индивид.

Анатомическое строение минеральных индивидов документируется фотографированием, зарисовкой. Для количественной характеристики применяются несложные измерительные методы: микрофотометрирование, если изучается плотность окраски или другие свойства, которые можно выразить через плотность (например, плотность почернения на негативе), профилометрирование, если изучается рельеф травления.

Соответствующие фотограммы или профилограммы зональности представляют собой кривые изменения во времени качества минерала, определяющего зональность (содержание примесей, дефекты упаковки и т.д.). Существуют способы, как мы уже отмечали, аналитического выражения анатомии индивидов [271].

По зональности можно восстановить историю ростовых событий и выделять наложенные, более поздние анатомические элементы, связанные с изменением индивидов. Корреляция последних проводится на основе анализа взаимоотношений и отношений с первичными (ростовыми) анатомическими элементами.

Используя анатомические элементы минеральных индивидов для пространственно-временных исследований, необходимо учитывать их важнейшую особенность: зональность и секториальность в кристалле в общем случае носят многопорядковый характер. Это означает, что зональные картины по разным компонентам в пространстве пирамид нарастания граней разных простых форм кристаллов могут не совпадать друг с другом (рис. 29), что одни компоненты могут давать секториальную картину, другие — нет (рис. 30), что в одних пирамидах нарастания наблюдается расщепление кристалла, которого в других нет, и т.д. Следовательно, само членение событий по данным анатомии кристалла

зависит от того, какими методами и что именно мы сумеем получить в анатомической картине индивида.

Анатомические картины кристаллов, полученные разными методами, вообще говоря, различны. Чтобы не рассматривать все возможные комбинации в анатомии кристаллов, надо ставить конкретные задачи перед исследованием. Например, если мы хотим проследить смену формы кристаллов пирита в процессе их роста, то часто бывает достаточно травления его в ориентированных сечениях. Если необходимо рассмотреть историю индивида пирита с точки зрения захвата им примеси мышьяка, то надо в ориентированных сечениях исследовать распределение мышьяка (микронным или нейтронно-активационным радиографическим методом).

И картина распределения мышьяка в кристалле пирита может совершенно не совпадать с картиной смены форм. Следовательно, по форме кристалла мы "напишем" одну историю последовательности событий, а по распределению мышьяка — другую. Итак, история индивида многообразна, и задачи исследования определяют, какую ее часть мы восстанавливаем.

На анатомии индивидов отражаются не только физико-химические условия кристаллизации, но и действие силы тяжести (минералогические отвесы и уровни), направление движения питающих сред, положение электрических и магнитных полей (используется, например, в палеомагнитных реконструкциях). В кристаллах, выросших путем замещения твердой среды (метакристаллах), всегда есть "тень" замещенного твердого тела. Эта тень проявляется в химическом составе метакристалла или в текстурных деталях анатомии. Обязательность наличия тени определяется самим механизмом роста метакристаллов: в твердой среде всегда есть неоднородности состава, структуры, трещиноватости, которые закладываются в том или ином виде в метакристалл. Другой вопрос: каким методом вскрыть эту "тень" в анатомии индивида? Он относится уже к области методических и технических возможностей. Расшифровка "теней" исключительно важна в истории индивида, а их обязательность следует из закона: в анатомической картине метакристаллов всегда есть дополнительные элементы, отражающие состав, структуру и другие неоднородности замещенного твердого тела (см. 7-й закон анатомии кристаллов, гл. 7).

При восстановлении истории минерального индивида, кроме собственно анатомического строения, используются также (и особенно широко в случае кристаллов) данные по изменению формы минералов. Изменение формы может быть резким (революционным) или постепенным (эволюционным).

Эволюционная смена габитуса — это следствие постепенного изменения соотношения площадей повторяемо растущих граней разных простых форм на кристаллах. Постепенность изменения может быть постоянной, плавной, однонаправленной или разнонаправленной. Такое изменение соответственно отражается на индукционных поверхностях рассматриваемого и окружающих кристаллов. Хорошо заметно плавное изменение формы кристаллов и по скульптуре граней: на медленно растущих гранях бугры роста и вицинали редкие и пологие, на быстро растущих гранях — многочисленные и грубые. Например, на гранях призмы $\{1010\}$ и пинакоида кварца в условиях быстрого роста появляется интенсивная скульптура при практически плоских блестящих гранях основных ромбодров.

Революционная смена формы происходит скачком. На ранее существовавшей поверхности неравновесных теперь граней появляются трансляционные вершинные формы (многоглавость), трансляционные реберные формы (штриховка вырождения — рис. 31—34), грубые скульптурные усложнения. Многие штриховки на кристаллах обязаны своим происхождением резкой смене формы кристаллов во времени.

Морфологически резкая смена формы у плоскогранных кристаллов полностью соответствует явлению регенерации кристаллов, теорию которой в последнее время существенно развил А.М.Асхабов [3]. В кинетическом отношении эти явления также одинаковы: равновесные новым условиям грани почти не растут до тех пор, пока не исчезнут (выродятся) неравновесные грани (поверхности). В период изменения формы существенно меняются диффузионные и конвективные поля массопереноса. Внутри кристаллов формируются тела вырождения неравновесных поверхностей, физически и химически отличающиеся от пирамид нарастания равновесных граней. Работами В.А.Попова [187, 188], С.К.Кузнецова [145, 146] и других исследователей созданы методики для

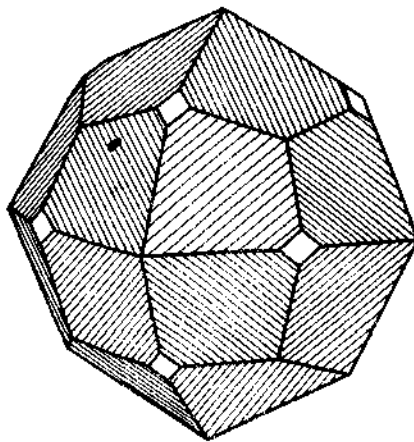


Рис. 31.

Трансляционные реберные формы яри вырождения $\{211\}$ — $\{110\}$ граната

учета революционных, скачкообразных событий в минералогенетических процессах.

Специфика тел вырождения неравновесных поверхностей в кристаллах обусловлена деталями формы образующейся поверхности вырождения, на которой кроме "ступенек" равновесных граней образуются дополнительные грани и некоторое время существуют исходные поверхности. В телах вырождения и регенерации обычны значительная дефектность кристаллов, напряженная дислокационная структура. Одни и те же вырождающиеся поверхности в разных условиях кристаллизации ведут себя по-разному. В связи с этим необходимо уметь отличать поверхности вырождения и регенерации от других поверхностей на кристалле и определять, какая форма в какую преобразуется. Эту задачу приходится решать не только по внешнему виду кристалла, но и по характерному строению тел вырождения.

Появление трансляционных вершинных и реберных форм во многих случаях связано с резким изменением формы кристаллов во времени. Постепенное изменение формы кристаллов узнается в основном по их анатомии. Следует также помнить, что штриховка вырождения имеет черты сходства со штриховкой волокнистого роста.

Обычно наблюдаемые многоглавые кристаллы или параллельные сростки являются результатом скелетного роста или изменения формы. Отличать смену формы от скелетного роста в анатомической картине очень важно, так как от этого зависят построения в исследовании закономерностей эволюции формы кристаллов на место-

рождениях. Такие построения привели ученых к созданию универсальных рядов эволюции форм кристаллов на рудных месторождениях. Например, для кальцита они разработаны Г.Кальбом и дополнены Р.М.Алиевым [2], для касситерита, анатаза и пирита — Н.З.Евзиковой [96]. Известны такие ряды для кварца, барита и других минералов [142]. Специальное рассмотрение этого вопроса показало [188], что природные минеральные объекты более или менее сложны в отношении последовательности событий минералообразования, для каждого объекта характерны свои ряды изменения формы кристаллов минералов, которые частично могут быть похожими на "универсальные" или существенно отличаться от них. Следовательно, только наблюдения и картирование форм кристаллов минералов на объекте дают возможность устанавливать конкретные закономерности их изменения в пространстве и времени.

Об относительном возрасте индивидов, их частей, особенно крупных кристаллов можно судить и по особенностям включений минералообразующей среды [130, 160]. В частности, методом перенаполнения [129] включений обосновывается порядок их образования в минеральных индивидах. При этом учитывается положение о том, что ранние выделения (зоны, генерации, кристаллы) содержат или могут содержать все включения, находящиеся в более поздних выделениях минерала. Например, в высокотемпературном сотовом кварце установлены все ранневторичные включения, обнаруженные в более поздних кристаллах и зонах кварца из пегматитов Волыни [33].

История минерального индивида - это и отражение истории более крупного топоса, элементом которого индивид является.

Удачных примеров использования мине-

ральных индивидов для расшифровки тех или иных черт истории минеральных систем достаточно много. Так, О.П.Иванов и Л.Я.Ефременко [125, 126] на основе изучения характера зональности кристаллов касситерита в многостадийных жилах выполнения показали, что содержание сокристаллизующегося с касситеритом вольфрама направленно увеличивается в процессе формирования жил (от зальбандов внутри жилы) параллельно с уменьшением содержания титана, железа и марганца. Наряду с такими однонаправленными тенденциями для некоторых элементов-примесей касситерита (скандия, индия, ниобия) характерно пульсационно-ритмичное изменение концентрации, которое и отражается в зональности индивидов. Не исключено, что оно связано с автоколебаниями состава системы. Изучая зональные шпинели морских базальтов, время роста индивидов которых охватывает значительную часть периода остывания базальта, группа минералогов под руководством П.Рамдора использовала их в качестве индикаторов химических изменений базальтового расплава в процессе кристаллизации. В различных типах базальтов установлены три тенденции химических изменений шпинелей от центра индивидов к их периферии:

а) увеличение $TiO_2/TiO_2 + Cr_2O_3 + Al_2O_3$, V_2O_5 ; уменьшение $Cr_2O_3/Cr_2O_3 + Al_2O_3$, $FeO/FeO + MgO$; б) резкое увеличение $TiO_2/TiO_2 + Cr_2O_3 + Al_2O_3$; увеличение $Cr_2O_3/Cr_2O_3 + Al_2O_3$, $FeO/FeO + MgO$; уменьшение V_2O_5 ; в) постоянство $TiO_2/TiO_2 + Cr_2O_3 + Al_2O_3$; увеличение $Cr_2O_3/Cr_2O_3 + Al_2O_3$; $FeO/FeO + MgO$; уменьшение V_2O_5 . Эти тенденции отражают химические изменения, имевшие место непосредственно в базальтовом расплаве в процессе кристаллизации соответствующих типов базальтов.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ВЗАИМООТНОШЕНИЙ В МИНЕРАЛЬНОМ АГРЕГАТЕ

Восстановление истории "жизни" минеральных агрегатов осуществляется на основе анализа взаимоотношений между минеральными индивидами, слагающими агрегат. При этом, естественно, используется как вспомогательный прием и морфолого-анатомический анализ самих минеральных индивидов, учитывается распад твердых растворов, синтаксия и эпитахсия минералов.

Минеральные индивиды, слагающие агрегат, могут образоваться как синхронно, так и последовательно (см. Приложение, рис. XVI—XXXVI). Поэтому минеральные агрегаты с точки зрения хронологической последовательности кристаллизации минеральных индивидов можно разделить на простые и сложные (см. Приложение, а также рис. 35). Простые минеральные агрегаты состоят из синхронно выросших инди-

видов, сложные — из синхронно к последовательно выросших индивидов,

Можно дать следующую новую формулировку понятия *минеральный агрегат*: минеральный агрегат есть совокупность (одновременных или разновременных) соприкасающихся минеральных индивидов, жестко закрепленных друг относительно друга в пространстве. Для сравнения приведем определение А.Г.Жабина [104, с.12]: "Агрегат — это скопление индивидов, не обладающее при идеальном развитии четкими признаками симметричных фигур" и определение в "Петрографическом словаре" (1981, с.10): "Агрегат минеральный — скопление минеральных зерен, отличающееся по количественным соотношениям, структуре или составу минералов от вмещающей горной породы".

В соответствии с нашим определением понятия *минеральный агрегат* и разделением на простые и сложные агрегаты можно вывести простое отличие для терминов *структура* и *текстура*. Структура минерального агрегата есть характеристика его объемного строения, обусловленного формой, размерами и ориентировкой синхронных минеральных индивидов. Текстура минерального агрегата есть характеристика его объемного строения, обусловленного распределением в пространстве разновременных минеральных индивидов. Простые минеральные агрегаты сложены синхронными индивидами, поэтому имеют только структуру. Сложные минеральные агрегаты имеют как структуру (для синхронных индивидов), так и текстуру (суперпозиция двух или более структур).

При последовательном минералообразовании могут возникать сложные агрегаты с полосчатыми текстурами, когда происходит наслаивание простых агрегатов друг на друга. Либо возникают "проникающие" текстуры (рис. 36), когда в один простой агрегат как бы вдвинуты другие простые агрегаты (обычно такие сложные агрегаты образуются вследствие метасоматических процессов).

Общая картина формирования минеральных агрегатов выявляется еще в процессе минералогического картирования или документации тел. Материал для лабораторного онтогенетического исследования минеральных индивидов должен быть представлен крупными штуфами, надежно и с необходимыми повторениями, характеризую-

щими структурно-текстурные особенности изучаемого тела. Положение образцов, их пространственная ориентировка тщательно документируются, сами образцы маркируются.

Особенности препарирования образцов и подготовки их к дальнейшим исследованиям определяются природой изучаемых агрегатов [250]. Однако во всех случаях возникает потребность фотодокументации агрегатов, поэтому необходимо стремиться подбирать такие туфы, чтобы при их фотографировании форма и строение агрегатов выявлялись наилучшим образом.

К общеметодическим операциям относятся также распиловка образцов в необходимых направлениях с последующей шлифовкой и полировкой поверхностей штуфов или вырезанных из них пластин, их структурное травление и т.д. В.И.Степанов [230] считает, что поверхности распила лучше не полировать, а лишь шлифовать и покрывать прозрачным лаком, тогда текстурный рисунок проступает четче.

Выделение того или иного индивида или группы индивидов из окружающей минеральной массы осуществляется путем разрушения всего штуфа (механическое, ультразвуковое, термическое и т.д.) дроблением, выкалыванием с помощью специальных инструментов, селективным растворением, выпиливанием, высверливанием и т.д.

Одной из начальных операций онтогенетического анализа является морфолого-анатомическая документация агрегатов, с конечной целью создания его геометрической модели. Она осуществляется зарисовкой и фотографированием препаратов. Чтобы понять строение относительно простых агрегатов, таких, как друзовые корки, сферолиты, достаточно изучить лишь несколько разрезов. Более сложные (диффузионные, метасоматические или метаморфизованные и т.д.) агрегаты расшифровываются трудно, после изучения очень большого числа препаратов. В любом случае нельзя ограничиваться изучением текстурных срезов в одной плоскости, тем более случайной, а необходимо добиваться полной стереологической документальности.

Определение последовательности кристаллизации минеральных индивидов, составляющих агрегаты, проводится на основе критериев относительного возраста минералов.

Критерии одновременного роста соприкасающихся минеральных индивидов основаны на анализе границ между минеральными индивидами. Глав-

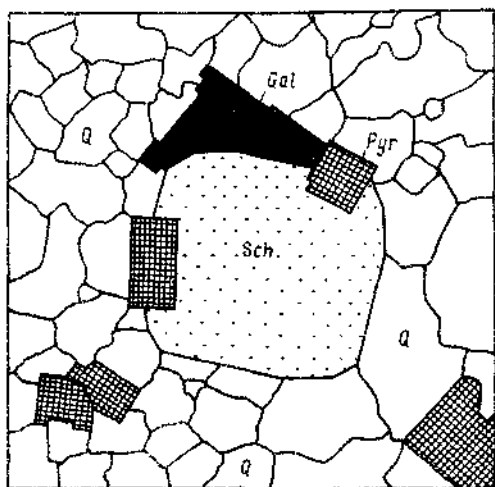


Рис. 37.

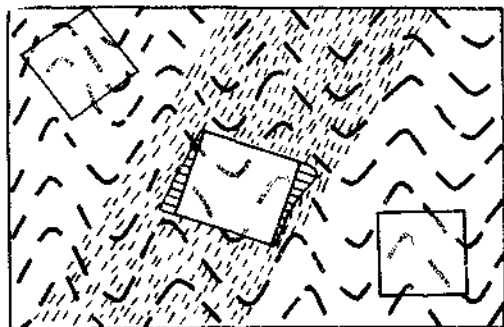
Агрегат индивидов с разной степенью развития плоских граней: пирит (Pyr) - шеелит (Sch) - галенит (Gal) - кварц (Q)

ным признаком одновременного роста двух минеральных индивидов является наличие индукционных границ между ними (см. гл. VI). Индукционные поверхности (границы) характеризуются наличием индукционной штриховки, образующейся в результате колебаний относительных скоростей роста соприкасающихся кристаллов. Механизм ее формирования детально рассмотрен И.И.Шафрановским, Д.П.Григорьевым [262], В.Г.Лазаренковым [155], Г.И.Дементьевой [81], Б.В.Чесноковым [250] и др.

Индукционные поверхности состоят из индукционных граней и ребер, образующих штриховку, и псевдограней, которые эта штриховка покрывает. Профиль псевдограницы в перпендикулярном к ней разрезе представляет собой график изменения относительной скорости роста двух индивидов во времени, если, конечно, не происходило

Рис. 38.

Схема минерального агрегата со сложным онтогенезом в пльчатом биотит-альбит-кварцевом сланце



более поздней перестройки рельефа индукционной границы. Между индивидами, растущими с абсолютно одинаковыми скоростями, этот профиль будет прямолинейным.

Индукционные поверхности могут переходить в гранные плоскости или плоскостно-отпечатки, что свидетельствует о прекращении совместного роста и дальнейшем одиночном росте одного из индивидов.

Критерии последовательного роста минеральных индивидов основаны на анализе распределения центров их зарождения в пространстве и анализе границ между индивидами. Основным критерием последовательного минералообразования является критерий нарастания и обрастания минералов: минерал А, нарастающий на минерал Б или обрастающий его, несомненно, более поздний. Если удастся найти положение центра зарождения нарастающего индивида (группы индивидов) на поверхности индивида-субстрата, то их относительный возраст можно считать безошибочно определенным. В более сложных случаях приходится проводить распиловку и анализировать анатомические особенности срастающихся индивидов.

Большое значение для определения относительного возраста минералов имеет анализ границ срастания. Границей срастания (если границы не реакционные) всегда является собственная поверхность более раннего, обрастаемого минерала. Она отпечатывается на позднем минерале со всеми особенностями ее рельефа. В минеральных телах выполнения поздний минерал ксеноморфен по отношению к раннему (рис. 37).

Надежный критерий — это критерий пересечения: если минерал А выполняет трещины в минерале Б, то он более поздний. При использовании этого критерия нужно, однако, быть уверенным, что границы между индивидами действительно являются границами пересечения, а не границами-отпечатками.

Критерии замещения в отличие от ростовых менее определены, и для того чтобы определить, как формировался минеральный индивид или агрегат (в условиях свободного роста или путем замещения более раннего минерала или агрегата минералов), необходимо опираться на совокупность признаков.

Минеральные тела замещения от тел выполнения отличает направление разрастания: тела выполнения растут от стенок полости к ее середине (т.е. центростремительно); тела замещения, наоборот, развиваются от ка-

кой-то области подтока питания во все стороны (т.е. центробежно). Центробежность или центростремительность развития можно диагностировать, применяя геометрический анализ строения агрегатов.

Метакристаллы, псевдоморфозы и параморфозы — типичные минеральные тела замещения. Об их метасоматической природе можно судить по наличию (если таковые сохранились) реликтовых включений замещаемого тела. Для псевдоморфоз и параморфоз характерно несоответствие внешней формы конституции шагающего их минерала. Образование параморфоз, являющихся результатом полиморфных превращений, сопровождается разными воздействиями на вмещающую среду в связи с изменением объема — развитием радиальной трещиноватости, аномальных оптических ореолов в случае приращения объема, образованием кольцевой трещиноватости отрыва в случае сокращения объема.

Дополнительную информацию о критериях одновременного и последовательного роста, замещения, перекристаллизации и других изменениях минералов и особенностях их применения в онтогенетическом методе можно получить из работ Б.В.Чеснокова [250], Д.П.Григорьева [64], Д.П.Григорьева и А.Г.Жабина [76], А.Г.Жабина [103], Н.П.Юшкина [282], Ю.М.Дымкова [90].

Рассмотренные критерии требуют некоторой детализации. Так, иногда встречаются случаи унаследованной индукционной поверхности, которую надо уметь отличать от собственно индукционной. Например, из верхней части полости при подвижках может выпасть покрытый индукционной поверхностью индивид минерала, который позднее не дорастал, а был законсервирован другим минералом. Общий системный

анализ этого агрегата позволит легко выявить случайность такой поверхности. Подобным же образом устанавливается унаследованная индукционная поверхность при метасоматозе. Например, кварц с полевым шпатом имели индукционные поверхности одновременного роста; после замещения полевого шпата серицитом индукционная поверхность сохраняется, однако геометрия ее (размер псевдограней) совершенно не соответствует мелкокристаллическому серициту.

Критерий идиоморфизма-ксеноморфизма позволяет говорить лишь о несинхронности роста соприкасающихся минералов, но который из них появился раньше — вопрос остается открытым. Как известно, идиоморфный кристалл может начать свой рост раньше ксеноморфного (протокристалл) или позднее (метакристалл). Здесь надо быть особенно осторожным и использовать четко все законы и принципы: принцип нарушенного целого (метакристаллы находятся в секущих структурах и сами секут анатомическую картину вмещающего твердого тела), закон теней (в метакристаллах остаются тени замещаемого твердого тела). Встречаются такие сложные случаи, когда для "старого" агрегата рассматриваемый индивид является метакристаллом, а для "нового" — протокристаллом (рис. 38). На рисунке показано, как в пльичатом биотит-альбит-кварцевом сланце выросли метакристаллы пирита (квадраты) с тенями от биотита, затем в зоне деформации прошла хлоритизация (штрихи); пирит в зоне деформации вращало с образованием параллельно-шестоватого кварцевого агрегата. В случаях нарастаний (обратаний) "вектор времени" легко определяется, то же относится и к критерию пересечений.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ВЗАИМООТНОШЕНИЙ В МИНЕРАЛЬНЫХ ТЕЛАХ И НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ

Историческая реконструкция минеральных тел, составляющих разновременные агрегаты, осуществляется по тем же принципам: анализ распределения центров зарождения агрегатов в пространстве и анализ границ между агрегатами. Данные о динамике формирования самих слагающих минеральное тело агрегатов используются для уточнения и детализации исторической картины формирования рудного тела. Поскольку

на этом уровне исследований проводится анализ взаимоотношений не только индивидов и агрегатов, но и более сложных минеральных ассоциаций, парагенезисов, приходится использовать дополнительную информацию.

Ю.М.Дымков [90] при исследовании онтогенеза жильных месторождений, например, предлагает учитывать такие признаки:

1) наличие на индивидах контактирующих минералов индукционных поверхностей, обычно у основания включений, ориентированных перпендикулярно к граням, индукционные формы индивидов;

2) ритмичное чередование зон кристаллов с включениями постороннего минерала без индукционных поверхностей, нарастающими на погребенные зоны роста кристаллов и сферолитов. Дополнительный признак — постоянство условий образования полиминерального индивида;

3) включения, вызывающие расщепление кристаллов и сферолитов, скелетные стадии роста, синхронные модифицируемым минеральным индивидам;

4) равномернозернистые слои седиментационных текстур, содержащие специфические для них включения эвгедральных кристаллов и сферолитов;

5) флюидально-прожилковая текстура, пересечения вязких масс, псевдобрекчиевые текстуры тонкозернистых агрегатов, свидетельствующие о формировании их из вязких веществ;

6) ритмичное чередование слоев в отстойниках, минералогически сходные, но структурно различные крустификационные корки висячего и лежащего боков асимметричных жил и других гравитационных текстур;

7) минералы, образующие дендриты, скелеты, нитевидные кристаллы и минералы, обрастающие или цементирующие их, субсинхронны (отлагаются без перерыва).

При замещениях картина непрерывного отложения наблюдаемых сейчас минералов может быть ложной. Примеры (в скобках — исчезнувший минерал) :

а) (самородное Ag) - (NiAs) — (раммельс-
аргентит — герсдорфит -
бергит) -(анкерит)
квирц;

б) (самородный Bi) - настуран - (анкерит)
кварц — настуран — кварц.

Нижние ряды в приведенных примерах - наблюдаемая последовательность, верхние — реконструированная последовательность.

Порядок образования минералов в пределах какого-то небольшого участка минерального тела определяется по критериям разновозрастного отложения и замещения минеральных индивидов и агрегатов. Основные морфологические признаки более позднего образования: пересечение и диспергирование минерала-предшественника. Пересечение внешней зоны роста кристалла или сферолита другим минералом рассматривается как "коррозия". Конечная стадия развития системы секущих механических или метасоматических прожилков - соответственно брекчиевые или раскрошенные структуры и, наконец, "теневые псевдоморфозы".

Возрастные взаимоотношения между отдельными минеральными ассоциациями (МА) определяются на основе отношений: а) между полиминеральными агрегатами; б) между полиминеральным агрегатом одной МА и отдельным минералом (генерацией) другой; в) между типичными минералами (или их генерациями), принадлежность которых к известным разновременным МА не вызывает сомнений. Во всех случаях при расшифровке последовательности событий необходимы максимальное выявление всевозможной генетической информации о минералах и последующий онтогенический анализ установленных фактов.

Реконструкция первичной последовательности минералов в крустификационных жилах невозможна без учета признаков перекристаллизации и внутрижильного метасоматоза, характеризующего взаимодействия ранее образовавшихся МА с растворами, формирующими новую МА [90, с.81-83].

СИНХРОНИЗАЦИЯ И ВОЗРАСТНАЯ КОРРЕЛЯЦИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО РАЗОБЩЕННЫХ МИНЕРАЛОВ

В онтогенической практике часто приходится решать вопрос об относительном возрасте несоприкасающихся, пространственно разобщенных минеральных объектов (например, кристаллов, растущих в разных полостях или даже на разных месторождениях) или увязывать между собой сохранившиеся фрагменты разрушенного минерального

объекта (обломки раздробленных индивидов, реликты замещенных минералов и т.д.)

Теоретико-методические основы возрастной корреляции пространственно разобщенных минеральных объектов разрабатывались Д.П.Григорьевым с соавторами [74, 77], В.И.Поповой [192], А.Г.Жабиным [104], Н.П.Юшкиным [278] и др.

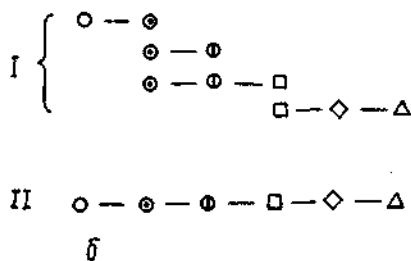
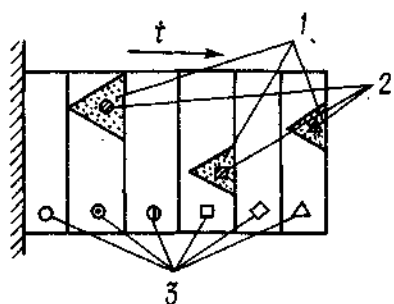


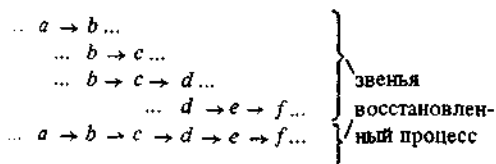
Рис. 39.

Схема хронологической последовательности образования различных частей кристалла (в) и восстановления последовательности событий по перекрывающимся отрезкам процесса (б):

I - включения минералов; 2 - признаки разновременных включений; 3 - признаки разных частей кристалла; / - перекрывающиеся отрезки процесса; // - восстановленная общая последовательность

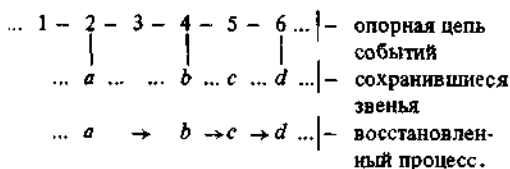
Д.П.Григорьев и А.Г.Жабин предлагают два методических приема увязки фрагментарно сохранившихся звеньев минералогенетического процесса:

1) по перекрывающимся отрезкам процессов:



(графически эта ситуация изображена на рис. 39);

2) путем корреляции сохранившихся звеньев с какой-либо другой непрерывной цепью событий, если таковая имела место:



Например, зная последовательность нарастания зон кристалла-хозяина, содержащих в некоторых случаях включения минералов (а-д):

$$1 \rightarrow 2 \left| \begin{array}{c} a \\ b \end{array} \right| 3 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \left| \begin{array}{c} c \\ d \end{array} \right| 6 \rightarrow 7,$$

можно определить последовательность кристаллизации минералов-узников как $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$. Однако природные возможности для применения этих прямых критериев возрастной увязки пространственно разобренных минералов ограничены, и чаще всего приходится использовать разного рода косвенные критерии. В основе последних лежат эволюционные закономерности минералогенеза, но пользоваться этими критериями нужно осмотрительно. Дело в том, что на их основании определяется место минерала в закономерно развивающемся во времени процессе, но сами физико-химические процессы не зависят от времени и места их протекания. Это объединяет закономерности эволюции природных минералогенетических мульти-систем и создает определенное сходство в облике формируемых ими минеральных систем [239]. Используя косвенные критерии тех или иных возрастных корреляций, нужно убедиться, что изучаются продукты одного непрерывно развивающегося минералогенетического процесса.

Наиболее надежна синхронизация минералов по следам разного рода "аномальных явлений", с достаточно высокой отчетливостью наложивших заметный отпечаток на структуру отдельного минерала и проявившихся в региональном масштабе. К таким явлениям относятся, например, тектонические подвижки, меняющие режим минералообразования и фиксирующиеся определенным образом в строении минералов: "присыпки", деформации, зональность.

Особенно большое значение имеет зональность, которую некоторые исследователи интерпретируют как природную сейсмограмму (см. гл. IX). Зональность для синхронизации кварца в хрусталеносных гнездах и месторождениях Приполярного Урала успешно использована Д.П.Григорьевым и др. [74], для возрастных корреляций пироклора — Д.А.Минеевым и Н.И.Розенковой [161], для пирита Березовского месторождения — В.И.Поповой и Б.В.Чесноковым [198]. Основу данной методики составляет прослеживание реперных зон или реперных пиков на фотограммах зональности. По этим зонам как по синхронным реперам осуществляется взаимоувязка

формирования минеральных индивидов во времени. Подобные синхронные перерывы можно найти также в распределении и форме включений в кристаллах, в строении минеральных агрегатов, в следах деформаций, растворении минералов и т.д.

Для определения последовательности кристаллизации минералов широко используются закономерности изменения состава, строения и формы минеральных индивидов, закономерности изменений между

минералами парагенезиса. Если известна общая тенденция изменения такого или иного свойства минерала, например формы кристаллов флюорита, то по данным изучения этого свойства можно примерно установить с ранним или поздним минералом мы имеем дело. В качестве дополнительного возрастного признака при хронометрировании минералов используются типоморфные признаки, меняющиеся во времени, особенно включения минералообразующих сред.

ВЫДЕЛЕНИЕ ГЕНЕРАЦИЙ МИНЕРАЛОВ

В генетической минералогии, а в онтогении минералов в особенности, большое внимание уделяется генерациям минералов — разным поколениям одного и того же минерала, разделенным перерывами в кристаллизации. Выделяются также зарождения минералов — возрастные группы минеральных индивидов, обусловленные появлением новых центров роста и образовавшиеся на фоне непрерывной кристаллизации минерального вещества [64].

Подходя к этим определениям с позиций формальной логики, можно говорить об их формальной строгости или непротиворечивости. Однако совершенно очевидно, что здесь срабатывает минералогический принцип неопределенности. Действительно, можно перечислить морфологические признаки остановки в росте кристаллов (растворение, нарастание других минералов на данный без индукционных поверхностей с ним и т.д.), но никто не привел признака непрерывной кристаллизации. Следовательно, перерывы морфологически фиксируются, непрерывность — нет. Отсюда ясно, что определения генераций и зарождений надо так построить, чтобы неопределенность была исключена. Ясно, что определения понятий в этой области генетической минералогии будут носить конвенциональный характер.

Выделение генераций минералов связано не только с построением топологической структуры времени на конкретном участке месторождения (в минерализационной полости, жиле...), но и с непониманием этой структуры как фрагмента для всего месторождения, т.е. связано с проблемой синхронизации (возрастной корреляции) минералов. Иначе говоря, мы должны узнавать индивиды одной генерации дан-

ного минерала в любой точке месторождения. Здесь имеются серьезные трудности. Наблюдения показывают, что только в крупных хорошо сообщающихся синхронных трещинах (полостях) на большом расстоянии картируются одинаковые признаки и последовательность их изменения. В системах мелких трещин, сообщающихся капиллярно и находящихся в сложных телах горных пород, стабильность последовательности появления и изменения признаков бывает самой разной. Очевидно, что в таких системах трудно с одинаковой точностью проводить работы по синхронизации минералов (т.е. проследивать и картировать генерации минералов). Генерации, как подчеркивалось выше, устанавливаются по наличию перерыва в кристаллизации минерала. Признаками таких перерывов можно считать следующие онтогенетические явления:

- растворение минерала с последующей регенерацией и дорастанием;
- нарастание внутри минерального индивида других минералов, разделяющих зоны;
- нарастание на индивид других минералов без индукционных поверхностей или захват их в виде включений;
- пересечение минерала прожилком того же состава без дорастания зон.

В.И.Попова [192] критически рассмотрела применявшиеся разными исследователями способы выделения генераций и определила наиболее надежные и достаточные критерии установления межгенерационных перерывов кристаллизации (границ генераций).

Поскольку новые порции вещества прежде всего кристаллизуются на собственных затравках, новые его генерации нередко нарастают в виде зон роста на индивиды

ранних генераций. Особенно это характерно для метакристаллов. Поэтому при выделении генераций нельзя ограничиваться анализом строения только минеральных агрегатов, необходимо также изучать и анатомию индивидов. Эффективными вспомогательными признаками для выделения генераций являются типоморфные особенности конституции и свойств минералов, но выделять генерации только на основе этих признаков, как это нередко делается, рискованно.

Введение понятия *генерация минерала* облегчило расчленение сложного процесса минералообразования на составные части, что важно учитывать при минералогическом картировании месторождений полезных ископаемых (или других природных объектов), построении моделей минералообразования и использовании пространственного распределения генераций в технологической практике.

При картировании особенно сложна синхронизация разобщенных индивидов одной генерации. В связи с возможностью многократного появления почти одинаковых разновременных продуктов кристаллизации синхронизацию лучше всего производить на разных уровнях организации вещества по направленной последовательности возникновения признаков. Следует считать недостаточно аргументированной практику объединения в одну генерацию сходных по каким-либо отдельным свойствам минеральных индивидов или индивидов минерала из одинаковых по составу минеральных ассоциаций. Наоборот, результаты картирования и проведения синхронизации свидетельствуют об изменчивости одной генерации минерала в пространстве (зональность).

Как показывает практика, определен-

ная генерация минерала имеет ограниченное распространение на месторождении, т.е. в общем случае не существует такой генерации минерала, которая устанавливалась бы на всех горизонтах и флангах месторождения. Отсюда следует, что диаграммы, изображающие последовательность выделения генераций и парагенезисов минералов, характеристичны только для частей (участков) месторождений. На разных участках пространства минеральных систем будет свой набор генераций минералов, из которых лишь часть синхронизируется с некоторыми генерациями этих минералов других участков.

Понятие *генерация минерала* не накладывает ограничений на интервал изменчивости состава и формы кристаллов, образующихся непрерывно. Например, фенокристаллы плагиоклаза могут кристалловаться в магматической камере в весьма широком интервале температур и давлений. В разных зонах и пирамидах нарастания они будут иметь разный состав и свойства, но относиться к одной генерации, если не будет установлено перерыва в их кристаллизации. Именно поэтому нельзя рекомендовать изолированные признаки одинаковости форм, состава или свойств кристаллов минералов в качестве основы для выделения и картирования генераций минералов.

Использование онтогенетического анализа для определения генераций минералов с картированием распространения отдельных генераций в объеме минеральных тел позволило установить, что определенные генерации на некоторых участках могут исчезать, разрушаться [186]. С учетом этого факта более достоверно расшифровывается история минеральных месторождений и более надежно проводится их оценка.

ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССОВ РАСПАДА ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ, ЯВЛЕНИЙ ЭПИТАКСИИ И СИНТАКСИИ НА ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ВЗАИМООТНОШЕНИЯ МИНЕРАЛОВ

В проблеме пространственно-временных взаимоотношений минералов важно также учитывать результаты исследований твердых растворов и продуктов их распада, эпитаксию и синтаксию минералов.

Минеральный индивид, по определению, есть мономинеральное тело. Однако в природе очень часто встречаются ориентиро-

ванные сростания, где такое простое определение довольно сложно применить. С одной стороны, сростания бывают настолько тонкие, что без хорошей электронной микроскопии их не удастся выявить (например, биопириболы, пириболы, смешанослойные силикаты и т.д.). С другой стороны, в случае распада твердых растворов

изначально индивиды были мономинеральными, а после распада стали полиминеральными (т.е. преобразовались в агрегаты), и надо уточнять, о каких индивидах идет речь — о современных или ретроспективных. В связи с этим вводится понятие ретроспективный индивид — воображаемый индивид, конституция, форма и свойства которого онтогенетическими приемами реконструированы на заданный промежуток относительного времени "жизни" индивида.

Во многих случаях удастся судить о ретроспективных индивидах по форме кристаллов (одно из самых консервативных к изменениям свойств), симметрии скульптуры граней, трещинкам вокруг индивидов, анатомии кристаллов. Значения физических свойств, полученные с помощью приборов, относятся к ныне существующим индивидам, претерпевшим все изменения, связанные с остыванием и метаморфизмом. Тела распада могут быть самых различных размеров — суббентоневских, субоптических, видимых в оптическом микроскопе или макроскопических. Соответственно, влияние тел распада на физические свойства "индивидов" также различно (особенно на оптические).

Явления распада твердых растворов могут быть сравнительно простыми или достаточно сложными, многоступенчатыми. В Ильменских горах, например, обнаружены сложные явления распада в полевых шпатах, нефелинах и канкринитах. В бывшем гомогенном анортотклазе восстановлена такая последовательность продуктов распада: биотит - гематит - магнетит - калиевый полевой шпат. В нефелине последовательность была другой: биотит (или эгирин) -> магнетит -> гематит. Насыщенность полевого шпата, нефелина и канкринита телами распада, а также размер последних определялись первичной зональностью, секториальностью и предраспадовой дислокационной структурой (рис. 40). Значительное содержание продуктов распада в прозрачных минералах создает аллохроматическую окраску и иризацию. Зональные кристаллы синего корунда из Ильменских гор вследствие распада приобретают свойство иризации и серый или бронзовый отлив.

Продукты бинодального распада имеют определенную кристаллографическую ориентировку в матрице, которая не меняется во всех пирамидах нарастания ретроспективного индивида. Тела распада не переходят непрерывно из одного индивида в другой.

П.Рамдор в известной монографии по рудным минералам [305] привел такой список форм тел распада: совершенно неправильные формы, эмульсиевидные округлые выделения, эмульсиевидные выделения правильной формы, пластинчатые, решетчатые, скелетные, перистые, филигранные структуры, червеобразные и гирляндные формы, мирмекиты или графические структуры. По-видимому, такая классификация (перечисление) не совсем верно отражает собственно распад твердых растворов. Если не смешивать в одно явление распад твердых растворов, синтаксические срастания, полиморфные превращения и более позднее движение границ (перекристаллизацию), то формами тел распада можно назвать пластинки (изометричные или вытянутые в одном направлении) или плоские линзы. Имеющиеся к настоящему времени данные показывают, что тела распада идиоморфны по отношению к матрице и характеризуются ростовой скульптурой (как метакристаллы). Синтаксические же вростки покрыты индукционной поверхностью, что позволяет легко отличать мирмекитовые и графические синтаксические структуры от распадовых.

Явления эпитакии и синтаксии весьма широко развиты в минеральном мире. Еще недавно синтаксические срастания описывали как экзотику. Однако сейчас стала очевидной их колоссальная распространенность. Достаточно назвать графические кварц-полевошпатовые срастания, синтаксические пертиты в полевых шпатах, амфибол-пироксеновые срастания (в том числе пириболы, биопириболы), синтаксию в слюдах, во многих сульфидах (сфалерит + халькопирит + станнин + блеклые руды), установлена синтаксия карбонатов (кальцит + доломит и др.), известны ориентированные срастания биотита и корунда с полевым шпатом, нефелина с амфиболом и т.д.

Эпитакия — ориентированное нарастание минералов друг на друга, обусловленное каким-либо кристаллохимическим соответствием структур минералов. Синтаксия — ориентированное срастание синхронных минералов. Возможны срастания от первых элементарных ячеек, различаемых только при самых больших разрешениях электронных микроскопов (например, биопириболы), до пегматитовых гигантозернистых образований.

Синтаксия и эпитакия минералов часто сопровождают друг друга, перемежаясь

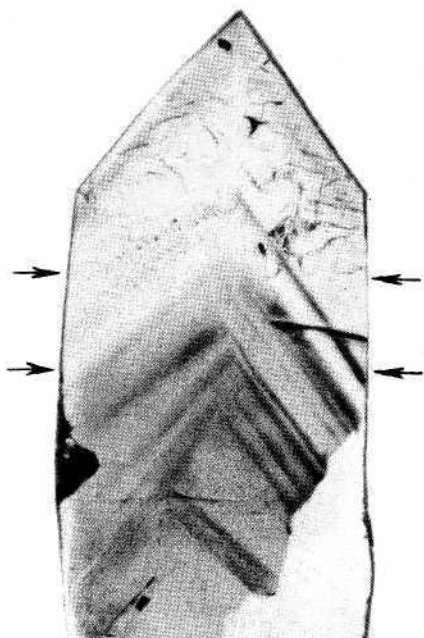


Рис. 6. Грани «торможения» $[10\bar{1}0]$ (показаны стрелками) кварца без пирамид нарастания (Южный Урал). Проходящий свет (обр. Т. А. Карякиной)

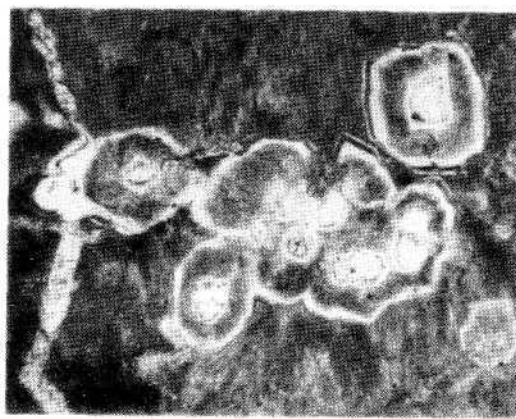
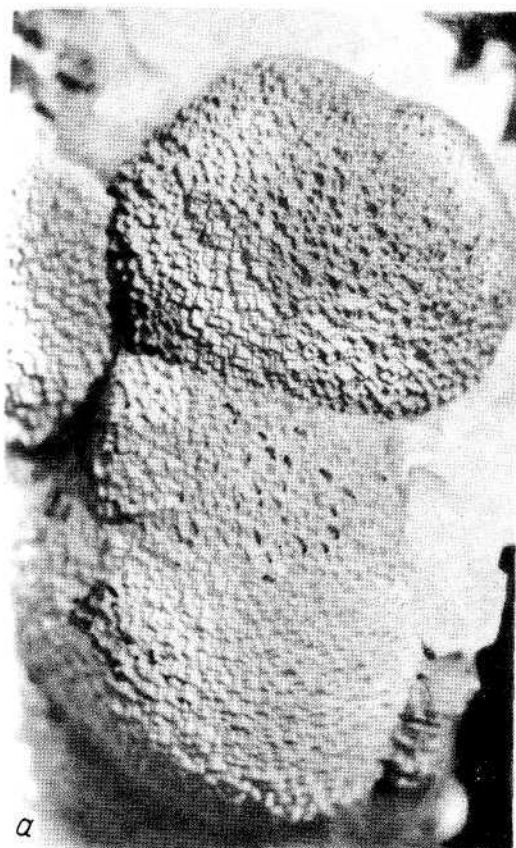


Рис. 7. Зональное строение метакристаллов кварца в мелкозернистой сульфид-карбонатной массе (Алданский горст). Шлиф, без анализатора

Рис. 8. Расщепление кристаллов:
 а — кальцит из Дальнегорского месторождения (грубое расщепление);
 б — малахит из района г. Нижний Тагил (тонкое расщепление). Косое освещение



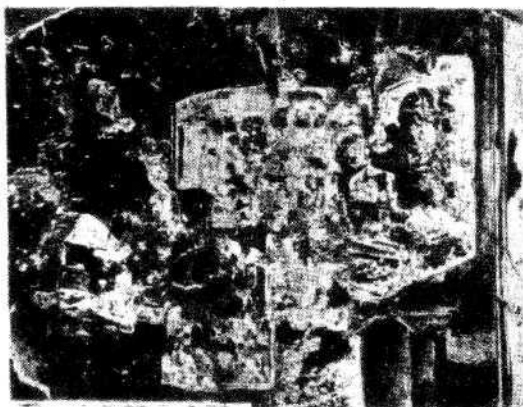


Рис. 10. «Тень» замещенного березита в метакристалле пирита (Березовское месторождение, Урал). Протравлено

Рис. 12. Структура распада в канкрините (Ильменские горы, Урал). Светлые пластинки параллельны шестерной оси (гематит), темные пластинки перпендикулярны к ней (магнетит). Полированный штупф, косое освещение

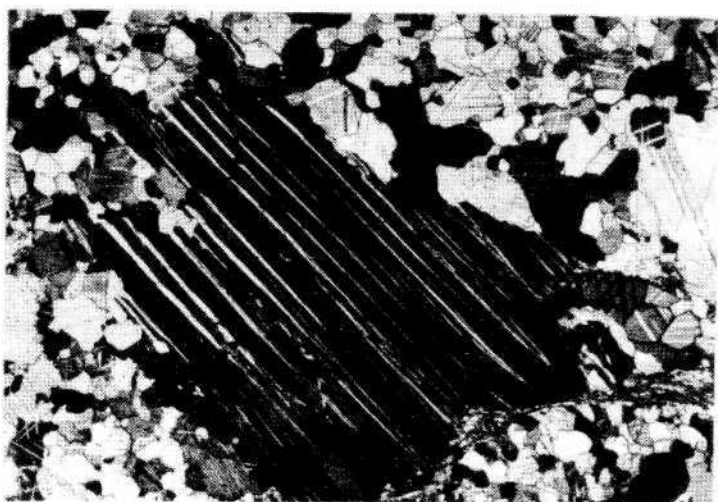
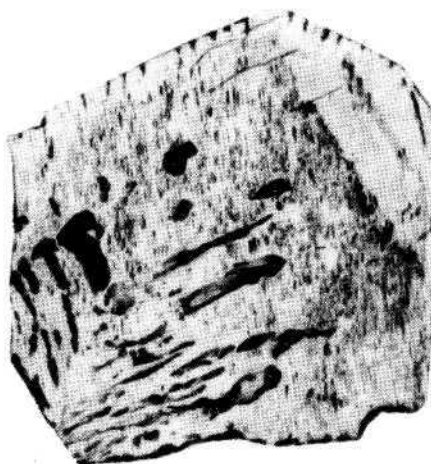
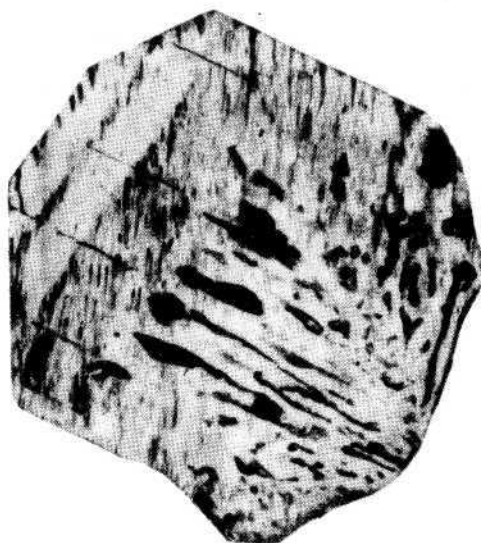


Рис. 13. Деформационная структура в кальцитовом агрегате (Березовское месторождение, Урал). В центре — реликтовое зерно, сохранившееся при перекристаллизации. Механические двойники в мелких зернах свидетельствуют о повторной (после перекристаллизации) деформации. Шлиф, с анализатором

Рис. 14. Синтаксические вроски кварца (темные) в центральной части кристалла полевого шпата с большим количеством узких щелей и каналов растворения (жила Мокруша, Средний Урал). Сечение кристалла полевого шпата по $\{010\}$. Косое освещение



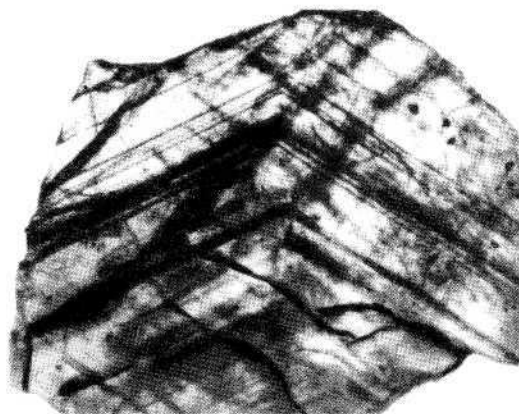


Рис.15.
Зональное распределение продуктов распада биотита в нефелине (Ильменские горы, Урал).
Пластика ориентирована перпендикулярно к шестерной оси нефелина. Проходящий свет

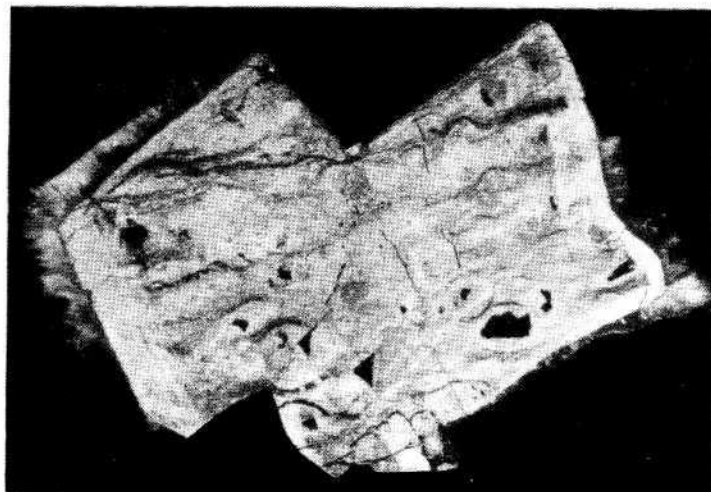
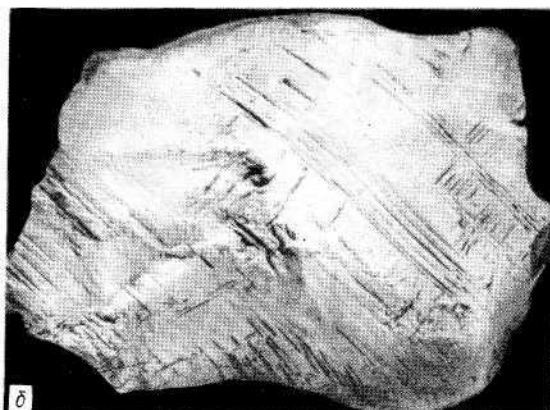


Рис. 16.
«Тень» структуры черного сланца в метакристалле пирита (Якутия). Косое освещение (обр. А. Ф. Бушмакина)

Рис. 17. Кристаллы минералов с признаками природного растворения:
а — конусы, ямки и каналы растворения на кристалле топаза; б — избирательное растворение швов бразильских двойников на сдвойникованном кристалле кварца. Образец задымлен магнием



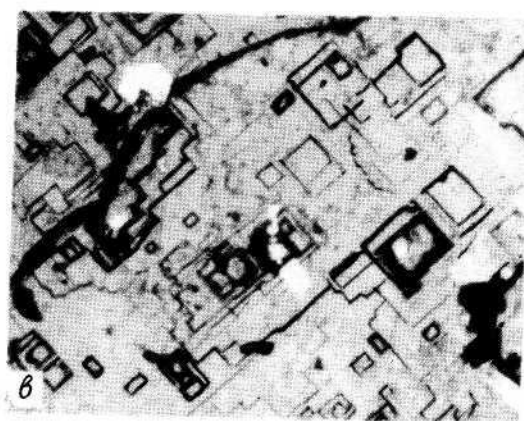
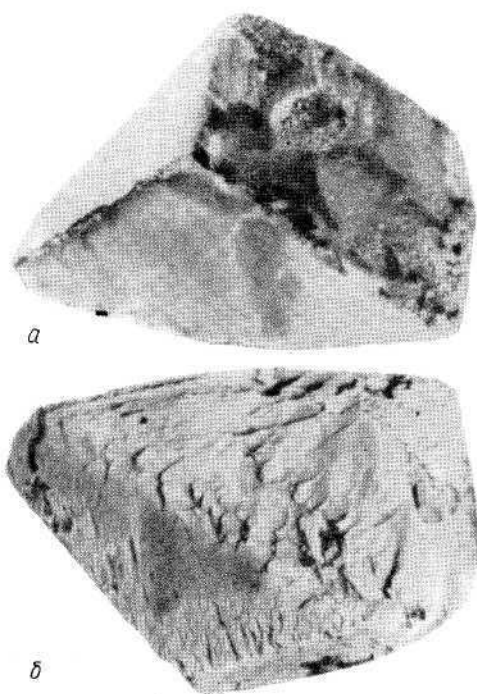


Рис. 18.
Первичная (идиоморфная) (а) и вторичная (б) поверхности растворения на кристаллах исландского шпата, а также ксеноморфная поверхность на кварце (в) (отпечаток идиоморфного кристалла пирита)

Рис. 19. След передвижения ребра $[100]$ пирита между двумя гранями гексаэдра, имитирующий индукционную поверхность (в разрезе) (Березовское месторождение, Урал). Протравлено

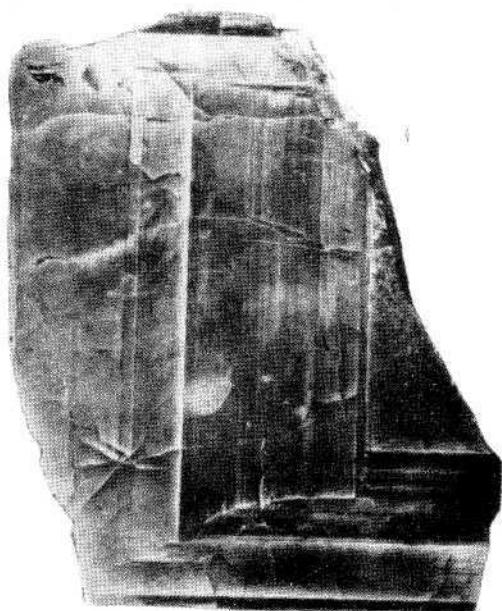
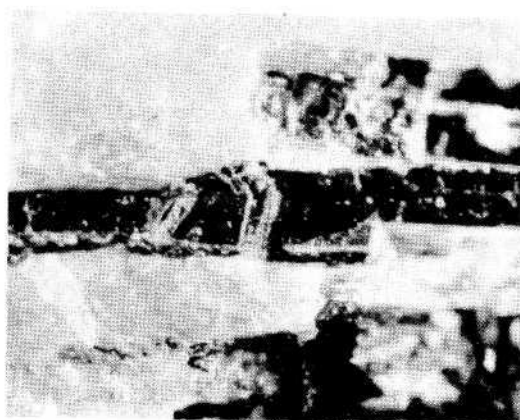


Рис. 23.
Индукционная поверхность турмалина с кварцем (Березовское месторождение, Урал). Скол агрегата, косое освещение



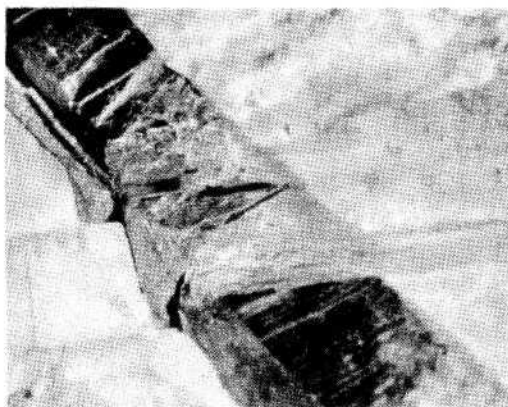
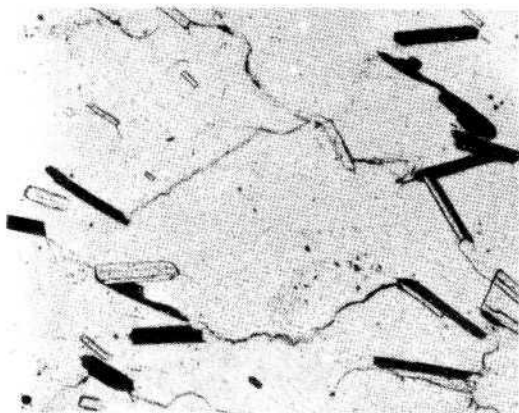


Рис. 24. Синхронные биотит (черный) с мусковитом в кварците (Ильменские горы, Урал). На разных участках виден «противоречивый идиоморфизм» этих минералов, в том числе синтаксические сростки (неэквивалентные двойники). Шлиф, без анализатора

Рис. 25. Индукционные поверхности между ставролитом и кианитом. Косое освещение

Рис. 26. Двойники деформации на (0001) корунда (Ильменские горы, Урал). Двойниковые швы отдекорированы природным растворением. Отраженный свет

Рис. 27. Зарождение гранул в полосе деформации в кварце (Березовское месторождение, Урал). Шлиф, с анализатором

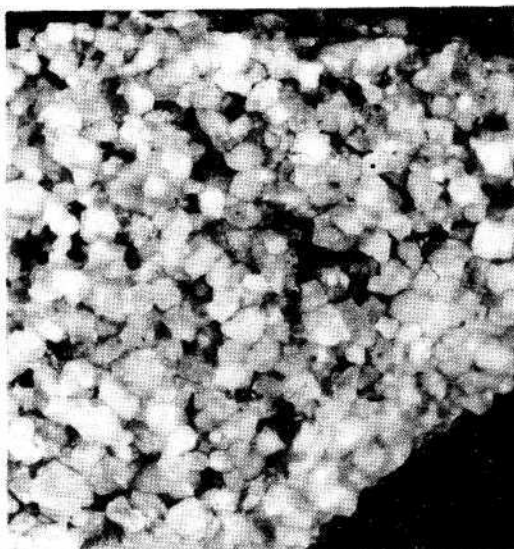
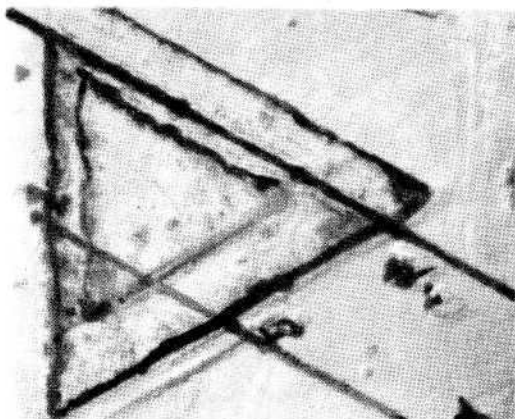


Рис. 28. Полиэдры перекристаллизации кальцита на слабо выветрелой поверхности мрамора (месторождение Липовка, Урал)

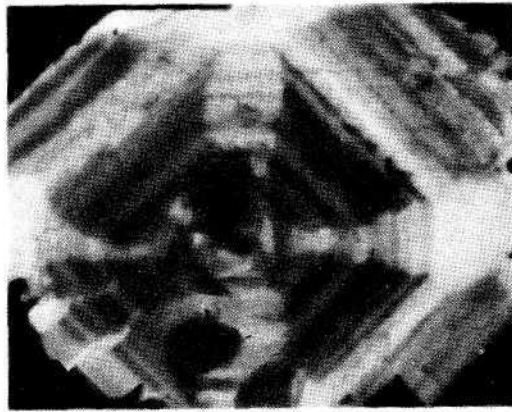
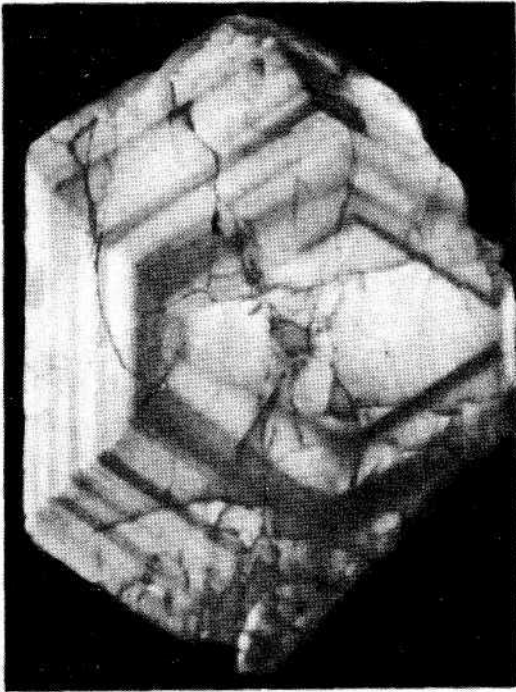


Рис. 29.
Зональность и секториальность в кристалле цир-
кона (Ильменские горы, Урал). Сечение по (110),
нейтронно-активационная радиография

Рис. 30.
Зональность и секториальность в кристалле цир-
кона (Ильменские горы, Урал). Сечение по (001),
нейтронно-активационная радиография

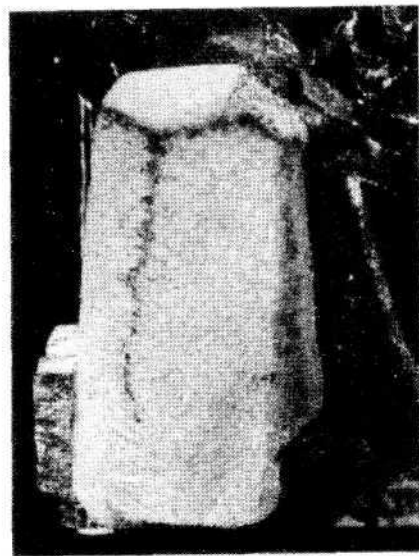
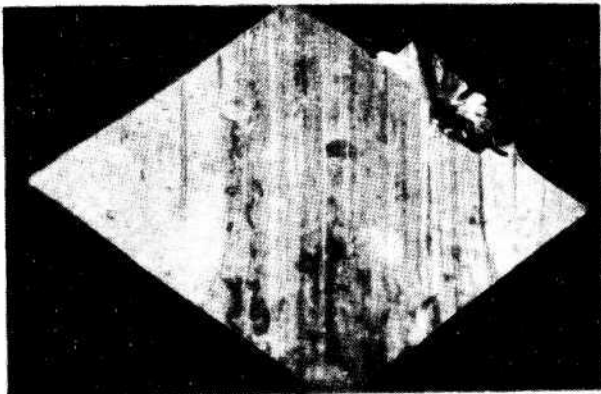


Рис. 32. Трансляционные реберные формы на кристалле
арсенипирита при смене $\{010\} \rightarrow \{110\}$ (Дальне-
горское месторождение, Приморье). Косое осве-
щение

Рис. 33. «Матовая» поверхность кристалла кальцита вслед-
ствие развития большого количества мелких тран-
сляционных вершинных форм при резком изме-
нении габитуса $\{1010\} + \{0112\} \rightarrow \{10\bar{1}1\}$ (Дальнегор-
ское месторождение, Приморье). Косое освещение

Рис. 34. Трансляционные формы («гирлянды») кальцита
при резкой смене игольчатого габитуса на спайно-
ромбоздрический (Вишневые горы, Урал). Косое
освещение

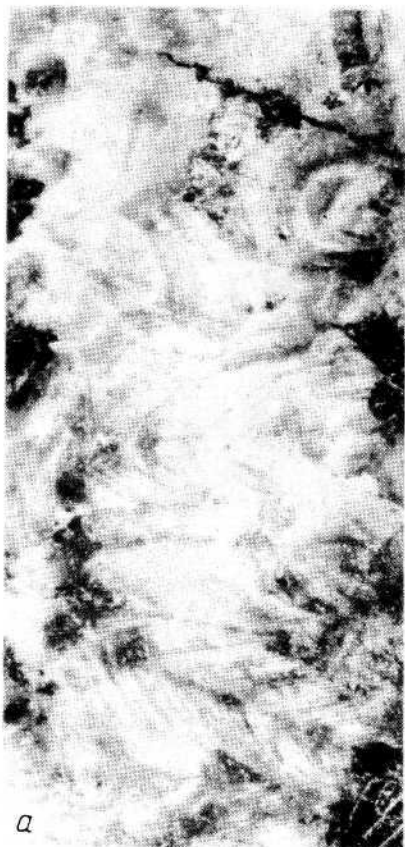


Рис. 35. Простые и сложные по относительному времени кристаллизации индивидов агрегаты (хр. Баджальский, Приамурье):
 а — параллельно-шестоватый кварцевый агрегат первого типа; б — касситерит-кварцевый полосчатый агрегат с тремя генерациями сдвойнированного касситерита

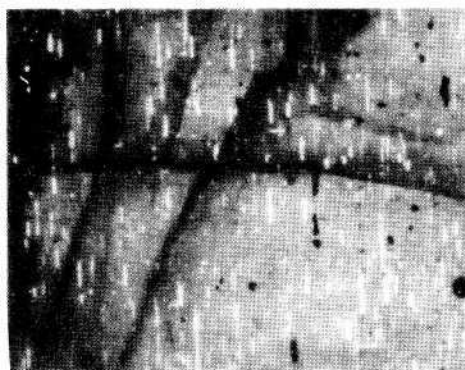


Рис. 36.
 Проникающая текстура агрегата, сложенного
 одновременными агрегатами, как результат
 грейзенизации кристаллического игнимбрита
 (хр. Баджальский, Приамурье)

Рис. 40.
 Распад твердого раствора: гематит (белые
 вытянутые пластинки) в нефелине (Ильмен-
 ские горы, Урал). Косое освещение, гематит
 поставлен на отблеск

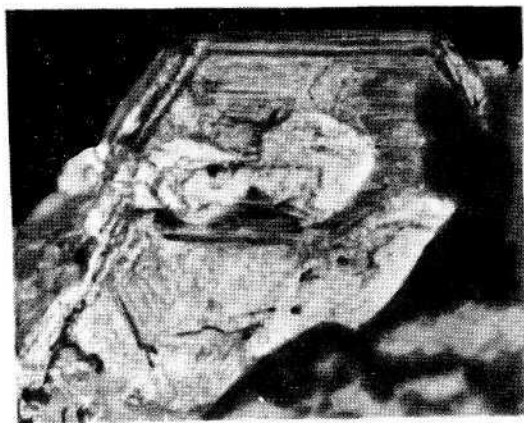


Рис. 41. Синтаксический сросток сфалерита (серое) с халькопиритом (белое) (Дальнегорское месторождение, Приморье). Косое освещение

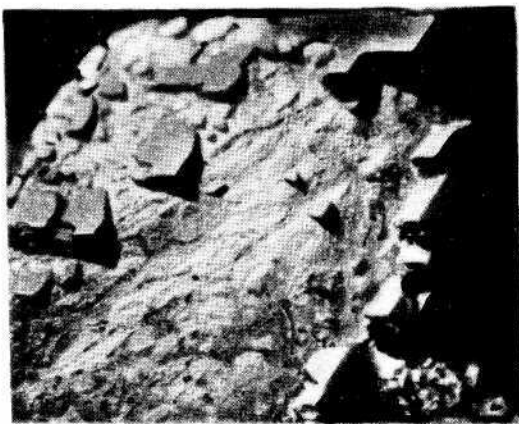


Рис. 42. Эпитаксическое нарастание блеклой руды на халькопирит (Дальнегорское месторождение, Приморье). Косое освещение

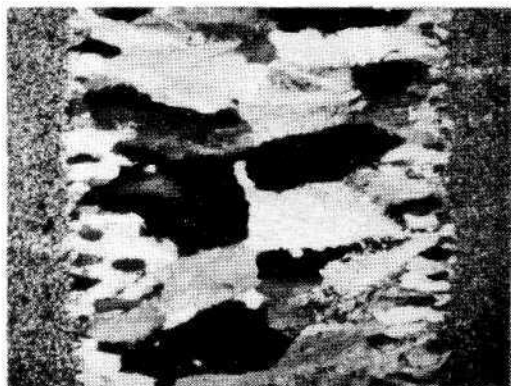


Рис. 52.
Структура геометрического отбора в кварцевых жилах выполнения. Шлиф, с анализатором



Рис. 53.
Поверхность метакристалла пирита из березитов (Березовское месторождение, Урал). Грубые штрихи соответствуют смене форм $\{100\} \rightarrow \{210\}$, мелкая мчатая поверхность — одновременному росту с серицитом (фрагмент индукционной поверхности). Косое освещение

Рис. 54.
Метакристаллы пирита в шарташском граните. Шлиф, с анализатором

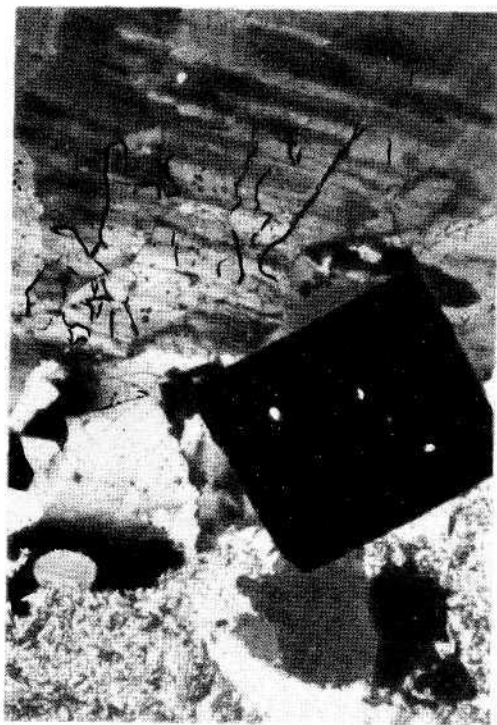


Рис. 55. Метакристалл пирита на контакте кварцевой жилы с березитом (Березовское месторождение, Урал).

Часть кристалла в березите, часть — в кварцевой жиле. Шлиф, с анализатором

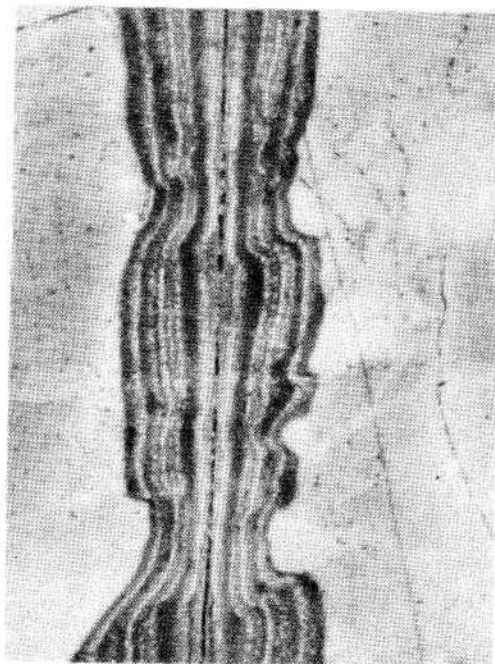
Рис. 56. Разное количество вростков серицита в разных зонах метакристалла пирита в березите (Березовское месторождение, Урал).

Пирит меняет форму $\{100 + 111\} \rightarrow \{100\}$. Протравлено

Рис. 60. Грейзенизация кислых вулканитов по сети трещин (хр. Баджальский, Приамурье). Темный цвет за счет сидерофиллита. Штуф

Рис. 61. Полizonальный метасоматит (грейзен) в гиалонгнимбритах (хр. Баджальский, Приамурье).

Темные зоны — с сидерофиллитом, светлые — с мусковитом. Шлиф



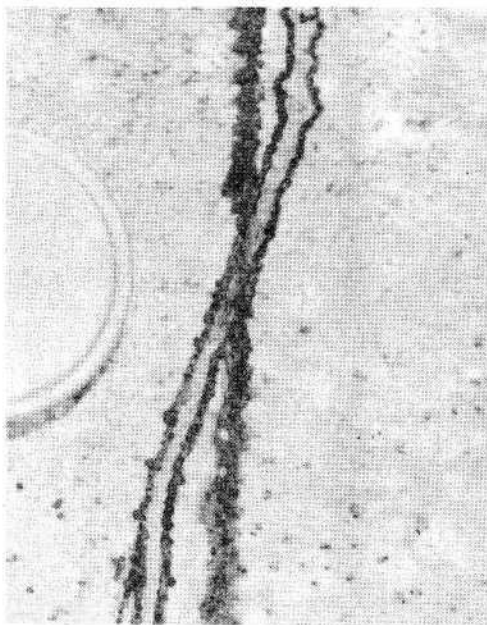
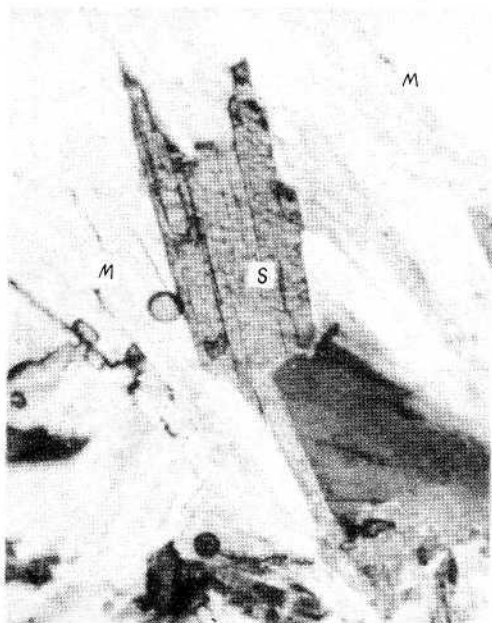


Рис. 62. Сидерофиллит-мусковитовый парагенезис (сингенезис) в грейзенах (хр. Баджальский, Приамурье).

Сидерофиллит (S) с мусковитом (M) имеют индукционные поверхности одновременной кристаллизации. Шлиф, с анализатором

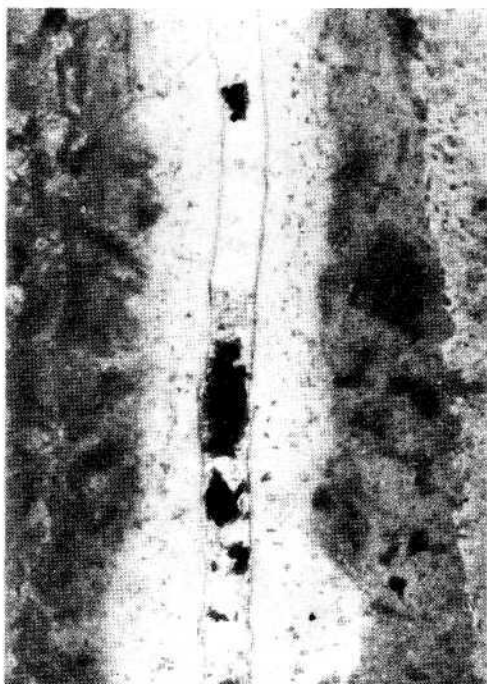
Рис. 63. Пересечение и сочленение разновременных метасоматитов (грейзенов) с подновлением ранней трещины в кристаллокластических игнимбритах (хр. Баджальский, Приамурье).

Темный метасоматит — сидерофиллитовый, светлый — мусковитовый

Рис. 64. Изменение мощности и контрастность зон в метасоматитах (грейзенах), образовавшихся по породам одинакового состава, разных пористости и размеров индивидов (хр. Баджальский, Приамурье). Шлиф

Рис. 65. Телескопирование биотитов, грейзенов и пропилитов возле одной трещины, активизировавшейся в разное время (хр. Сихотэ-Алинь).

Кварц и флюорит — в трещине выполнения, метакристаллы арсенопирита (черное) — в трещине выполнения и в двух зонах в метасоматитах



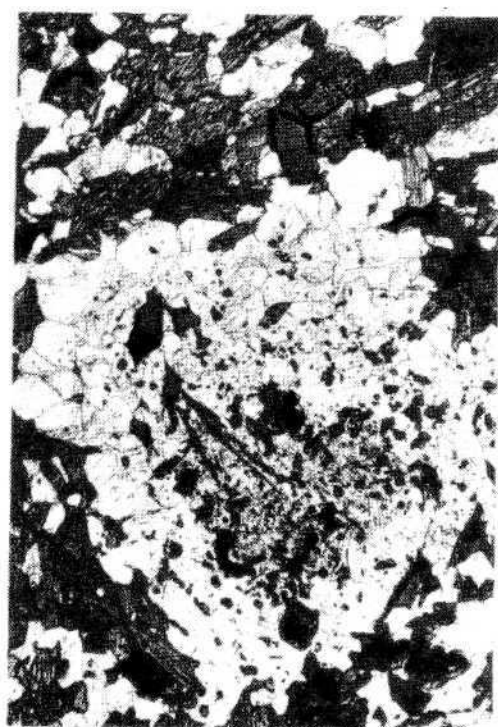
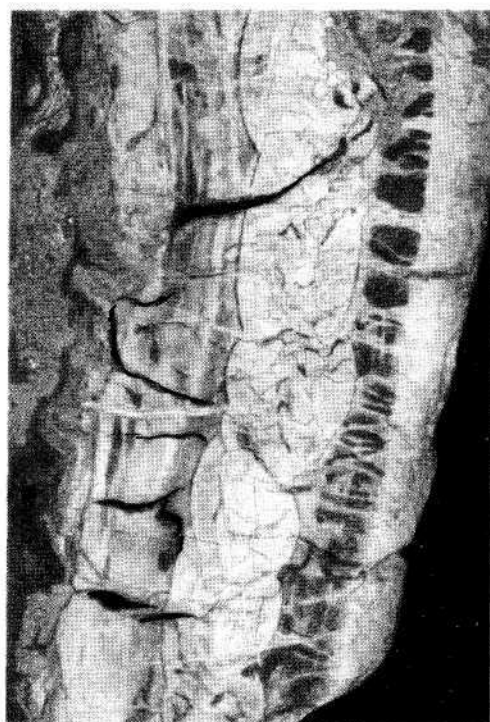
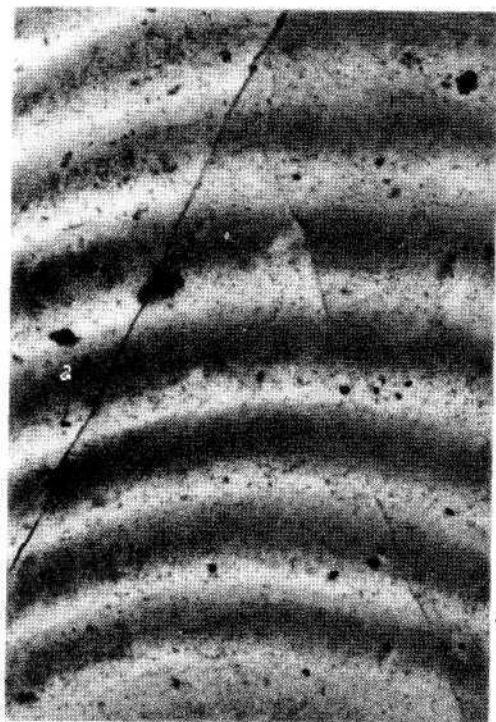


Рис. 66. Скаполитизация (белое) в слоистых амфиболитах (Ильменские горы, Урал). Шлиф

Рис. 67. Магнетит-амфибол-плаггиоклазовая псевдоморфоза по гранату в амфиболитах (Ильменские горы, Урал). Шлиф, без анализатора

Рис. 68. Осадочные хроматограммы в яшмах (г. Сибай, Южный Урал). Шлиф

Рис. 69. Яйцевидные текстуры метасоматитов в яшмах (г. Сибай, Южный Урал). Штуф



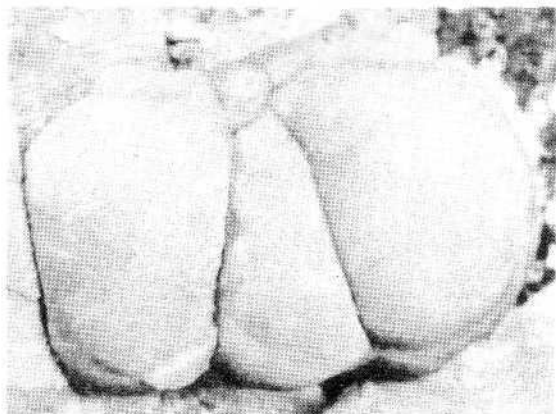


Рис. 70.
Сферолитовый концентрически-зональный геденбергит-волластонитовый скарн (Дальнегорское месторождение, Приморье). Штуф

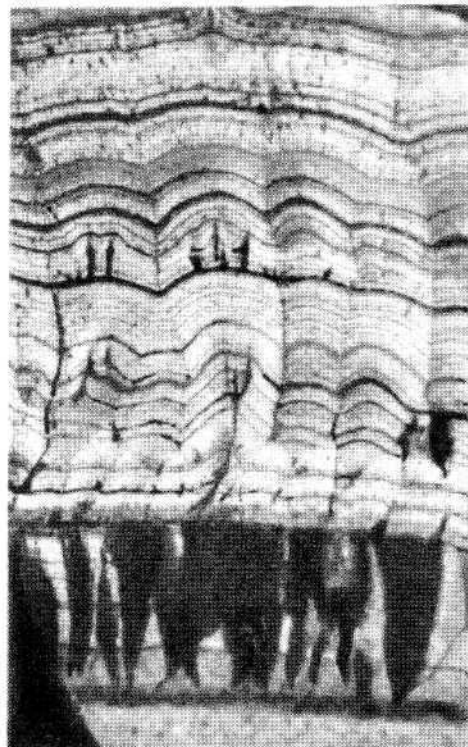


Рис. 71.
Зональный геденбергит-волластонитовый скарн (Дальнегорское месторождение, Приморье). Косое освещение, шлиф

Рис. 72.
Цементирование зональных геденбергит-волластонитовых обломочных агрегатов датолитом на дне полости (Дальнегорское месторождение, Приморье). Стенка карьера

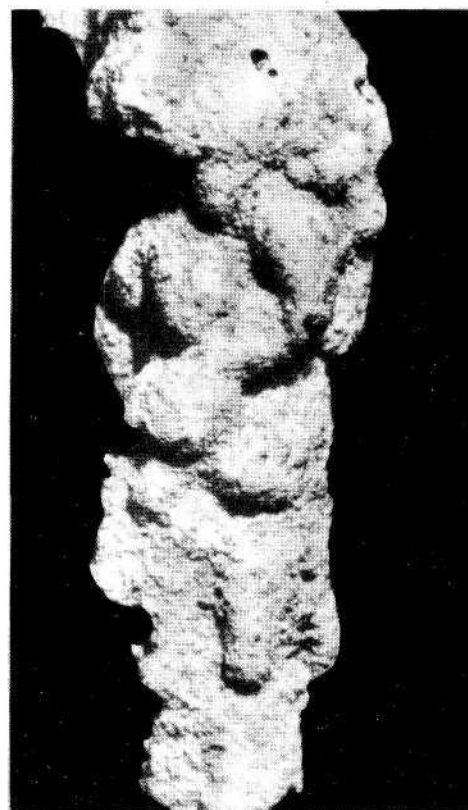
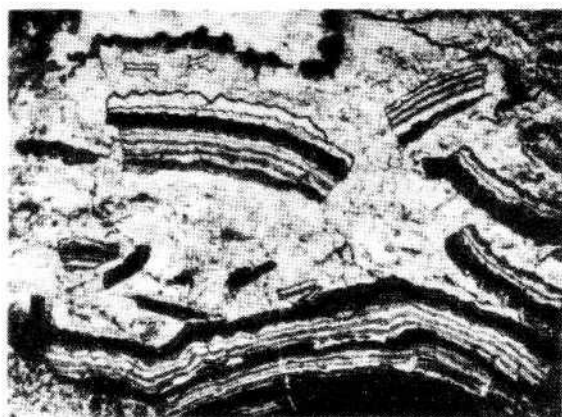


Рис. 73.
Кварц-полевошпатовый сталактит из гранитного пегматита (Центральный Казахстан). Косое освещение, штуф



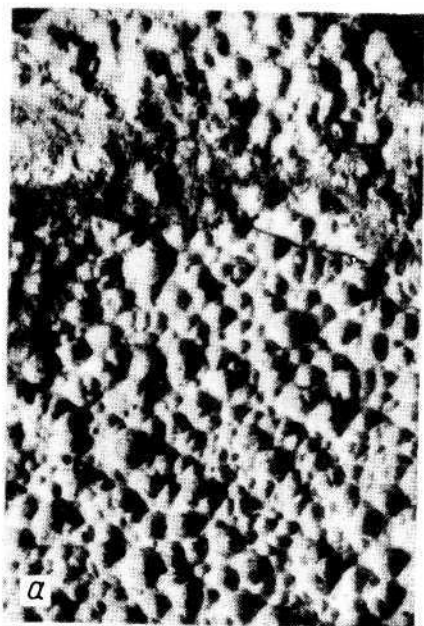
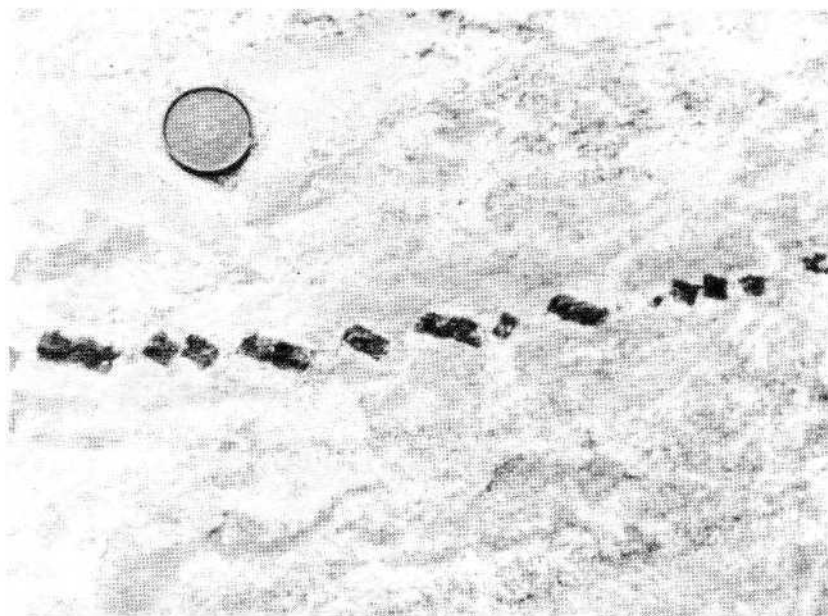


Рис. 74. Мелкозернистый кварц-полевошлатовый агрегат на щетке кварца (Западный массив, Забайкалье):

a — в субгоризонтальных жилах; *б* — в наклоненных жилах. Видно проявление гравитационных сил в наклоненных жилах. Косое освещение, штуф

Рис. 75. Пластические деформации (реология) фенитов и пироксеновой жилы, разбитой на фрагменты (Вишневые горы, Урал). Штуф



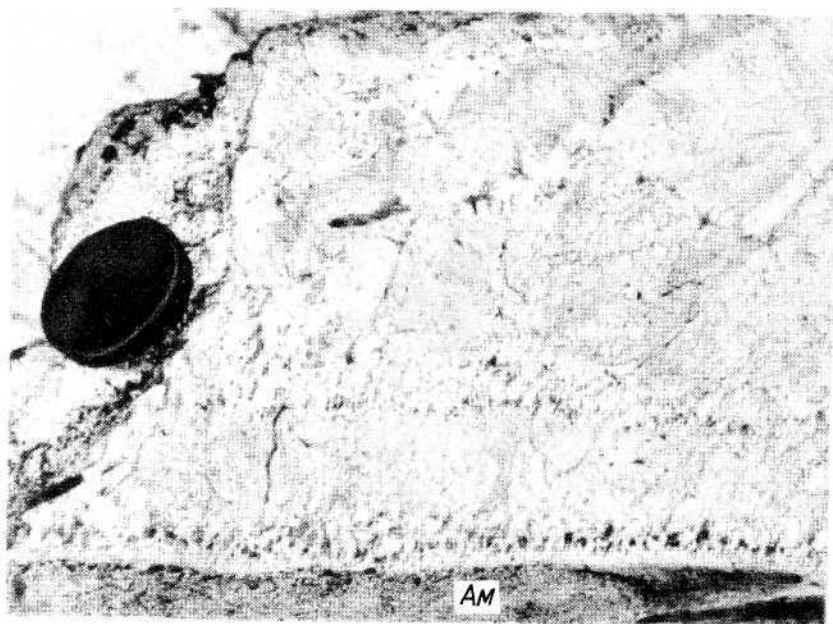


Рис. 76. Геометрический отбор на контакте с амфиболитами, направленный внутрь жилы графического гранитного пегматита (Ильменские горы, Урал).
Черное — кварц, светлое — полево шпат, Ам — амфиболит. Шлиф

Рис. 81. Синтаксия нефелина (*N*), биотита (*Bi*) и амфибола (*Am*) в пегматитах (Ильменские горы, Урал). Шлиф, без анализатора

Рис. 82. Индукционная поверхность между кварцем и амазонитом (гора Плоская, Кольский п-ов).
Кварц убран и на обнаженной поверхности видны выступающие индивиды альбита (белое) с индукционной поверхностью. Косое освещение

Рис. 77. Геометрический отбор при нарастании пластинчатого плагиноклаза (светлое) в одной из зон гигантского кристалла нефелина (серое) (Ильменские горы, Урал). Шлиф



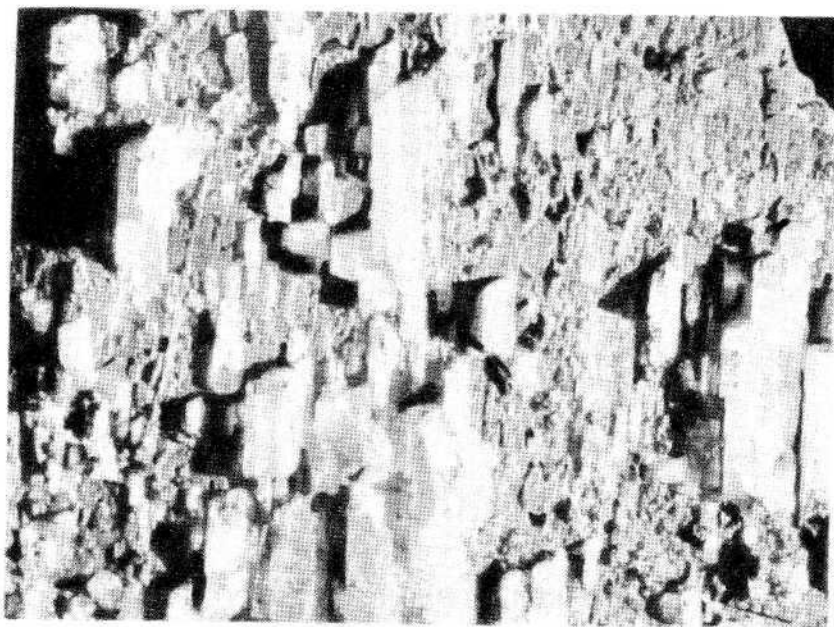


Рис. 80. Синтаксия альбита (белое) с калиевым полевым шпатом (серое) (гора Плоская, Кольский п-ов).
Грань {110}, вроски альбита обгоняют в росте грань калиевого полевого шпата.
Косое освещение

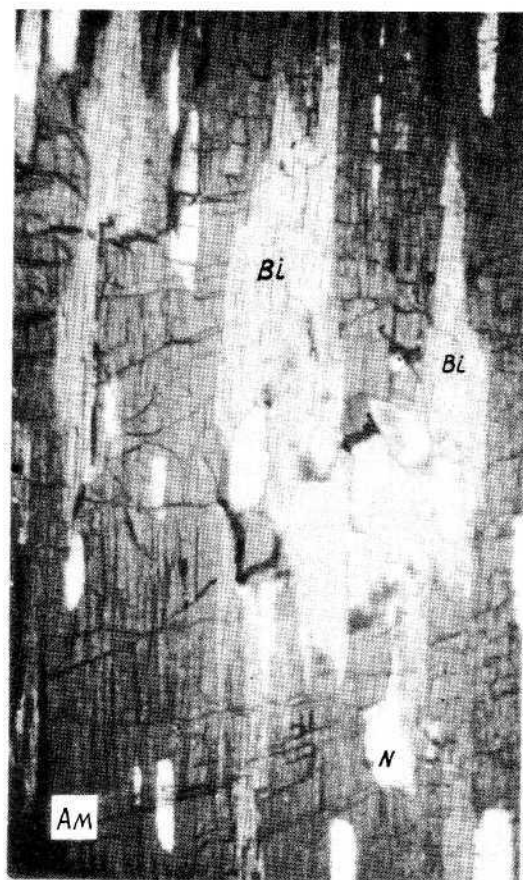




Рис. 83. Зональность по количеству пертитовых вростков альбита в амазоните (гора Плоская, Кольский п-ов). Сечение кристалла по (001). Косое освещение

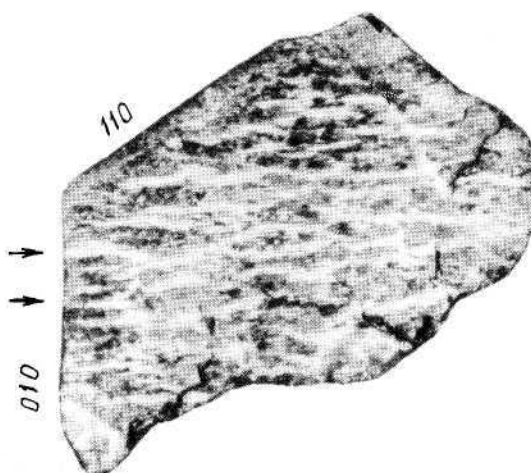


Рис. 84. Выход пертитовых вростков альбита на поверхность пинакоида (010) амазонита. Скол по (001). Косое освещение

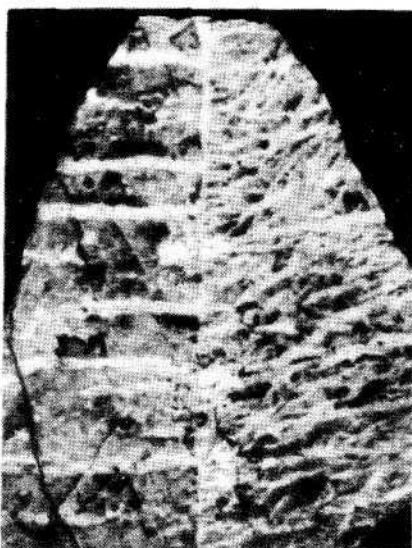


Рис. 85. Зональность по пертитам и ветвистое строение пертитов в амазоните (гора Плоская, Кольский п-ов). Сечение по (001). Косое освещение

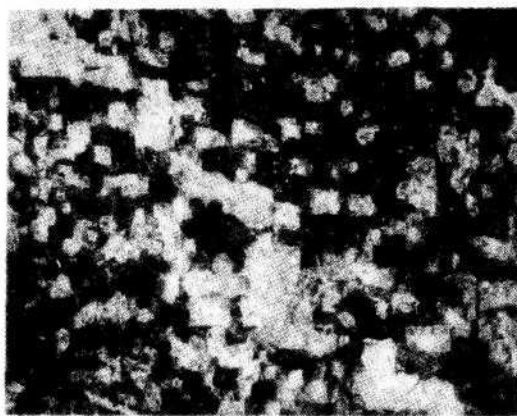


Рис. 86. Изометричные пертиты (белые) в амазоните (гора Плоская, Кольский п-ов). Сечение по (001). Косое освещение



Рис. 87. Сетка замутнения (образование пор) в амазоните (Ильменские горы, Урал). Сетка повторяет решетку микроклиновых двойников, по ней исчезает зеленая окраска, появляется светло-желтый или светло-красный цвет. Сечение по (001). Косое освещение

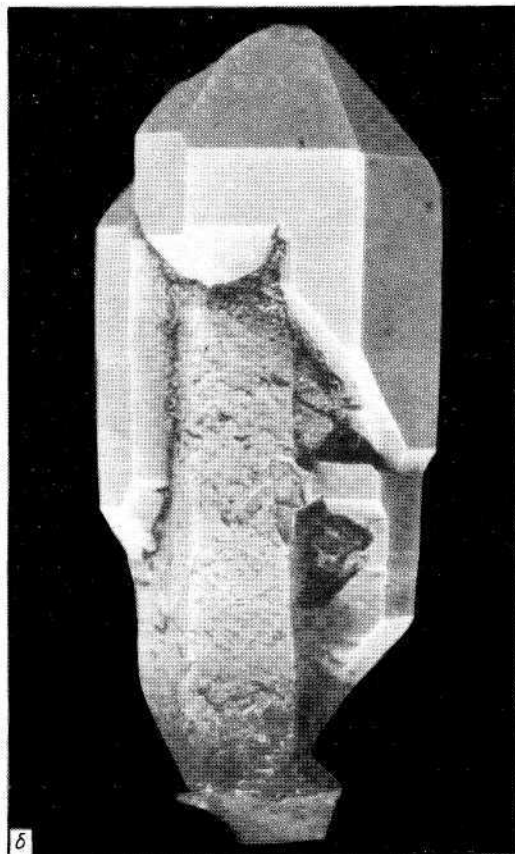
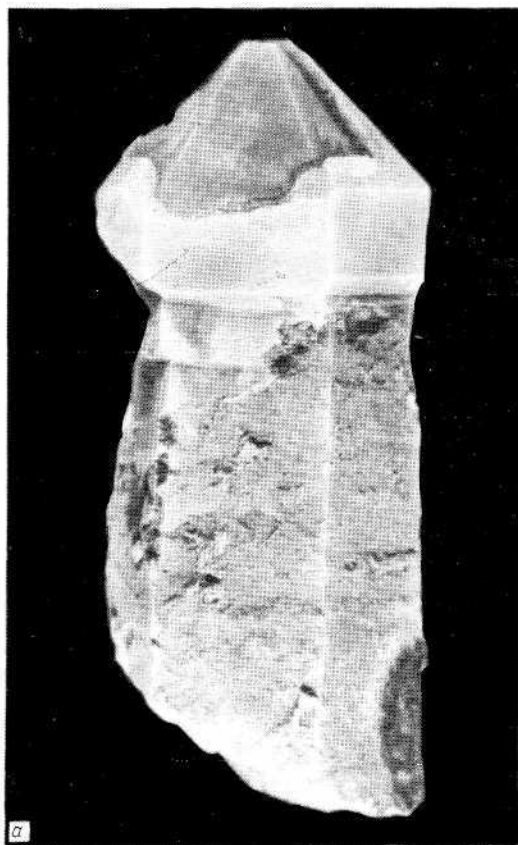
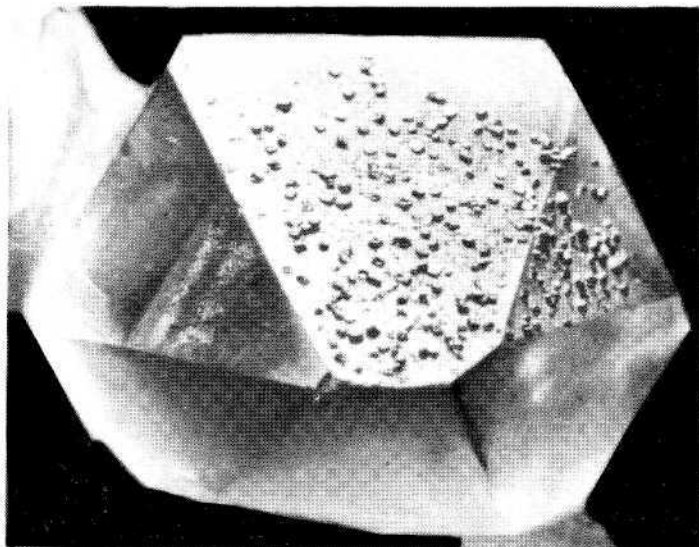
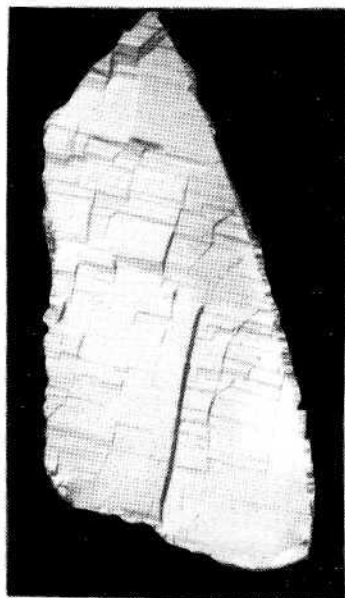


Рис. LX. Скипетровидный кристалл кварца (а) и автоэпитаксическое нарастание (две генерации) аметистовидного кварца на горный хрусталь (б) (Приполярный Урал)

Рис. LXI. Мозаичное строение грани призмы на кристалле кварца

Рис. LXII. Диссимметризация аметиста в поле силы тяжести. На верхних гранях ромбоэдров выросли кристаллы пирита (р. Витиха, Средний Урал). Косое освещение



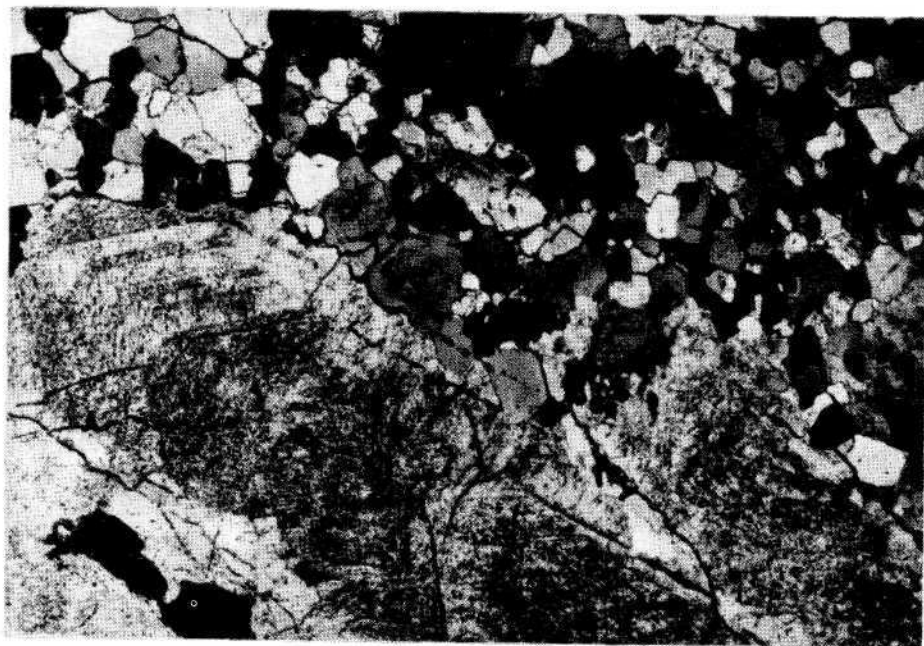
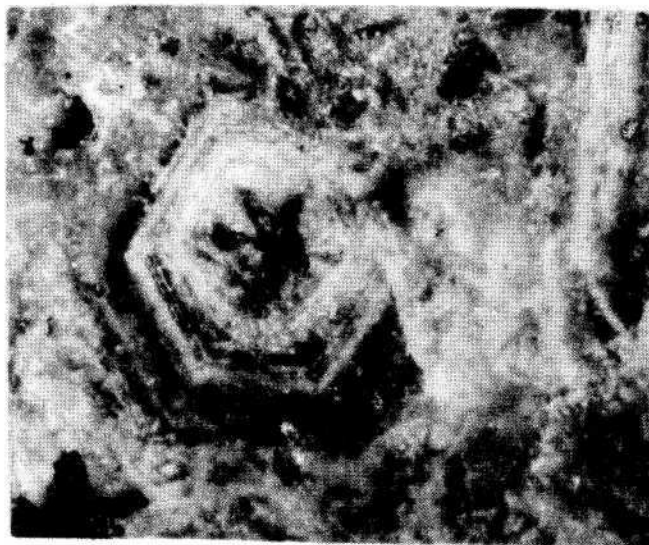


Рис. LXIII. Частично перекристаллизованный (рекристаллизованный) кварц с реликтом зонального индивида (Березовское месторождение, Урал). Шлиф, с анализатором

Рис. LXIV. Зональность в кварце, декорированная белыми зонами с большим количеством включений (хр. Баджальский, Приамурье). Косое освещение



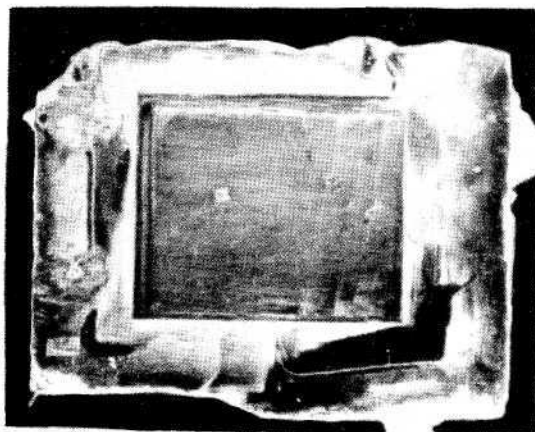
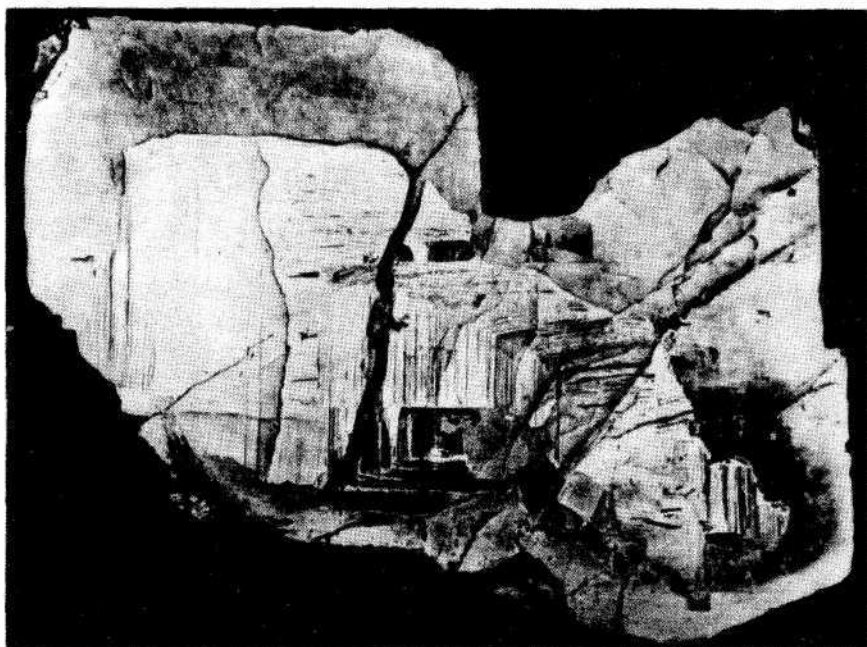


Рис. LXV. Зональность в кристалле пирита (Березовское месторождение, Урал). Протравлено, косое освещение

Рис. LXVI. Регенерация после дробления и растворения кристаллов пирита (Березовское месторождение, Урал). Протравлено, косое освещение



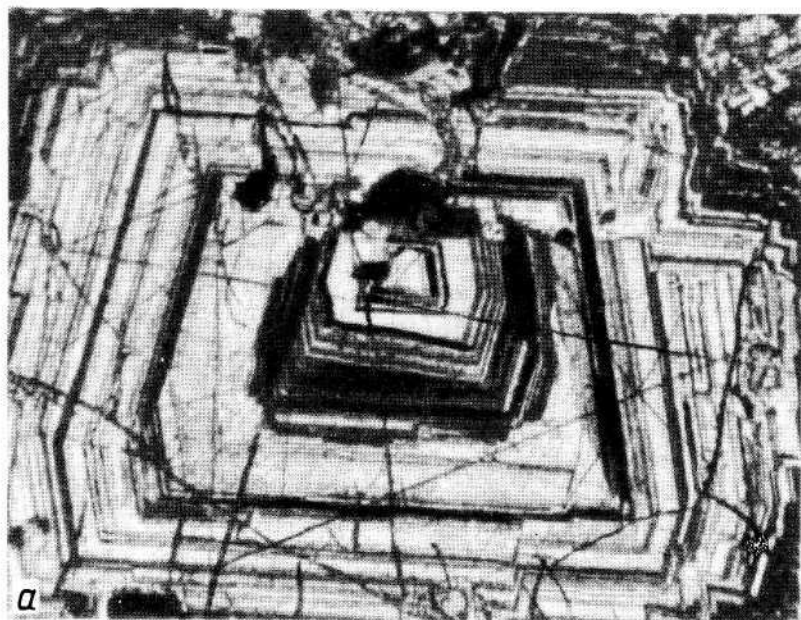
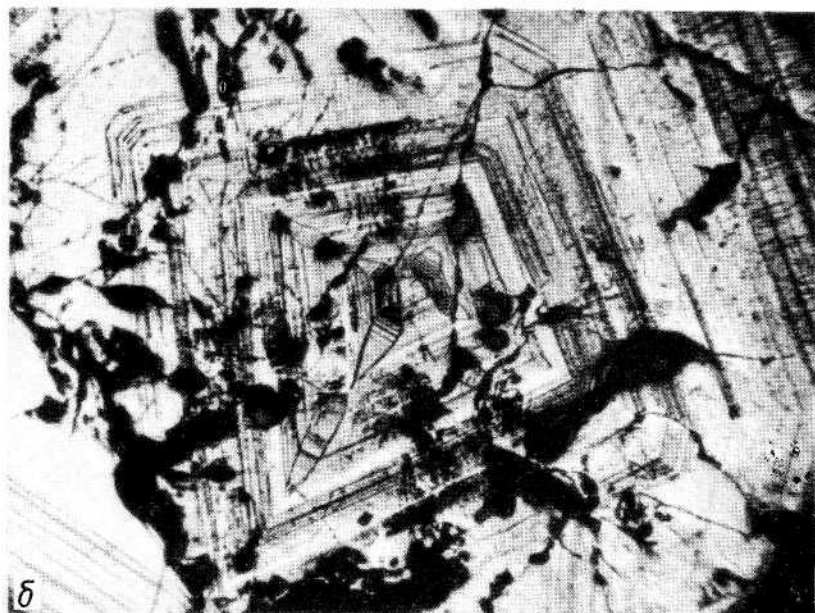


Рис. LXVII. Зональность и секториальность кристаллов магнетита и кварца, выявлены методом травления в плавиковой кислоте:
а — зональный кристалл магнетита; *б* — форма {111} магнетита с узким пирамидами нарастания граней {110}, содержащих до 8% MgO; *в* — секториальное строение дофинеяского двойника кварца, срез $\perp [0001]$; *г* — пятнистое строение дофинеяского двойника кварца, срез $\perp [0001]$; *а, б* — фот В. Н. Сергеева; *в, г* — В. В. Кушеева



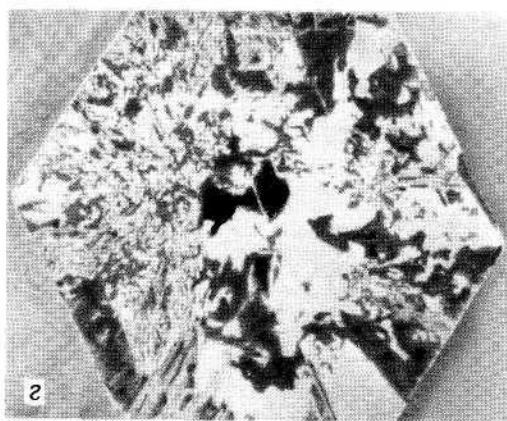
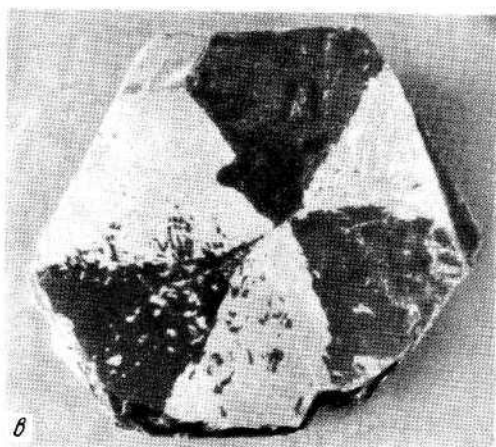
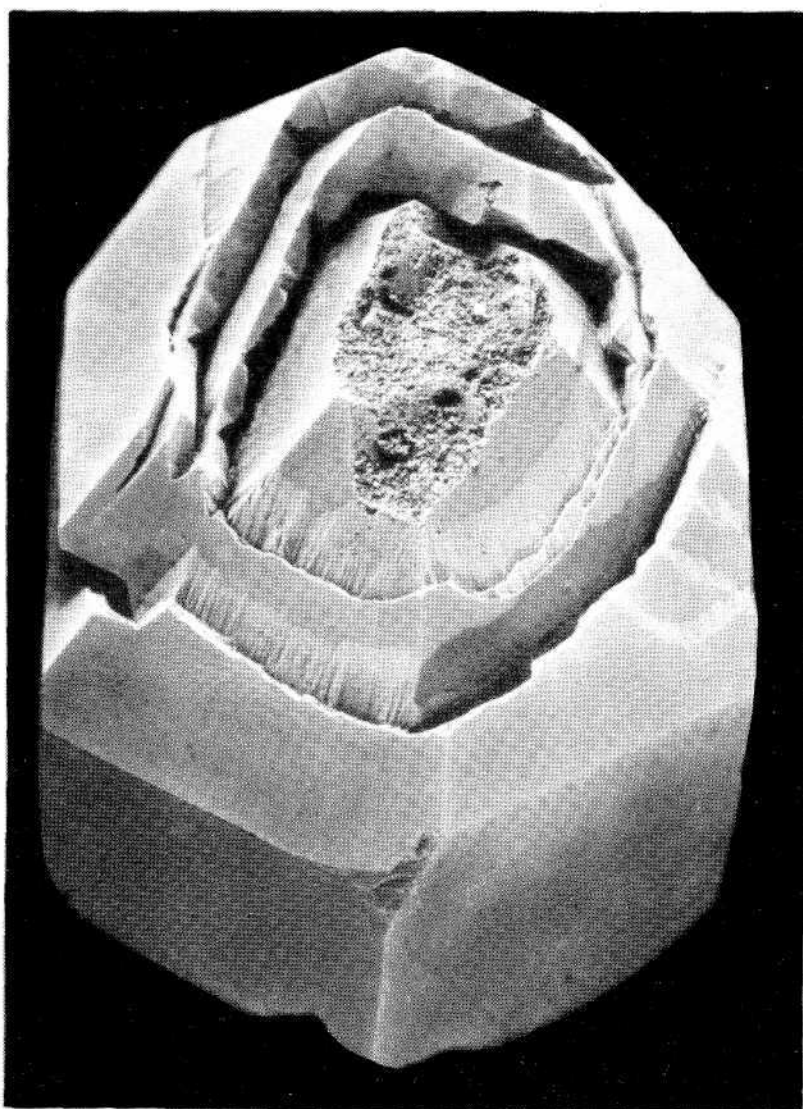


Рис. LXVIII. Головка кристалла кварца с признаками природного растворения, образец задымлен магнием



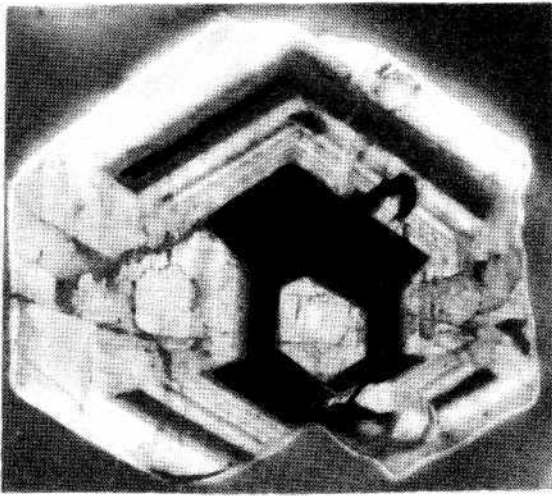


Рис. LXIX. Анатомия кристалла циркона (Вишневые горы, Урал). Сечение по (100), белые зоны обогащены гафнием, нейтронно-активационная радиография. Из коллекции В. И. Поповой

Рис. LXX. Оптическая картина секториальности кристалла эвдиалита (в форме «структуры песочных часов») как свидетельство напряжений и деформаций, вызванных проявлением полярности (Ловозерский щелочной массив). Фото Д. П. Григорьева





Рис. LXXI. Оптическая картина зональности и секториальности в кристалле вилюнта

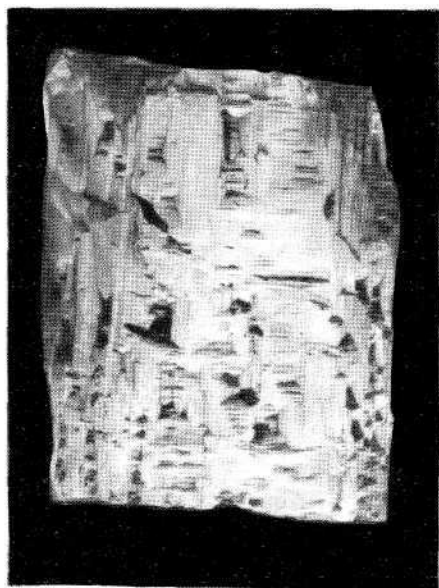
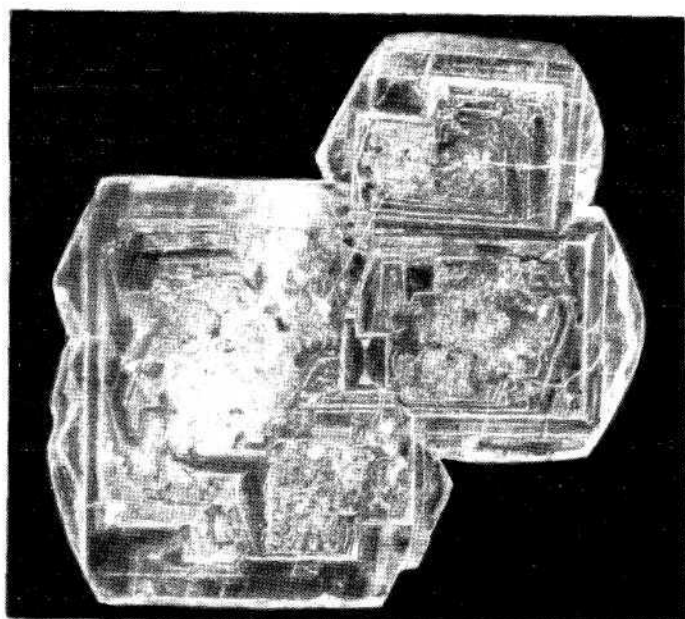


Рис. LXXII. Поверхности растворения в виде комбинации конусов, ямок и каналов на берилле, задымлен магнием

Рис. LXXIII. «Тень» структуры березита в метакристалле пирита (Березовское месторождение, Урал). Пирит меняет форму $\{100\} \rightarrow \{210\} \rightarrow \{100\} \rightarrow \{210\}$. Протравлено



во времени. Особенно часто такие взаимоотношения встречаются в сложных пирит-марказитовых агрегатах, в том числе в конкрециях, где развита как эпитаксия, так и синтаксия этих минералов. На многих месторождениях отмечаются синтаксия (рис. 41) и эпитаксия (рис. 42) других сульфидов. Из методических соображений отметим, что

эпитаксические и синтаксические взаимоотношения этих сульфидов часто неточно трактуют как замещение или распад твердых растворов. В таких случаях следует проводить объемные исследования поверхностей срастания индивидов, их анатомии, а также точное использование морфологических признаков разных явлений.

О НЕКОТОРЫХ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ВЗАИМООТНОШЕНИЙ МИНЕРАЛОВ

Пространственно-временные взаимоотношения минералов устанавливаются по результатам полевых наблюдений и лабораторных исследований. В частности, при геологическом картировании выявляются и оконтуриваются тела разных типов пород, их возрастные соотношения, тектоническая позиция. Эти данные необходимы для проведения минералогического картирования [282].

В процессе минералогического картирования решаются следующие задачи:

- 1) уточняется относительный возраст минеральных тел на исследуемом участке путем анализа условий их залегания;
- 2) выясняются неоднородности минералогических полей, выявляются минералогические аномалии, анализируются текстуры минеральных агрегатов;
- 3) расшифровывается относительный возраст минеральных индивидов и агрегатов;
- 4) отбираются образцы и пробы для лабораторных исследований.

При полевом минералогическом картировании рекомендуется использовать формулу картирования, включающую три компонента [111, 282]: 1) набор и иерархию картируемых признаков и отношений — элементов картирования; 2) масштаб картирования; 3) точность документации (качественная, приближенно-количественная, количественная). Документация является основой минералогической карты и должна отвечать следующим требованиям: 1) максимально возможному объему количественной информации; 2) точному пространственному положению; 3) унифицированной легенде; 4) компактности записи с использованием символики, табличтрафареток, графовых связей документированных признаков.

Для детальных исследований берутся пробы, образцы, штуфы, характеризующие

минерализованные полости, деформированные участки, включения других минеральных тел и т.д. Большие штуфы предназначаются для приготовления крупных пластин, специальных препаратов, для музеев. Часто бывают необходимы ориентированные образцы для исследования векторов силы тяжести, деформации направления движения питающей среды и т.д. Знаки ориентировки должны быть доставлены на образец, на место взятия образца и на зарисовке (фотографии) общей ситуации [250],

В материал пробы (штуфа) не следует вносить загрязнений. Перед препарированием образцов в лаборатории или в поле надо убедиться, что воздействие (механическое, кислотами и т.д.) не разрушит текстуру агрегата, «о для дальнейших исследований не важны выцветы, налеты, корочки, глинистые выполнения пустот, волокнистые кристаллы и т.д. Во МНОГИХ случаях целесообразно брать образцы из переходной зоны на границе выветрелых минеральных агрегатов, в которых зерна легко отделяются друг от друга. На выветрелых поверхностях и в выветрелых породах часто встречаются хорошо сохранившиеся более стойкие минералы со всеми важными для хронологических реконструкций деталями строения поверхностей.

Получение надежных морфологических признаков для хронологических построений и проведение многих количественных измерений требуют постоянного применения бинокулярных микроскопов непосредственно в поле. К этому требованию надо привыкнуть как к необходимости, научиться диагностировать многие минералы, определять их количество, форму зерен, тип поверхности на индивидах, видеть некоторые анатомические детали индивидов в их сколах (сечениях). Такой набор наблюдений и измерений можно назвать полевым минерало-стереометрическим анализом. Хо-

рошее владение этим анализом позволяет решать перечисленные задачи с помощью бинокля в поле, если индивиды не превышают 0,02—0,03 мм, что примерно соответствует предельному размеру зерен, используемому при обогащении руд.

Анализ полевых наблюдений позволяет судить о зональности объектов, о стадиях и фациях минералоотложения, о пространственных соотношениях различных концентраций минералов, о локализации продуктивной ассоциации, о размещении технологических сортов руд и т.д.

Суждения и выводы об истории минеральных индивидов, их агрегатов или минеральных тел окончательное выражение получают в результате синтеза данных полевых наблюдений и специальных лабораторных исследований. В лаборатории уточняется диагностика минералов, детализируется скульптура поверхностей на минеральных индивидах (или поверхности изучаются вновь, если в поле это было невозможно, например, из-за очень малых размеров индивидов) и решается основная задача — выявление анатомической картины минеральных индивидов и агрегатов. Все исследование должно быть непременно объемным, ибо в плоских сечениях исключительно трудно определить генетический тип поверхностей на индивидах. По образному выражению Д.П.Григорьева, "плоское сечение рождает плоскую мысль". Лишь огромный опыт может отчасти уберечь минералога от ошибок при наблюдениях в плоских сечениях. Поэтому только полная невозможность объемного изучения поверхностей может быть оправданием наблюдений границ индивидов лишь в плоских сечениях.

Оптимальными надо считать исследования, разумно сочетающие объемные наблюдения (отпрепарированных индивидов) с изучением плоских срезов, которые могут быть как кристаллографически ориентированы, так и случайны. Для начинающего минералога предлагаемый путь может показаться сложным и длительным. Этого не стоит бояться. Активное изучение кристаллографии, кристалломорфологии и онтогении минералов, собственноручно отобранных в поле, позволит достаточно быстро

преодолеть трудный период и получить результаты с правильно диагностированными морфологическими признаками последовательности событий в минеральных объектах. Довольно часто встречаются случаи, когда без выявления разноуровневой первичной и вторичной анатомической картины в индивидах и агрегатах вопрос остается открытым.

При решении пространственно-временных минералогических задач существенные трудности связаны с проблемой времени [192]. Процессы минералообразования характеризуются разной длительностью — от очень небольшой (формирование отдельных минеральных индивидов или отдельных зон в них) до весьма значительной (формирование крупных минеральных тел). Но в любых случаях масштабы минералогического времени несоизмеримо меньше масштабов геологического времени, и эта скоротечность минералогенетических процессов существенно затрудняет, а чаще всего делает невозможным [161] использование слишком грубых методов физической хронометрии. Из-за этого почти все минералогенетические реконструкции приходится проводить в топологической системе геологического времени [192], и только если удастся проследить достаточно длинные цепи минералогических явлений, становится возможной хронологическая привязка отдельных их звеньев. Поэтому основа пространственно-временных исследований — это восстановление результатов минералогенетических процессов в их естественной последовательности, например последовательности кристаллизации, изменения и разрушения минералов, а главный инструмент исследования — критерии определения относительного возраста минералов, которые, к сожалению, разработаны еще очень слабо.

Ведущее значение для восстановления исторической последовательности и пространственной эволюции событий минералогенезиса имеет онтогенетический анализ в сочетании с корреляционным анализом, логико-информационным и другими методами, позволяющими прямым или косвенным образом судить о взаимоотношениях минералов во времени и пространстве.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ КРИСТАЛЛИЗАЦИОННОЙ ИСТОРИИ
МИНЕРАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

Синтез результатов онтогенического анализа дает возможность создания временных и пространственно-временных моделей исследуемых минеральных объектов, наглядно и по возможности полно раскрывающих их кристаллизационную историю [282].

Таковыми моделями индивидов или простых агрегатов могут быть обычные геометрические реконструкции, не требующие, как правило, дополнительных пояснений. Пространственно-временное моделирование сложных агрегатов, минеральных тел и месторождений оперирует очень большим количеством информации и требует создания совокупности моделей — частных и общих. Модели эти могут быть словесно-знаковыми с графическим (для наглядности) материалом: диаграммами последовательности кристаллизации минералов, часто с дополнительной нагрузкой (см. [86, 90]), онтогеническими (эволюционными) рядами [282] и т.д. Некоторые исследователи, в частности Г.Н.Вертушков [30], предлагают для этой цели применять ориентированные сетевые графы.

Для повышения выразительности, информативности и компактности пространственно-временных моделей Ю.М.Дымковым разработана оригинальная знаковая система онтогенической информации. Изложим ее полностью в авторском варианте [90].

Предлагаемая система включает в себя знаки, обозначающие минеральные объекты (существительные), характеризующие их качества (прилагательные) и показывающие отношения между объектами, а также минерагенические процессы (глаголы). Среди объектов выделяются группы: минеральные тела — агрегаты — индивиды — субиндивиды; среди качеств: главные (родовые) и дополнительные (видовые). Зна-

ки, характеризующие качества объектов, ставятся впереди их обозначения, а знаки, раскрывающие внутреннюю архитектуру объекта, — справа от обозначения или внутри фигурных скобок, выражающих целостность объекта. Все знаки, если над ними ставится стрелка, являются вектором времени или направленности событий, характеризуют процесс и читаются как глаголы.

Таким образом, составленная из соответствующих знаков морфогенетическая формула минерального объекта может быть развернута словесно в обычное грамматическое предложение.

Знак { } используется как показатель целостности (системности) минерального объекта, причем допускаются отклонения от традиционного кристаллографического применения (например, кубооктаэдр обозначается как {100 + 111}, {100 > 111} или {100 → 111}). Среди окристаллизованных индивидов I выделяются: {•} — кристаллические зародыши, центры роста; { I }, { I' }, { I } — соответственно плоскогранный индивид изометрического габитуса, вытянутый (игольчатый) и пластинчатый; { I } — минеральное зерно, антедральные формы и { I } — субтедральные зерна (при обозначении агрегатов — без фигурных скобок). Для кристаллографически определенных форм даются кристаллографические индексы { hkl } и фигуры, обозначающие форму или симметрию: ■, ●, ▲, ■, ●, ◆, ▲. Скелетные кристаллы: {> I <} — реберники, {} I {} — вершинники; {} I {} — гранники; дендриты — {} I {}. Обозначим $\ni$ включение в систему или принадлежность к системе. Тогда дендрит, состоящий, например, из вершинников, получит обозначение {} I {} $\ni$ {} I {}.

Среди мозаичных и расщепленных ми-

неральных индивидов можно выделить: Y_1 — нормально и Y_L — аксиально расщепленные (переход в фиброкристаллы $\parallel$), Y_R — радиально расщепленные (переход в сферокристаллы $\odot$), Y_N — нерегулярно расщепленные мозаичные индивиды. Добавим знак $\rangle$ для отображения "спирального" расщепления вдоль дислокаций, которым можно отмечать и вращение кристаллических волокон: $Y\rangle$ — расщепление вдоль винтовых дислокаций. Аксиальное и особенно нормальное расщепление часто заканчивается образованием фиброкристаллов — $\parallel$ — окристаллизованных или ангедратных минеральных индивидов, пирамиды роста или внутренние зоны которых состоят из ориентированных перпендикулярно к граням или зонам роста игольчатых субиндивидов (кристаллических волокон). Радиальное расщепление ведет к образованию сферокристаллов; а радиальная агрегация — к образованию сферолитов $\{RI\}$: $\overline{Y}_R \rightarrow \{RI\}$. Сферокристаллы подразделяются кристаллографически на несколько видов: $\{KO\}$, $\{SO\}$, $\{FO\}$ — сферокристаллы, образовавшиеся соответственно вследствие расщепления пирамид роста K , S , F граней. Среди сферокристаллов встречаются зародышевые формы — двулистники и многолистники: $\{x\}$ и $\{x\}$, образованные соответственно при расщеплении игольчатого и пластинчатого кристаллов, ромбической $\{\phi x\}$, тригональной $\{\Delta x\}$ и иных сингоний. Отметим также $\odot n$ — сферокристаллический пучок; $\odot/2$ или $\{RI/2\}$ — гемисферы (полусферы); $\{\Omega\}$ — сферондолит; $\{\Omega\}$ — сферондолитовый дендрит. Можно специально отмечать открытые формы: открытый сферолит ("сея", "солнце") — $\{RI\}$, открытый сферокристалл — $\{\odot\}$, открытый сферондолит — $\{\Omega\}$, составная часть открытого сферондолитового дендрита — кристаллики $\{\Omega\}$.

Своеобразны полиминеральные индивиды $\{I_1 \ni I_2\}$, состоящие из двух и более минералов.

Индивид можно рассматривать как систему ориентированных определенным образом субиндивидов i , т.е. $\{I \ni i_n\}$. Цифрами у знака субиндивида покажем порядок в иерархии субиндивидов $i_1 \ni i_2 \ni i_n$ и порядок зональности Z , т.е. $Z_1, Z_2, \dots, Z_n$. Радиальные субиндивиды первого порядка — это пирамиды нарастания граней $\langle i \rangle$, которые могут быть обозначены кристаллографическими символами $\langle hkl \rangle$. Вместе с тем кристалл можно охарактери-

зовать не только как систему радиально или параллельно упорядоченных пирамид нарастания $\{I \ni \langle i \rangle\}$, но и как систему тангенциальных субиндивидов — разрастающихся зон (фантом) $\{I \ni Z_n\}$. Индивиды мозаичного строения с изометричными субиндивидами-блоками получают обозначение $\{I \ni \{i\}\}$. У плоскогранно-кривогранных кристаллов одни пирамиды нарастания радиально расщепленные, в то время как другие — плоскогранные $\{I \ni \langle Y_R i \rangle \equiv \langle i \rangle\}$ или нормально расщепленные $\{I \ni \langle Y_R i \rangle \equiv \langle Y_i \rangle\}$.

К формам, промежуточным между индивидами и агрегатами, относятся обо-собленные индивидуализированные сростки кристаллов и двойники. Двойники и эпитактические сростки кристаллов характеризуются одним знаком $\{EI\}$, параллельный и радиальный сростки обозначены соответственно знаками EI и K_R , сростки неупорядоченных кристаллов — K_N .

Минеральный агрегат — скопление минеральных индивидов, не обладающее в начальный или конечный момент саморазвития своей внутренней текстуры четкими признаками симметричных фигур. Агрегат может состоять из определенным образом ориентированных (упорядоченных) индивидов, однако его геометрическая целостность (образование минерального тела) обусловлена не упорядоченностью компонентов, а формой пространства кристаллизации минералов и симметрией переноса вещества.

Обозначим агрегат знаком Σ , в том числе геометрически индивидуализированный (целостный) агрегат — минеральное тело — $\{\Sigma\}$. Используя знак агрегата, можно подчеркнуть текстурную сложность, агрегатность некоторых сферолитов, сферолитовых почек, кокард, обозначая их как $\{R \Sigma\}$, $\{R \Sigma \odot n\}$, $\{R \Sigma RI\}$ и т.д. В частном случае сферолит из игольчатых октаэдрических субиндивидов, вытянутых по L_4 (на поверхности выступают вершины октаэдра), характеризуется формулой $\{R \Sigma L_4 \parallel \parallel \parallel \}$.

Для округлых минеральных тел могут быть даны другие обозначения: $\{\odot\}$ — затвердевшие капли расплава; $\{\odot\}$ — глобулы и стяжения битумов; $\{\otimes\}$ — конкреции, в том числе $\{L_\infty \otimes\}$ — конкреция в виде фигуры вращения; $\{\odot\}$ — секрция; $\{\otimes\}$ — жеода; $\{\otimes\}$ — миарола; $\{\odot\}$ — овоиды и другие метасоматические гнезда. Зернистая конкреция, имеющая форму фигуры вращения, характеризуется формулой $\{R \Sigma L_4 \parallel \parallel \parallel \}$.

Агрегат как "наполнение" какого-либо минерального тела обозначается без фигурных скобок, например $\Sigma \{I\}$ — агрегат идиоморфных (эвгедральных) кристаллов. Знаки текстурных признаков агрегата ставятся перед Σ , структурные — следом. Например, ΣN — агрегат с нерегулярной структурой, но $\downarrow \Sigma$ — гравитационный агрегат; гравитационные текстуры: $\downarrow$ — минералогический уровень, $\uparrow$ — отвес, $\uparrow$ — газогравитационная текстура. Примеры простейших формул агрегатов: $\downarrow \Sigma \{I\}$ — зернистый осадок, $\downarrow N \{I\}$ — присыпки разобленных кристаллов, $\downarrow \Sigma N \odot$ — нетекстурированный осадок сферокристаллов. Используя знак параллельности $\parallel$, можно обозначить, например, параллельно-столбчатый агрегат $\Sigma \parallel \{I\}$; при объединении кристаллических волокон в блоки образуется агрегат фиброкристаллов (прожилки кальцита в антраксолите) $\Sigma \parallel \{I\}$.

Для характеристики генетических взаимоотношений между индивидами (или агрегатами) минералов используются обозначения статических и динамических систем. Статические взаимоотношения выражаются обозначением границ между минералами (в скобках текстовые сокращения):

$/K$, $/PK$, $/SK$ — кристаллизационные (к-границы); pk — последовательной и sk — синхронной кристаллизации (индукционные границы, поверхности); $/T$ — тектонические (т-границы); $/M$ — метасоматические (м-границы); $/P$ — растворения (р-границы); $/D$ — диффузионного изменения (д-границы); $/H$ — "ископаемые", реликтовые, слабопроявленные (и-границы); $/G$ — гравитационные границы.

Для обозначений направленности процессов и механизма первичного отложения и преобразования минеральных индивидов и агрегатов применимы знаки с векторами времени: $\rightarrow$ — направление любого процесса во времени, эволюция, нарастание и т.д.; $\rightarrow/$ — перерыв, разрыв процесса во времени, $\rightarrow/^{150C}$ с указанием в верхнем индексе "изотопного" возраста, млн лет; $\rightarrow$, $\rightarrow$ — пассивное нарастание, цементация; $\rightarrow$ — эпитахическое нарастание, автоэпитахия, регенерация индивида; $\rightarrow$ — эндотаксический рост, фазовые превращения; $\rightarrow$, $\rightarrow$, $\rightarrow$, $\rightarrow$ — процессы: расщепление, зарождение, агрегация, геометрический отбор; $\rightarrow$, $\rightarrow$, $\rightarrow$ — процессы замещения и растворения; $\rightarrow$, $\rightarrow$ — одновременно образовавшиеся, синхронный рост (процесс); $\rightarrow$, $\rightarrow$ — твердые растворы, распад твердых растворов; $\rightarrow$, $\rightarrow$ — радиацион-

но измененный, со стрелкой — радиоактивный распад, радиолиз; $\rightarrow$ — перекристаллизация и рекристаллизация; $\rightarrow$ — пластические деформации; $\rightarrow$ — в процессе отложения, $\rightarrow$ — при метаморфизме; x , xx , xxx — катаклаз, диспергирование (интенсивность); Y_x — механическое блокирование или расщепление.

Знаки $\rightarrow$ и $\rightarrow$ обозначают пространство, $\rightarrow$ — направленность кристаллизации в пространстве (сверху вниз), осаждение; $\rightarrow$ — флотация, газогравитационная дифференциация и т.д.

Используя знак геометрического отбора $\odot$, можно охарактеризовать ряд распространенных текстур через структуру роста: $\Sigma \odot \{RI\}$ — друзовая корка сферолитов; $\Sigma \odot \{I\}$ — друза кристаллов; $\Sigma \odot \{I\}$ — шетка дендритов. Процесс перехода их в столбчатые корки: $\Sigma \odot \{RI\} \rightarrow \Sigma \odot \parallel \{I\}$, $\Sigma \odot \odot /n \rightarrow \Sigma \parallel \odot /n$.

Для обозначения продуктов (и процессов) метасоматического роста и преобразования используются буквенные обозначения: M — метайндиивиды, $\{MI\}$ — метакристалл, $\{M \odot\}$ — метасферокристалл, $\{M\}I\}$ — метадендрит и т.д. P — реликты, например PI — реликт-кристалл; Π — псевдоморфозы, $\rightarrow \Pi$ — псевдоморфизация, $\rightarrow \Pi$ — параморфозы. Пойкилит, образовавшийся при метасоматозе, содержит реликты раннего минерала: $\{M_2\} \ni \Sigma PI$. Обозначим квадратными скобками индивиды замещенного минерала. Тогда формулу агрегатной псевдоморфозы можно дать в виде $\{I_1\} \rightarrow \Pi \Sigma I_2$, а процесс псевдоморфизации — $\{I_1\} \rightarrow \Pi \Sigma I_2$. Разновидности и генетические типы псевдоморфоз $[I_3]$ обозначаются либо общими, либо специальными (сокращенными) знаками и, там где это возможно, кристаллографическими символами. Примеры: параморфоза $\{ \{ \diamond I \} \} \rightarrow \Pi \{ \blacksquare I \}$, радио-генная псевдоморфоза $\rightarrow \Pi \{I\}$, гомо-осевая псевдоморфоза ромбоэдрического доломита по скаленоэдрическому кальциту $\{ \{ 2131 \} K \} \rightarrow \Pi L_3 \ni \{ 1011 \} D$, псевдоморфоза выполнения зернистым агрегатом $\{I\} \rightarrow \Pi \Sigma N \{I\}$.

Способ обозначения (индексы, химические формулы и т.д.) и место их в последующих разделах меняется в зависимости от сложности морфогенетической нагрузки. Для частных исследований целесообразно принять какой-то единый способ.

Пространственно-временные модели в зависимости от масштаба характеризуемого объекта могут отражать самые различ-

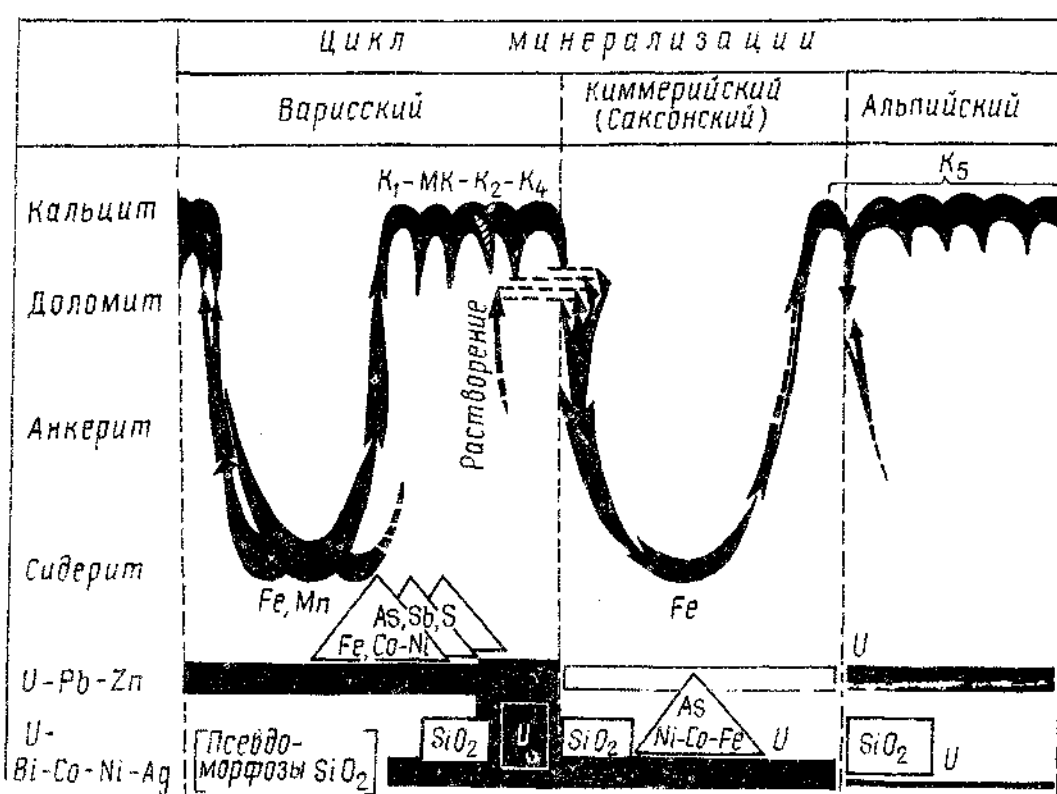


Рис. 43. Схема эволюции карбонатов в рудных жилах [90].

По часовой стрелке — процесс кристаллизации, против — процесс замещения. МК — марганцовистый кальцит; $K_1, K_2, \dots$ — генерации кальцита

ные отрезки кристаллизационной истории: от образования отдельных индивидов до развития минеральных тел и даже более крупных объектов.

Для минерального индивида понятие пространственно-временной модели малоприменимо, так как все морфолого-анатомические сведения о нем (данные об изменении состава и свойств от центра к периферии и т.д.) и составляют такую модель. История развития минерального индивида — это часть эволюции более крупного объекта, элементом которого индивид является.

Наиболее удобной для использования и обладающей наибольшей степенью подобия пространственно-временной моделью минерального агрегата является его геометрическая реконструкция. Геометрические (как плоские, так и стереометрические) модели друз, сферолитов, поперечно-шестовых и других моно- и полиминеральных агрегатов позволили разобраться во всех тонкостях механизмов их формирования и дать достоверную генетическую интерпретацию наблюдаемых закономерностей.

В целях детализации геометрические

модели минеральных агрегатов нередко дополняются информацией о точных количественных соотношениях числа индивидов или объема вещества в разные моменты их истории, о динамике изменения во времени и в пространстве различных качественных показателей.

Минеральные тела и минеральные месторождения несравнимо сложнее индивидов и агрегатов, поэтому и пространственно-временное моделирование их является достаточно трудоемкой задачей.

Пространственно-временные модели мигрирующих месторождений подразделяются на общие и частные. Общие модели отражают все главнейшие закономерности формирования и распределения минералов во времени и в пространстве, поэтому они характеризуются высокой степенью обобщения и представляются, как правило, в виде словесно-таблично-графического описания месторождений. Примерами может быть любое комплексное монографическое описание месторождения. Частные модели отражают какие-либо отдельные черты, поэтому они могут быть достаточно детальными.

Наиболее популярными временными

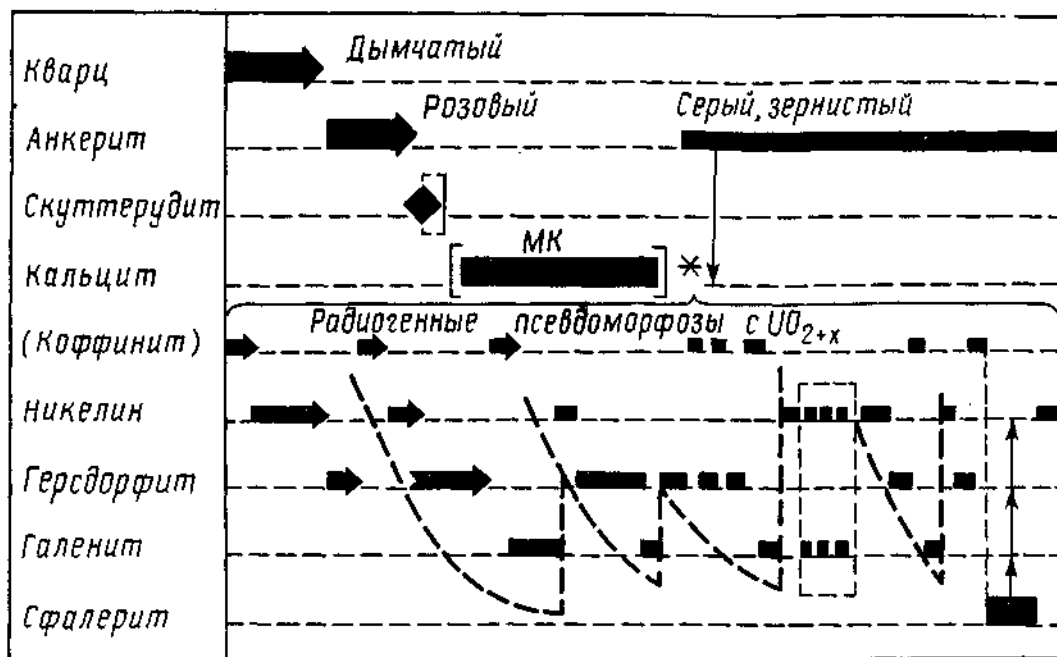
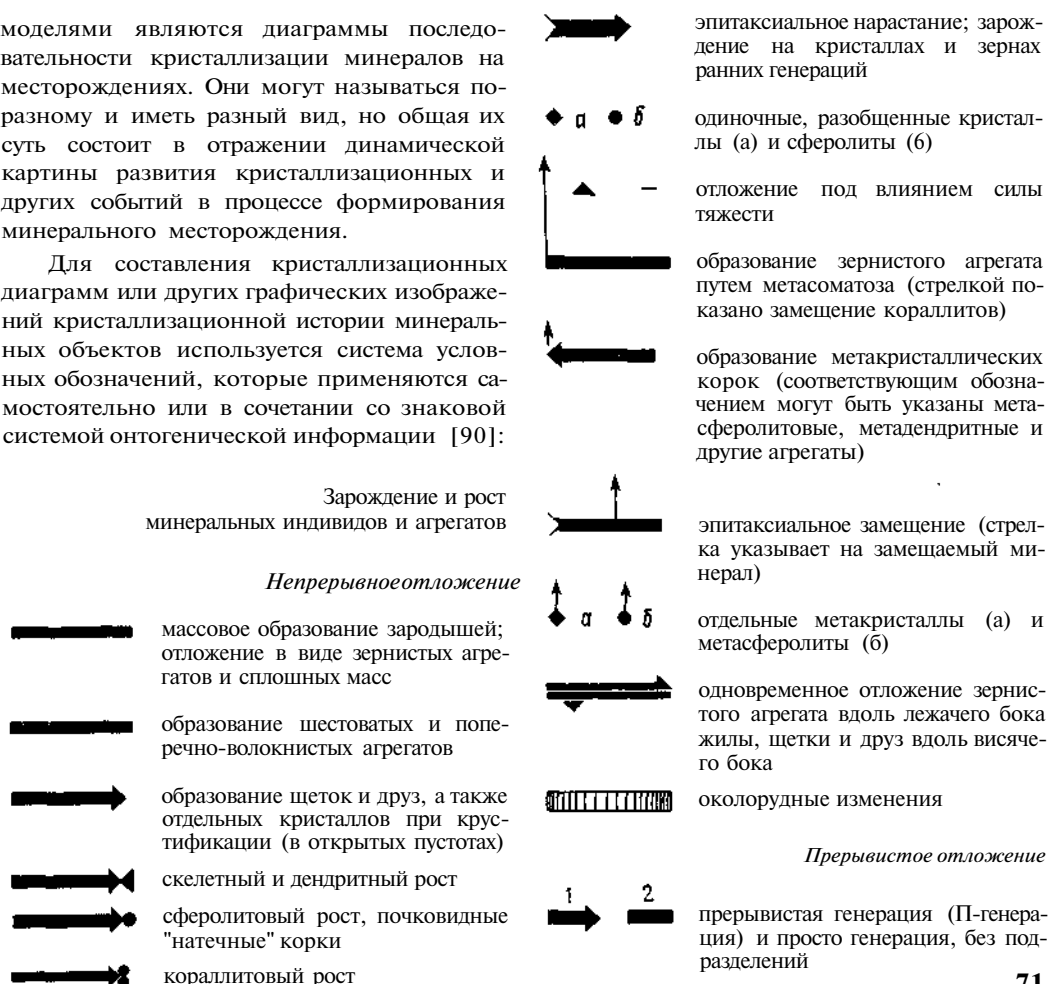


Рис. 44. Частная схема образования минералов в арсенидных гнездах Пршибрама [90].
Жирными штриховыми линиями показаны варианты выделения ритмов

моделями являются диаграммы последовательности кристаллизации минералов на месторождениях. Они могут называться по-разному и иметь разный вид, но общая их суть состоит в отражении динамической картины развития кристаллизационных и других событий в процессе формирования минерального месторождения.

Для составления кристаллизационных диаграмм или других графических изображений кристаллизационной истории минеральных объектов используется система условных обозначений, которые применяются самостоятельно или в сочетании со знаковой системой онтогенетической информации [90]:



прерывисто-непрерывные генерации (ПН-генерация): зернистые агрегаты лежащего бока заканчиваются шеткой кристаллов

Изменение и разрушение минеральных индивидов и агрегатов



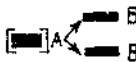
полное растворение или замещение (в данном случае зернистого агрегата), исчезнувший минерал



частичное замещение или растворение (в данном случае отдельной зоны друзовой шетки)



регенерация минерала А в связи с замещением его минералом Б (показана косой стрелкой)



образование минералов Б и В в результате распада минерала А

IP1 растворение минерала (место процесса во времени)

перекристаллизация минералов
(место процесса во времени)

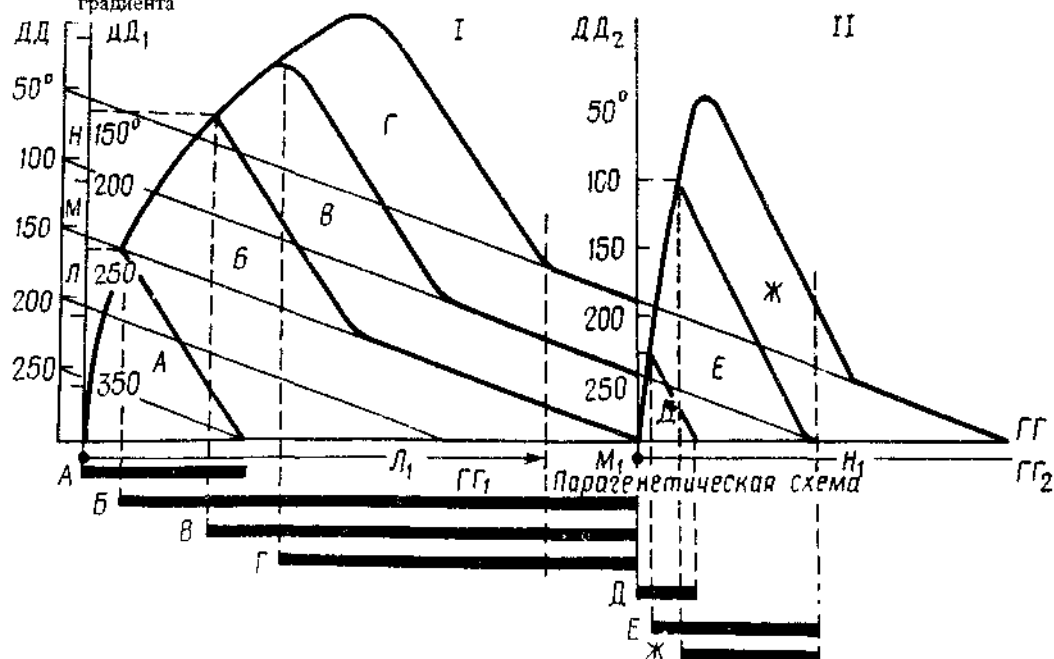
тектонические подвижки и нарушения: *κ* - катаклиз; *д* — дробление; *б* - брекчирование минералов

Таблица 6. Схематическая диаграмма кристаллизации минералов в камерных пегматитах Волыни

[illegible]

Рис. 45. Пространственно-временная модель двухстадийного (I и II) минералообразования в градиентном поле 1901:

$A, B, \dots, Ж$ – минералы; $ДД, ДД_1, ДД_2$ – расстояние от очага кристаллизации; $ГГ, ГГ_1, ГГ_2$ – время максимального отложения минерала; $ЛЛ_1, ММ_1, НН_1$ – линии изменения теплового градиента



Примеры таких кристаллизационных диаграмм для объектов разного масштаба приведены на рис. 43, 44 и в табл. 6.

Распространенная и показательная форма выражения кристаллизационной истории — эволюционные минералогические ряды. В такие ряды можно выстроить минералы, слагающие минеральный агрегат, минеральное тело или минеральные парагенезисы и т.д.

Важное значение для обобщения данных о кристаллизационной истории минералов имеет представление о пространственно-временных полях образования минералов, развитое Ю.М.Дымковым [90] на основе диаграммы топографических и хронологических концентров А.Е.Ферсмана. По оси ординат на них откладывается расстояние от очага первичной кристаллизации (ДД), по оси абсцисс — время максимальной кристаллизации данного минерала (ГГ). Смысл диаграмм, подобных изображенной на рис. 45, детально разобран в работе Ю.М.Дымкова.

На рис. 45 представлена кристаллизационная модель двухстадийного минералообразования в градиентном поле. Отдельные акты процессов минералообразования со сравнительно небольшой длительностью (если сравнивать со всей историей формирования месторождения) развиваются на фоне медленного изменения теплового градиента (ЛЛ1 - ММ1 - НН1 - ...).

Кристаллизационные пространственно-временные поля каждой порции растворов накладываются на пространственные тепловые поля вокруг остывающего массива или другой какой-то изменяющейся во времени минералообразующей системы. Схема двухстадийного минералообразования учитывает ряд закономерностей, в частности: 1) длительность процессов минералообразования определенных температурных интервалов не может быть меньше длительности остывания окружающих пород в этом же интервале температур; 2) процессы постмагматического минералообразования в общем случае должны протекать таким образом, чтобы длительность их к концу процесса закономерно возрастала, а скорость реакций резко снижалась. В приведенном примере рассмотрены лишь сечения пространственно-временных полей устойчивости минералов, параллельные оси абсцисс (ГГ). Сечения пространственно-временных полей, параллельные оси ДД, дают представление о возможной пульсационной зональности отложения минералов.

Мы рассмотрели лишь важнейшие способы восстановления кристаллизационной истории минеральных объектов. Нужно отметить, что эта проблема пока разработана очень слабо, и здесь открывается широкий простор для методологических поисков.

МИНЕРАЛОГЕНЕТИЧЕСКИЕ РЕКОНСТРУКЦИИ

На основании рассмотренного выше (гл. I) современного представления о генезисе минералов [64] можно дать определение, что минералогенетическая реконструкция — это восстановление как онтогенеза минералов, включая их зарождение, рост и изменение вплоть до разрушения, так и физико-химических условий, в которых реализуются онтогенез, способ образования минералов и геологический процесс минералообразования. Совершенно ясно, что реконструировать все указанные стороны генезиса минералов — это, пожалуй, наиболее сложный и ответственный вид генетического обобщения, которое только возможно на основе синтеза данных всех направлений минералогии, в том числе топоминералогии, парагенетических исследований, физико-химического анализа и непременно на онтогенетической основе. Последний акцент подразумевает не генезис вообще, в каком-то обобщенном, опосредствованном понимании, а привязку и взаимосвязь параметров среды с конкретными элементами анатомии индивидов и агрегатов, или, другими словами, моделирование процесса минералообразования, в том числе состава, температуры, давления, агрегатного состояния и других особенностей среды, на основе пространственно-временной модели минералогического объекта.

Общая методическая схема минералогенетических реконструкций такова [76, 102, 278]: вначале восстанавливаются в их естественной последовательности результаты минералогических процессов, а затем

по этим результатам с применением соответствующих минералогенетических индикаторов восстанавливается сам процесс минералообразования, определяются параметры состояний среды, в которых он протекал. Объектами минералогенетических исследований являются, следовательно, минералы или другие более сложные минеральные образования, а основу минералогенетических реконструкций составляют пространственно-временные модели минералогических систем. Задача состоит в том, чтобы пространственно-временную модель объекта с помощью генетико-информационных методов трансформировать в модель генетическую.

Общий подход к созданию минералогенетических реконструкций различных толкований не вызывает. Существуют некоторые разногласия в более частных методических приемах и в терминологии проблемы. Н.П.Юшкин предлагает минералогенетические реконструкции делить на качественные и количественные. В первом случае они осуществляются с помощью информационно-энтропийного или типоморфического анализа, а также путем оценки по качественным индикаторам генезиса. Количественные минералогенетические реконструкции осуществляются с помощью генетико-информационного анализа на основе индикаторных признаков, играющих роль минералогических часов, термометров, барометров и т.д. По мнению В.И.Павлишина, все показатели условий минералообразования, независимо от того, как точно они их отражают (качественно, приближенно-количественно или количественно), должны рассматриваться в учении о типоморфизме минералов. Поэтому ос-

новным методом, с помощью которого пространственно-временная модель трансформируется в генетическую реконструкцию, является типоморфный анализ. Эту мысль можно изобразить схематически: онтогенетический метод + типоморфный анализ = минералогенетическая реконструкция. С точки зрения существа дела эти разногласия принципиального значения не имеют.

Создание минералогенетических реконструкций по схеме, учитывающей все стороны и особенности генезиса минералов, в том или ином геологическом объекте земной коры - дело будущего. В настоящее время поддается расшифровке, и то неполностью, ограниченное количество минералов, главным образом из крупных месторождений неметаллических полезных ископаемых. Частных определений с указанием происхождения минералов - магматический, гидротермальный, осадочный, метаморфический, метаморфогенный (по устаревшей методологии это и есть генезис минералов) — описано великое множество.

Строгие формы представления генетических моделей еще не разработаны, поэтому пока они излагаются традиционно - словесно, в виде таблиц, диаграмм или в картографической форме. Наиболее обычным способом представления минералогенетической информации являются диаграммы, отображающие последовательность минералообразования, сведения о наиболее важных параметрах среды и их эволюцию в связи с анатомией индивидов или агрегатов. Эти данные графически увязываются с кристаллизационной историей объектов, привязываются к возрастным рубежам. Сюда же может вводиться информация о тектоническом режиме формирования минеральных тел, периодах дробления, метаморфизма, магматизма и других геологических процессах.

Результаты минералогических исследований в конечном итоге их анализа, обработки и обобщения должны дать материал для увязки эволюции минералообразования с геологической эволюцией региона. Это выражается в синтезе минералогенетических и геоисторических представлений и создании общих геолого-минералогических эволюционных схем. В "Опыте среднемасштабной топоминералогии" [281] построена подобная схема для Пайхойско-Южновоземельской провинции. Пространственно-временные ряды руд-

ных формаций, определяющие минералогический облик провинции, увязаны на этой схеме с эволюцией осадконакопления в различных структурно-фациальных зонах, с колебаниями уровня седиментационных бассейнов, с тектоническим режимом, эффузивным и интрузивным магматизмом. Близкие эволюционные схемы построены также для Донецкого и Криворожского бассейнов [151, 153], но опыт их создания еще небольшой, и генетическая часть в них имеет в основном традиционное звучание, т.е. в ней нет онтогенетического фундамента. С точки зрения названной в заглавии темы наиболее детально изучены жильные гидротермальные образования [9, 21, 172, 187, 220, 273 и др.] К их анализу мы и обратимся, используя литературные и наши данные.

1. Происхождение гидротермальных жил, особенно источник их растворов и рудного вещества — предмет острых дискуссий [8, 20, 91, 132, 172, 220, 268 и др.]. С точки зрения этой проблемы проанализируем анатомию и типоморфизм кристаллов кварца из рассматриваемых образований. Если принять во внимание только типичные картины анатомии кристаллов, то четко вырисовываются два основных типа кристаллов кварца в гидротермальных жилах. Примером кристаллов первого типа могут служить кристаллы из гидротермальных жил Приполярного Урала [21], происхождение которых связывается с постмагматическим этапом становления Кожимского интрузивного комплекса. Для этих кристаллов характерна (рис. 46) смена в процессе роста дымчатых зон на цитриновые или бесцветные в пирамидах роста основных ромбоэдров. Иной анатомией кристаллы кварца, представляющие второй тип, в гидротермальных жилах Донбасса. Они отличаются преобладанием цитриновых зон роста на ранних — средних стадиях формирования и дымчатых — на заключительных, т.е. распределение зон обратное по отношению к первому случаю (рис. 46). Зональность первого типа мы условно называем прямой, второго — обратной. Естественно, возникает вопрос: следствием каких условий и процессов являются данные зональности? С этой целью проанализируем изменение дефектности кристаллов кварца в процессе их роста. Для кристаллов с обратной зональностью установлено, что в процессе роста концентрация центров $Al - O''$, а также центров окраски $Al - O'' - Na$ увеличивается, а содержание центров $Al - O'' - LiH$ уменьшается (от-

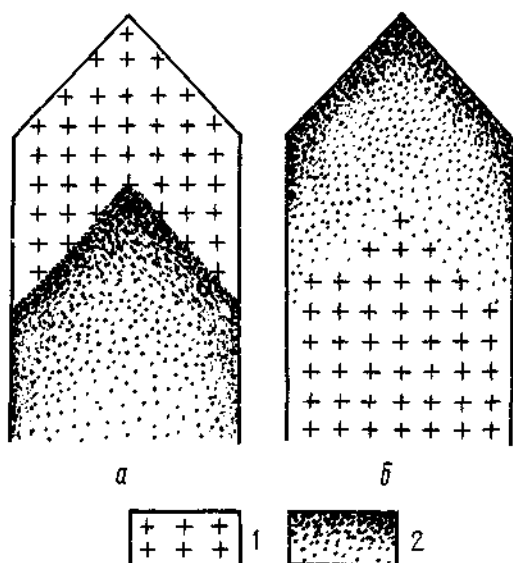


Рис. 46.

Упрощенная схема анатомии кристаллов кварца: *a* - из гидротермальных образований постмагматической природы; *б* - более сложного происхождения; 1 - распределение цитриновой окраски; 2 - то же, дымчатой

чего и происходит смена окраски с цитриновой на дымчатую), параметр "а" элементарной ячейки увеличивается, а содержание протонов уменьшается. Сопоставление этих характеристик с аналогичными данными для кристаллов с прямой зональностью свидетельствует о противоположных тенденциях изменения примесной дефектности в процессе роста кристаллов. Эти данные с учетом результатов экспериментальных исследований В.С.Балицкого, замеров рН включений в кристаллах кварца, произведенных Д.К.Возняком, а также данные водных вытяжек, показавшие для кристаллов с обратной зональностью преобладание калия над натрием и наличие лития только в ранних кристаллообразующих растворах, дают основание предполагать различную направленность изменения режима кислотности — основности в процессе роста рассматриваемых кристаллов. Это побудило нас обобщить наиболее полные количественные данные ИК-спектроскопии (см. рис. 75 в книге [172]), полученные в процессе совместной работы со С.В.Геворкян, по изменению в процессе зонального роста кристаллов концентрации в них протонов — показательного признака направленности режима кислотности — основности кварцобразующей среды. Из этого рисунка следует, что если кривая изменения содержа-

ния протонов соответствует изменению кристаллообразующей среды для жил постмагматического происхождения, то растворы, из которых росли кристаллы кварца в жилах Донбасса при той же температуре, должны иметь иную природу. Какую? Можно, в частности, предположить, что данные жилы, содержащие кристаллы с обратной зональностью, являются апофизами более глубоких жил, кристаллы которых образовались в среде с более высокой щелочностью, т.е. на щелочной стадии дифференциации растворов, как это принимается в постмагматической гипотезе происхождения хрусталеносной минерализации, согласуется с данными по росту искусственных кристаллов и нашими данными, приведенными на анализируемом рисунке. Однако такой вариант происхождения кристаллов предполагает фильтрацию растворов, что непременно должно бы привести к созданию в пределах региона минералогической зональности, установленной в жилах, генетически связанных с интрузиями. Однако на данной территории никакой зональности в распределении кристаллов кварца не установлено. С точки зрения примесного состава пирамид роста данных кристаллов ведущее место принадлежит литию — типичному элементу постмагматических растворов кислых интрузий. Однако таких пород в районе распространения жил не обнаружено. С другой стороны, кривые ТЛ жильного кварца характерны для жил альпийского типа, а минеральный состав жил в целом имеет мало общего с жилами альпийского типа.

Таким образом, спектроскопические особенности кристаллов кварца первого типа, нашедшие как бы концентрированное выражение в их анатомии, отражают общую тенденцию повышения кислотности (понижения щелочности) образовавших их растворов, что согласуется с соображениями и других авторов [273]. Рост же кристаллов второго типа совершался в условиях повышающейся щелочности. Анализ этих данных, тесная связь жил, содержащих кристаллы первого типа, с интрузивными комплексами, близость анатомии этих кристаллов с анатомией (образовавшихся примерно в этом температурном интервале) кристаллов кварца в заведомо магматического происхождения камерных пегматитах, а также особое геологическое положение жил с кристаллами второго типа (см. выше) позволяет заключить:

а) анатомия кристаллов первого типа

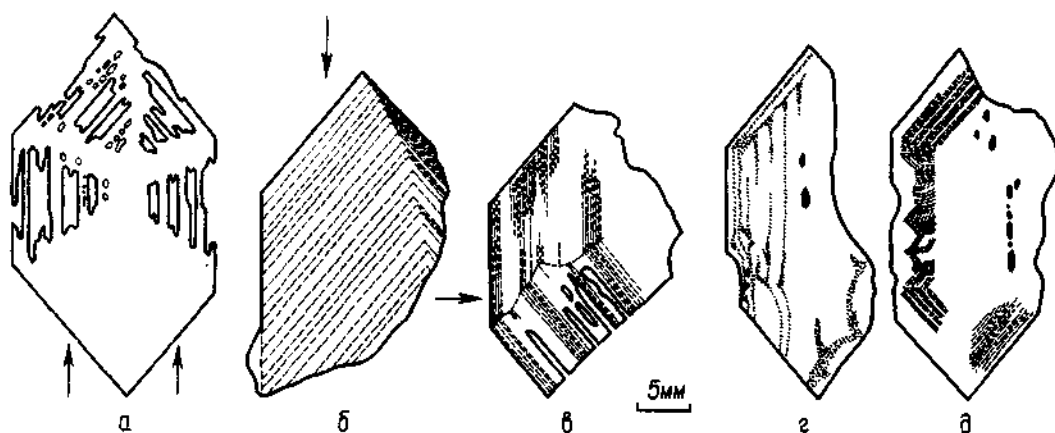


Рис. 47. Схема анатомии кристаллов кварца с включениями углеводородов и возможное положение их в потоке минералообразующего флюида (по Д.К.Возняку):
 а - скелетный кристалл; б-д - зарисовки пластинок из кристаллов кварца Донбасса (крапом обозначена дымчатая окраска, черным цветом - включения минералообразующих растворов). Стрелками показано направление потока флюида

и содержащие их жилы отражают эволюцию постмагматических растворов, в частности щелочную стадию их дифференциации, сменившуюся затем кислотной;

б) анатомия кристаллов второго типа отражает эволюцию метаморфогенных растворов или постмагматических растворов, значительно удалившихся от интрузива и претерпевших существенное влияние окислительной среды;

в) хрусталеносные жилы Донбасса, содержащие кристаллы кварца с "обратной" зональностью, не являются ни типичными жилами постмагматической природы, ни типичными жилами метаморфогенного происхождения.

2. Следующий сюжет касается взаимосвязи анатомии кристаллов кварца со специфическими уровнями роста, из-за чего они приобрели особые качества и отнесены к новому генетическому типу кристаллов [34].

В Альпах, Карпатах, Крыму и Донбассе [172] встречаются кристаллы кварца, получившие разные названия — мармарошский диамант, драгомит, оконный кварц и др. Места их распространения или определенные районы нефтегазоносны, и поэтому типоморфные особенности этих кристаллов важны в теоретическом и практическом отношении. Кристаллы характеризуются сильным блеском граней, скелетным строением, наличием крупных включений высокоплотных метановых растворов и жидких углеводородов. Высказано предположение об образовании описываемых кристаллов из кремнийсодержащих метановых растворов, мигрировавших по глубинным раз-

ломам. Поэтому есть основание предполагать возможное значение данных кристаллов как индикаторов миграции нефтяных флюидов при формировании газоконденсатных и нефтяных залежей (см. ниже).

Анатомия кристаллов, изучавшаяся на образцах из Донбасса и частично Карпат и Крыма, заметно отличается от таковой кристаллов из обычных гидротермальных жил. В одних индивидах (рис. 47, а, б) основная масса вещества находится в пирамидах роста ромбоэдров, в других (рис. 47, в, г) — в пирамидах роста призм m . В последнем случае грани ромбоэдров выступают в роли граней торможения. Полости, каверны, возникшие при скелетном росте кристаллов, отмечаются преимущественно в пирамидах роста основных ромбоэдров (рис. 47, а), реже — призм $\{1010\}$. Характерно также наличие большого количества крупных (до 6 мм) уплощенных полостей (рис. 47), образование которых связано со скелетным ростом.

Отмеченные особенности анатомии и морфологии описываемых кристаллов — скелетное строение и наличие крупных включений — интерпретировано [34] как следствие роста индивидов в потоке движущегося раствора [263]. Если же учесть условия нахождения и другие особенности кристаллов [172], то напрашивается важный геологический вывод: скелетные кристаллы кварца с включениями углеводородов трассируют глубинные разломы с мигрировавшими по ним углеводородными флюидами. Отсюда вытекает и практическое значение описанных кристаллов.

3. Теперь обратимся к анализу анатомии минералов как источника информации о стадийности формирования гидротермальных месторождений. Такой подход используется довольно широко, но наиболее успешно для оценки хрусталеносных месторождений.

В.В.Буканов [21] отмечает, что еще не так давно процесс формирования хрусталеносных гнезд Приполярного Урала рассматривался как одностадийный. Такое представление, однако, не подтвердилось материалами по онтогении кристаллов кварца, оказавшейся не "одностадийной". Судя по морфологии и анатомии кристаллов, скоррелированных с геологическими условиями их нахождения, вначале индивиды имели анатомию и свойства, присущие первому габитусному типу, а в конце — второму типу. Более широкие сопоставления анатомии кристаллов с составом, свойствами зон, внешней морфологией индивидов, особенностями минерального состава жил и вмещающих пород привели к представлению о том, что: а) процесс формирования хрусталеносных зон, несмотря на непрерывный характер, дважды претерпел резкое изменение условий, что нашло отражение в изменении окраски зон и спонтанной кристаллизации хлорита и анкерита на границе зон; б) переход от стадии к стадии сопровождался снижением щелочности растворов и, вероятно, связан с приоткрыванием трещин в близповерхностных условиях.

Глубокий анализ анатомии кристаллов кварца в связи с хрусталеобразованием выполнен В.Ю.Эшкиным и соавторами [272, 273]. Сопоставление анатомии кристаллов кварца разных месторождений показало целесообразность подразделения их на грубозональный (светлинский) и тонкозональный (астафьевский) типы. Рост кристаллов (светлинский тип) начинался с отложения дымчатого кварца первой генерации, затем наступил перерыв, ознаменовавшийся возникновением кристаллизационной мозаичности. Дымчатый кварц сменился цитрином, которому может предшествовать дробление. Кристаллизация цитрина связана с проявлением второй стадии хрусталеобразования. Встречаются гнезда без цитрина — значит проявилась только первая стадия (присутствует только дымчатый кварц). Но попадаются гнезда, где все наоборот — не проявилась первая стадия. Наиболее редкий случай — совмещение (перекрывание) первой и второй стадий

хрусталеобразования. Кристаллы цитрина или дымчатого кварца покрываются нормально или в виде реберных, вершинных форм аметистом.

Кристаллы астафьевского типа характеризуются частым образованием зон дымчатого, цитриново-дымчатого и цитриново-кварца, т.е. их анатомия более сложна, чем в первом типе. Третья стадия в них также фиксируется по наростам аметиста. В свете рассмотренной выше анатомии кристаллов единый этап хрусталеобразования делится на три стадии [273], обнаруживающие общую тенденцию к относительному повышению кислотности хрусталеобразующих растворов, отчего и происходит вначале рост дымчатого кварца, затем цитрина и, наконец, аметиста.

4. Специального внимания заслуживает реконструкция тектонических явлений, роль которых в процессе минерало-рудообразования (преобразования) огромна [9], но различна по конечному результату. В одних случаях тектонические движения способствуют образованию руд, например жил с рудной минерализацией, в других — преобразовывают индивиды в форме кристаллов (нередко уникальных по содержанию монообластей с полезными свойствами) в брекчию или зернистый агрегат.

Прежде заметим, что, кроме обычных многократно описанных брекчий тектонического происхождения, существуют брекчии несколько иного происхождения, которые условно назовем брекчиями пассивного обрушения. Последние особенно часты в полостях камерных пегматитов, где они образовались следующим образом. Росшие на верхней стенке — "потолке" (питание поступало снизу) кристаллы минералов под действием силы тяжести отрывались, падали на дно, разбивались, перемешивались и в дальнейшем цементировались. Главной диагностической особенностью этих брекчий является наличие в них кристаллов, выросших в условиях свободного роста головками вниз, но в той или иной мере поврежденных. Геологическое значение их состоит в том, что они служат показателями гипабиссальных или приповерхностных условий минералообразования. Эти брекчии редко содержат ограненные кристаллы и достоверно указывают на проявления тектонических движений. И хотя они распространены относительно широко, о проявлении тектоники чаще приходится судить косвенно. И здесь продуктивно используется в комплексе с други-

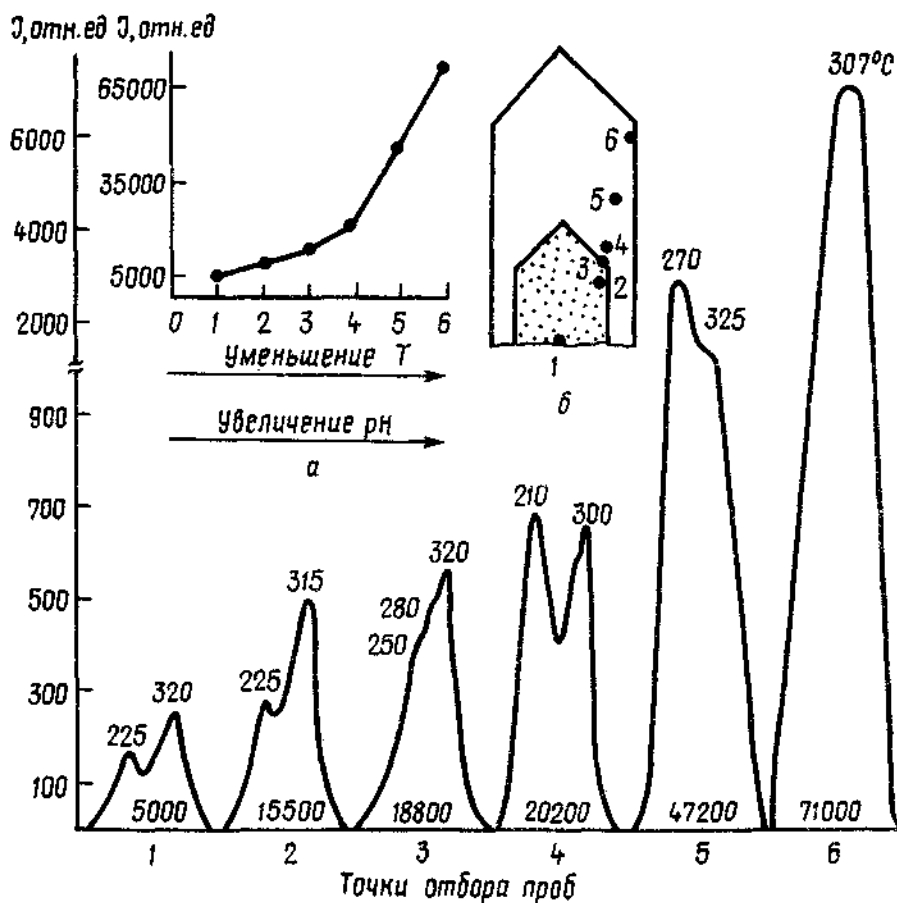


Рис. 48. Термолуминесцентные свойства кристалла-гиганта кварца, выросшего в условиях эволюционного изменения среды минералообразования в занорыше:

а — зависимость интенсивности (значения указаны под каждой кривой на нижнем графике) свечения максимума при температуре около 180 °С от температуры и pH среды минералообразования; *б* — примерная схема опробования кристалла для ТЛ-исследований; 1-3 — сотовый кварц; 4 — горный хрусталь; 5, 6 — соответственно дымчатый и темно-дымчатый кварц. Кривые ТЛ записаны В.А.Стешиным (ИГОМ АН УССР) для образцов, облученных рентгеновскими лучами

ми онтогенетический метод. Обратимся к примерам.

В.Ф.Барабанов, изучая топаз-фербартитовые и топаз-аквамариновые жилы Шерловой горы, в особенности жилы Карамышевского отрога [9], обратил внимание на давно известную особенность кристаллов топаза — полную или частичную непрозрачность. Особенно привлекательными оказались экземпляры топаза, у которых непрозрачная зона находилась внутри кристалла, повторяя внешнее очертание индивида и создавая впечатление фантома. Из многочисленных картин анатомии кристаллов и текста следует [9], что непрозрачность топаза — следствие наличия в нем различных включений, захваченных во время роста. Среди них — сидерофиллит, мусковит, каолинит, сахаровидный то-

паз. Внутренняя зона пориста по причине наличия огромного количества трещин, имеющих вид сообщающихся каналов.

Генезис описываемых образований реконструирован следующим образом. В определенный период формирования жил резко изменились термодинамические условия, вызвавшие образование трещин в теле кристаллов топаза. В новых условиях на трещиноватых поверхностях кристаллов топаза появились кристаллы биотита, указывая на повышение щелочности раствора. Затем биотит превратился в мусковит, а мусковит — в каолинит как следствие последующих резких изменений минералообразующих растворов. Вещество топаза потом отлагалось на трещиноватых индивидах топаза или залечивало полые области внутри кристаллов (сахаровидный топаз).

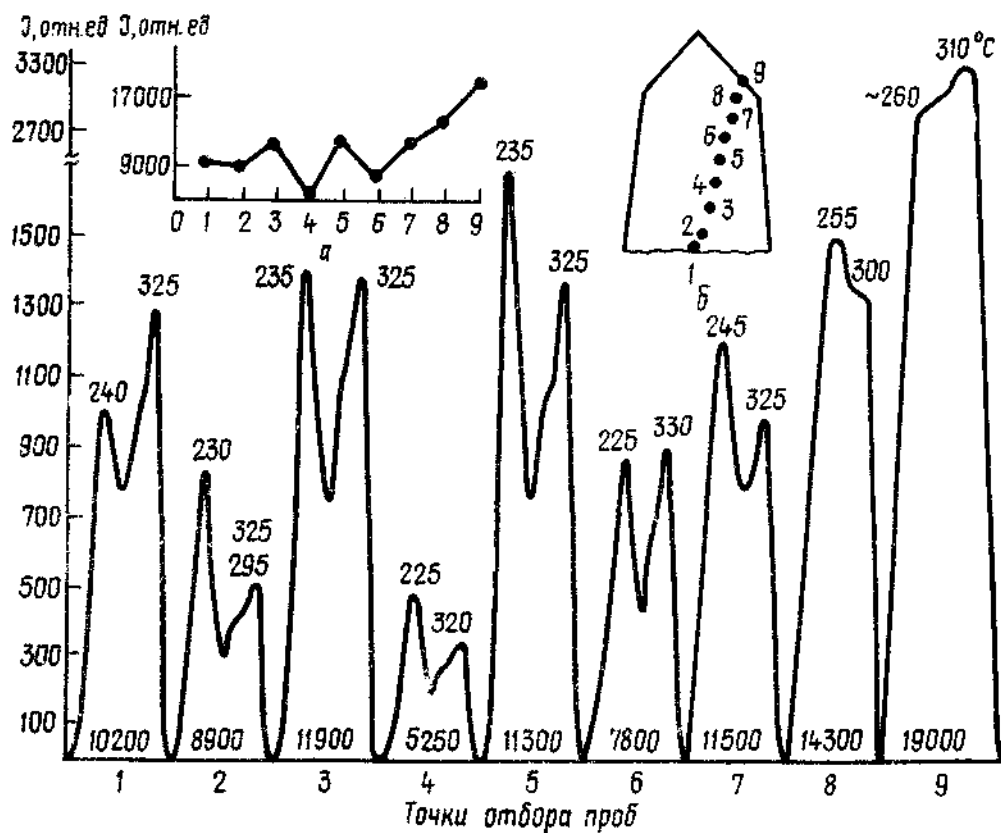


Рис. 49. Термолюминесцентные свойства кристалла-гиганта кварца, выросшего в условиях скачкообразного изменения среды минералообразования в занорыше:
а — зависимость интенсивности (значения указаны под каждой кривой на нижнем графике) свечения максимума при температуре около 180 °С от места отбора пробы; *б* — примерная схема опробования кристалла; 1-7 — горный хрусталь; 8, 9 — дымчатый кварц. Кривые ТЛ записаны В.А.Степиным (ИГФМ АН УССР) для образцов, облученных рентгеновскими лучами

Самая замечательная особенность данных кристаллов топаза — внутренняя трещиноватость — связывается с резким изменением внутреннего давления в жилах, что, в свою очередь, обусловлено приоткрыванием последних в ходе остывания интрузивного тела. Встреченные в жилах раздробленные индивиды минералов подтверждают наложенную интерпретацию. Связывать описанное явление не с тектоникой, а с падением температуры, как это обычно делается, нет основания, поскольку по геологическим соображениям трудно допустить резкий в 300—400 °С перепад температуры, при котором возникают подобные трещины, а при перепаде от 170 до 100 °С такие трещины не образуются [9].

Продолжим раскрытие темы, но уже на примере зональности кристаллов кварца, которая, как известно, отражает многие ростовые особенности и, в первую очередь, динамику роста индивидов. Есть

и такая интерпретация: характер зональности кристаллов кварца — это "сейсмограмма" процесса хрусталеобразования [21, 269]. К аналогичному выводу пришли мы в результате изучения микродефектности зон роста кристаллов-гигантов кварца из разных по степени дифференцированности и продуктивности камерных пегматитов. Были применены следующие методы — ИКС, ЭПР и термолюминесценция [172]. Наиболее выразительные результаты получены по термолюминесценции в области 180 °С и распределению в процессе роста кристаллов центров Al — O" (рис. 48, 49). Данные на приведенных рисунках существенно различаются при рассмотрении динамики их изменения по зонам роста кристаллов. Если учесть, что иллюстрируются не единичные измерения, а среднестатистические данные, то есть основание говорить о двух типах изменения микродефектности (в одном случае проявленной в изменении интенсивности ТЛ, в другом —

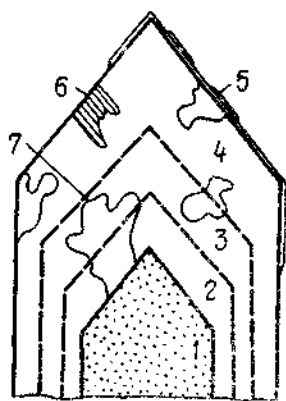


Рис. 50. Обобщенная схема анатомии кристалла-гиганта кварца из камерных пегматитов: 1 - сотовый кварц; 2 - горный хрусталь; 3 - дымчатый кварц; 4 - черный кварц; 5 - зона бесцветного кварца поздних генераций с наростами аметиста; 6 - контур бразильского двойника; 7 - то же, дофинейского

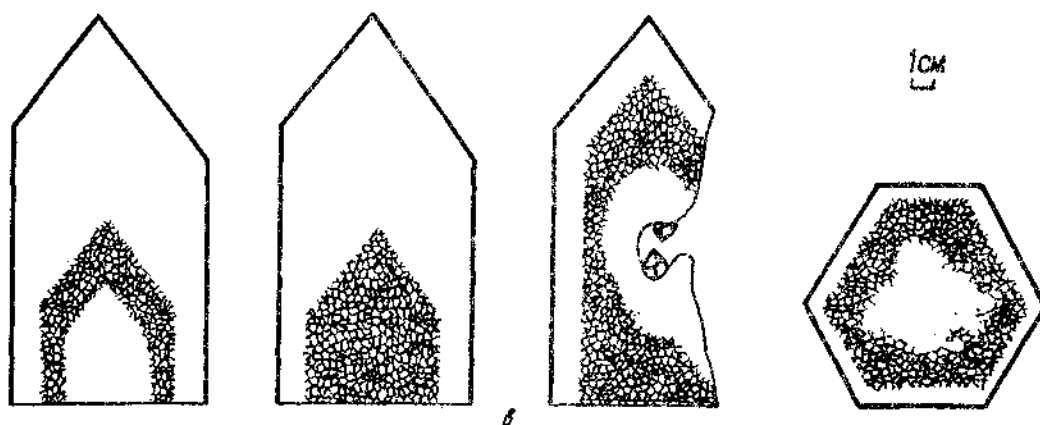
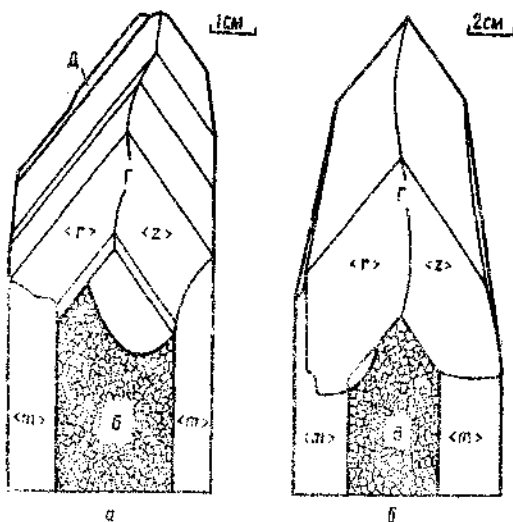


Рис. 51. Картины анатомии кристаллов кварца из камерных пегматитов (по Д.К. Возняку): а - распределение пирамид роста соответствующих граней в кристаллах призматического габитуса; б - то же, остроромбоэдрического; в - особенности распределения зон сотового кварца в теле кристаллов; г - сотовый кварц; д - горный хрусталь - дымчатый кварц - черный кварц; е - поздний кварц регенерации

в концентрации $Al - O''$) — эволюционным и скачкообразным. В полном соответствии с указанным распределением кристаллы кварца в первом случае интерпретированы как выросшие в условиях спокойного режима минераловыведения в камере, во втором — в среде со скачкообразным изменением внешних условий. Для дальнейших рассуждений важна следующая закономерность: понижение интенсивности свечения кварца (экстремальные точки) сопровождается повышением концентрации водородных дефектов и понижением (замеры Д.К. Возняка) величины рН включений. Все эти данные согласуются, по нашему мнению, с представлением об обусловленности пониженных (минимальных) значений свечения и центров $Al - O''$ с под-

кислением кварцобразующих растворов, которое было более чем одноразовым в ситуации скачкообразного распределения микродефектности и которое каждый раз связано с приоткрыванием относительно закрытой системы в результате тектонического воздействия. Попутно заметим, что приведенные данные не показывают резких изменений микродефектности при переходе от сотового к обычному кварцу, что является важным для решения дискуссионного вопроса о генезисе сотового кварца (см. [33, 35, 82], а также гл. X), положение которого в кристаллах иллюстрируется картинами их анатомии (рис. 50, 51).

Анализ приведенного материала, привлечение соответствующих термобарогеохи-

мических данных и принципа щелочно-кислотного взаимодействия Д.С.Коржинского позволяют сделать и более общий вывод: щелочно-кислотная дифференциация растворов в гипабиссальных образованиях имеет место, но она, судя по распределению дефектов в процессе роста кристаллов кварца, в значительной мере контролируется степенью открытости — закрытости системы, оказывая тем самым существенное влияние на качество кристаллосырья.

5. В петрологической литературе много лет обсуждается магматическая ликвация [190] — разделение (при понижении температуры) силикатного расплава на две несмешивающиеся жидкости — кислую и основную — с последующим гравитационным обособлением производных магм. Одни исследователи, во главе с Ф.Ю.Левинсон-Лессингом, в начале нашего века выдвинувшие ликвационную гипотезу, считали ее одним из основных способов докристаллизационной дифференциации магмы, другие, например Д.С.Белянкин [12], основываясь на экспериментальных данных, резко ограничивают роль ликвации в природе. Они допускают, что ликвация имеет место только при разделении сульфидно-силикатных расплавов.

Прямым признаком ликвации считается наличие в эффузивных породах за-

кристаллизованных сферических выделений, отличающихся по составу от вмещающей породы.

Онтогенический анализ этих сфероидов показал [71], что в рассмотренных примерах ликвации имеются не центростремительные сфероиды, а обычные сферокристаллы, получившие шаровую форму в результате роста без участия каких-либо капель. Поэтому речь должна идти не о признаках несмесимости, а о простой сферолитовой кристаллизации в расплаве или при раскристаллизации переохлажденного стекла.

Признаки действительного случая силикатной несмесимости обнаружены, но в иной ситуации — стекловатые эмульсии из капель сильно железистого пироксенитового расплава в породе гранитного состава [71]. Однако указанная несмесимость, судя по приуроченности эмульсии к интерстициям минералов, наступила на поздних стадиях кристаллизации расплава, из-за чего ликвационное разделение магм было уже невозможно. Таким образом, онтогенические данные подтверждают представление Д.С.Белянкина о том, что "имеющиеся пока фактические данные по магматической ликвации не таковы, чтобы поддерживать нашу веру в ее действительную петрогенетическую роль" [12, с.39].

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ОНТОГЕНИЧЕСКОГО МЕТОДА В ИССЛЕДОВАНИИ ПРИРОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

Учение об онтогении минералов и его методе, зарождались в ходе исследования относительно крупных, преимущественно прозрачных кристаллов. Генетическая интерпретация этих объектов осуществляется довольно строго в свете установленных законов анатомии кристаллов (см. гл. V). Значительно труднее дело обстоит с визуально непрозрачными и лишенными огранки индивидами, т.е. наиболее распространенными выделениями земной коры — зернами, хотя и здесь исследования и идеи А.Г.Жабина, Р.Л.Бродской, Р.Х.Вернона и др. [19, 29, 102, 109, 189] показывают ясную перспективу. Высказано, например, мнение, что при выяснении онтогении горной породы изучение ее структуры и текстуры более информативно, чем изучение состава [19], при этом текстура по сравнению со структурой "содержит" более стабильную генетическую информацию и в большем объеме [105]. И все же онтогения зернистых и подобных им выделений — специфическая методологически совершенствующаяся область, отличающаяся некоторыми особенностями применения онтогенического метода. Рассмотрим это на примере метасоматитов и некоторых других образований.

Метасоматиты широко распространены в природе и многие из них рудоносны (метасоматиты рудные). При метасоматических процессах изменяются состав агрегата, его структура и текстура. Общее свойство метасоматических образований — зональность [127, 140, 163 и др.]. По поводу механизмов метасоматоза, относительного возраста зон в метасоматитах высказаны различные точки зрения [163, 200].

Наиболее ранними взглядами на метасоматическую зональность как результат

последовательного стадийного разрастания тел метасоматитов являются взгляды В.Линдгрена и его последователей [163]. Они считали, что более поздние продукты метасоматоза располагаются, в основном, на периферии метасоматических тел. Позднее, благодаря развитию теории метасоматоза Д.С.Коржинским [140], чаще стали рассматривать зоны в метасоматитах как одновременно возникшие и разрастающиеся при постоянных условиях. С.А.Гулин [80] считает, что в простой инфильтрационной колонке зоны возникают сначала последовательно (ранняя — на периферии, поздняя — у трещины), а при достижении некоторой мощности одновременно передвигаются.

Экспериментируя в пористых средах, Г.Л.Поспелов [200] отнес к метасоматитам осадочные хроматограммы, ритмы которых образуются последовательно. Следует ли относить отложение минералов в пустотках пористых сред или в жидких гелях к метасоматозу — вопрос дискуссионный.

Так или иначе, имеется некоторое множество возможных механизмов возникновения метасоматитов. Для ретроспективного моделирования процессов образования метасоматических тел разного масштаба необходимо выполнить исследование онтогении минерального тела (индивида, агрегата, метасоматической колонки и т.д.). Обратный путь — систематическое применение правила фаз Гиббса или другие теоретические модели — пока представляется мало приемлемым вследствие недостаточной разработанности теории минералообразования для сложных систем, неравновесности протекания реакций, а главное — сложной длительной "жизни" природных минеральных объектов и трещинных структур.

Полное исследование метасоматитов не входит в задачи данного рассмотрения. Мы лишь продемонстрируем особенности онтогенических расшифровок на нескольких примерах.

Первый пример относится к широко известным метасоматитам березит-лиственитовой формации на Березовском месторождении, впервые описанной Г.Розе в 1842 г. Генезис текстур и структур березитов-лиственитов рассматривался неоднократно, и недавно вышел их атлас [23],

Район месторождения расположен между крупными Верхисетским и Мурзинским гранитными массивами. Большая часть его площади сложена вулканогенно-осадочными породами палеозойского возраста. В рудном поле насчитывается около 600 даек гранитоидов, имеющих близмеридиональное простирание и крутое падение. Дайки разбиты многочисленными субширотными трещинами, заполненными преимущественно кварцевыми жилами. Трещины имеют деформационное происхождение, связанное с субширотным сдавливанием всего комплекса пород. При этом в контактовых частях даек породы испытывали пластическую деформацию (текли), что отразилось на выклинивании трещин к контактам даек. В горизонтальном сечении расположение жил в дайках напоминает лестницу, поэтому они имеют старинное название "лестничные жилы".

Возле трещин и жил в дайках гранитоидов наблюдаются метасоматиты, в которых установлена "глобальная" последовательность от высокотемпературных парагенезисов (микроклиновые метасоматиты, альбититы, "табашки"), через среднетемпературные (грейзены, березиты — наиболее развитые), к низкотемпературным (аргиллизиты). Чтобы рассмотреть онтогению березитов, надо иметь в виду эту "глобальную" последовательность в минералообразовании на месторождении, находившемся в поле сильного теплового воздействия Шарташского гранитного массива и его глубинных частей. Трещины в дайках гранитоидов после своего возникновения "живут" продолжительное время. Что свидетельствует об их продолжительном развитии? Перечислим самые главные моменты.

Наиболее ранние трещинные структуры в дайках гранитоидов и в Шарташском массиве содержат полевые шпаты, сидерофиллит, дымчатый кварц. В случаях существенного развития сидерофиллита метасо-

матиты темнеют и в целом приобретают вид лестничных "лампрофировых даек" в дайках гранитоидов. Довольно часто по центру темных даек располагаются кварцевые жилы, иногда будинированные. Эти темные сидерофиллитовые метасоматиты можно условно назвать табашками по аналогии со старым названием метасоматитов в районе с.Кочкарь на Урале. Тела табашек рассеяны более поздними телами березитов.

Среди березитов встречается много разновидностей, в том числе и такие, которые только условно можно причислить к березитам. Прежде всего имеется некоторая вариация состава и структуры березитов соответственно составу эдуктов — гранитпорфиров, плагиогранитов, гранодиоритпорфиров и т.д. [213]. Но и в одной дайке соседние тела метасоматитов могут сильно отличаться. Так, в дайке Илвинской на горизонте 314 м имеются крупнозернистые кварц-мусковитовые агрегаты, которые весьма напоминают грейзены. Величина индивидов мусковита в них достигает 5 см. Иногда возле соседних трещинок развиваются резко различные березиты по цвету, пористости, соотношению главных минералов, повышенному количеству акцессорных минералов (в том числе апатита, турмалина, касситерита, анатаза, шеелита, т.е. минералов, чаще встречающихся в грейзенах), по форме кристаллов пирита, мусковита, кварца. Такое непостоянство признаков березитов побудило нас рассмотреть онтогению этих пород с выяснением следующих вопросов: 1) являются ли кварцевые жилы центральной зоной метасоматической колонки; 2) синхронны ли конкретные березиты конкретным кварцевым жилам; 3) синхронны ли минералы березитов друг другу; 4) есть ли явления образования и последующего выполнения крупных пор.

На первый вопрос можно ответить исходя из расположения кварцевых жил относительно тел метасоматитов и из анализа анатомии жил (рис. 52). Метасоматиты нередко секутся кварцевыми жилами. В большинстве кварцевых жил геометрический отбор между минеральными индивидами направлен от контактов внутрь жилы. Весьма часто фиксируется проявление гравитационного поля — минералогические отвесы и уровни в виде присыпок и диссимметризованных индивидов. Очень часты полигенерационные кварцевые агрегаты в жилах. Таким образом, квар-

цевые жилы образовались путем выполнения полостей и не являются центральными зонами метасоматической колонки.

На второй вопрос мы даем отрицательный ответ. Он вытекает из следующих фактов и соображений. Между мощностью кварцевых жил и мощностью метасоматитов корреляция не наблюдается. В одной дайке встречаются жилы, возле которых с одной стороны измененные породы (березиты) есть, с другой их нет; с одной стороны одна разновидность березита (например, со светло-зеленым серицитом и кубическим пиритом), с другой другая (например, со светло-желтым серицитом и пентагондодекаэдрическим пиритом). Нет реальных признаков синхронного развития кварца в жилах и березитов возле них. Следовательно, нет оснований говорить о синхронности конкретных кварцевых жил и конкретных метасоматитов, однако это не означает, что их нельзя синхронизировать в более крупных интервалах времени, а также при рассмотрении отдельных минералов, пространственно находящихся в теле жилы и в теле метасоматита (см. ниже).

Третий вопрос — о синхронности минералов в метасоматите — наиболее важен для раскрытия механизма метасоматоза в процессе березитизации. Вначале обратимся к модели березитизации в гранит-порфирах, построенной В.Н.Сазоновым и Н.И.Бородаевским [213, с.4]. По их данным, в процессе метасоматоза формируются три зоны с парагенезисами минералов: 0) исходный гранит-порфир с парагенезисом плагиоклаз + калиевый полевой шпат + кварц + биотит + магнетит -> 1) альбит + калиевый полевой шпат + кварц + серицит + пирит -> 2) альбит + кварц + серицит + пирит - 3) кварц + серицит + пирит. Сквозные минералы - рutil и апатит. Карбонаты представлены парагенезисом кальцит + доломит (анкерит), кальцитом или доломитом (анкеритом). Карбонаты в парагенезисы зон метасоматической колонки и в сквозные минералы не внесены. Отмечена деанортизация плагиоклаза в процессе метасоматоза, однако натрий указан среди компонентов выноса. По данным В.Н.Сазонова, текстура породы не изменяется, остается массивной как в исходных гранит-порфирах, структура же существенно изменяется от гранитовой к лепидогранобластовой.

Такова модель образования собственно березитов без учета, как пишут авторы,

рудной стадии развития гидротермального процесса, когда и текстура метасоматита усложняется, становится пятнистой, прожилковой и пятнисто-прожилковой за счет жилок кварца, сульфидов и карбонатов. Разумеется, это обобщенная модель; она не является моделью образования конкретного метасоматита. Теперь рассмотрим те наблюдения, которые онтогенически весьма существенны и поэтому важны для построения модели образования березитов, хотя, конечно, они не исчерпывают всего разнообразия сложного природного процесса.

Во-первых, указанные выше три зоны метасоматитов можно считать и текстурной характеристикой, следовательно, текстура породы меняется в результате метасоматоза: массивная в исходных гранит-порфирах - полосчатая (зональная) в березитах. Кроме того, происходит сложение (суперпозиция) структуры гранит-порфира и структуры метасоматита в переходных зонах изменения. Две структуры в одном минеральном агрегате также дают текстурные соотношения.

Во-вторых, минералы березитов далеко не всегда синхронны. Просмотр поверхностей соприкосновения пирита, серицита и кварца, а также анатомии кристаллов пирита в нескольких сотнях проб показал, что лишь в редких случаях отмечаются индукционные поверхности между этими минералами (рис. 53). В большинстве случаев они не синхронны или частично синхронны (часть зон роста). Действительно, почти во всех музеях имеются образцы березитов с идиоморфными выделениями пирита — кристаллами. Их идиоморфизм свидетельствует о последовательной кристаллизации, что подтверждается и другими признаками. Так, метакристаллы пирита часто развиты цепочками в "неизменных" гранитоидах (рис. 54), и, наоборот, имеются серицитизированные гранитоиды без пирита. Кроме того, метакристаллы пирита обычно образуются после кристаллизации кварца в жилах выполнения, возле которых развиты кварц-мусковитовые метасоматиты (грейзены?) (рис. 55). Более позднее развитие пирита довольно часто "просвечивает" в теневых деталях анатомии метакристаллов, где видна структура кварц-серицитового агрегата (см. Приложение, рис. LXXIII). Сложная история роста метакристаллов пирита отражается на таких деталях анатомии, как неоднократная смена формы {100} -> [210] -> {100} - [210],

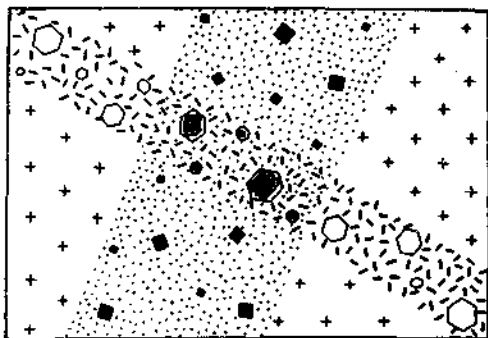


Рис. 57.

Пересечение березитов разных фаций.

Черные квадраты — пирит [100]; белые шестиугольники — пирит [210]; точки — пластинчатый зеленоватый серицит; штрихи — изометричный желтоватый серицит; крестики — гранит-порфир.

изменение количества вrostков в разных зонах роста (рис. 56).

В березитах не только пирит имеет сложную историю кристаллизации, но и остальные минералы. Так, при внимательном рассмотрении во многих березитовых телах обнаруживаются две или более разновидности слюды: в контрастных случаях они отличаются по цвету, форме кристаллов, расщеплению и возрастным взаимоотношениям с другими минералами. Разумеется, в шлифах эти взаимоотношения и различия наблюдать сложно, надо комбинировать наблюдения под бинокляром в образцах, с наблюдениями в шлифах и в специальных препаратах, вскрывающих анатомию индивидов и агрегатов.

В местах пересечения трещин, возле которых развились контрастно различающиеся березиты, особенно наглядна картина, интерпретируемая как результат многоактного в целом непрерывного процесса березитизации (рис. 57). Здесь относительно легко определяется последовательность актов березитизации, различие в минеральном составе и особенностях самих минералов одновременных березитов.

Для полноты картины добавим, что в березитах довольно часто отмечаются не только хрупкие деформации, но и пластические, что видно по фигурам реологического растворения на метакристаллах пирита, вращению метакристаллов с образованием "рубашек" стебельчатого кварца вокруг них, полосам деформации в кварце и карбонатах, претерпевших частичную рекристаллизацию, зеркалам скольжения и трещинам кливажа в березитах.

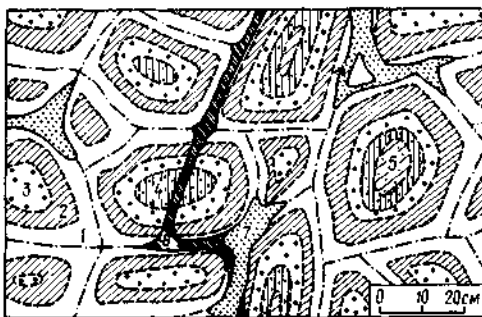


Рис. 58.

Зональность в метасоматитах (Хинганское месторождение, Приамурье).

Зона: 1 - кварц-серицитовая; 2 - хлорит-кварцевая; 3 - хлорит-серицит-кварцевая; 4 - кварц-серицит-хлоритовая; 5 - серицит-хлорит-кварцевая; 6 - кварц-сульфидно-хлоритовая; 7 - адуляровая

Четвертый вопрос - о происхождении пористости в березитах. Достаточно редко встречаются березиты, в которых крупные поры составляют 10—15 % объема метасоматита, но березиты с пористостью 3—5 % нередки. В порах под бинокляром видны новообразованные кристаллы кварца, апатита, слюды, сульфидов. Они нарастают на стенки пор. В некоторых случаях поры заполняются полностью и видны только потому, что в них минералы не деформированы. Таким образом, частично осуществляется механизм предварительного растворения с последующим частичным или полным выполнением пор.

Завершая рассмотрение примера с березитами, отметим недостаток информации. Еще необходимо уточнить время деанортитизации плагиоклаза, относительный возраст многих акцессорных минералов и другие вопросы. Однако минералогическое картирование в подземных горных выработках и специальные онтогенетические наблюдения, выполненные В.И.Поповой, Б.В.Чесноковым, В.А.Поповым на огромном материале, все же позволяют дополнить модель березитизации, изложенную выше [213]. Процесс березитизации сильно растянут во времени и состоит из большого количества актов метасоматоза и выполнения полостей. В целом для рудного поля процесс можно считать непрерывным, но он прерывист на конкретных участках. Остановка (или возобновление) процесса минералообразования на конкретных участках контролировалась тектоникой. Начало и конец березитизации можно обозначить только условно, причем продукты предше-

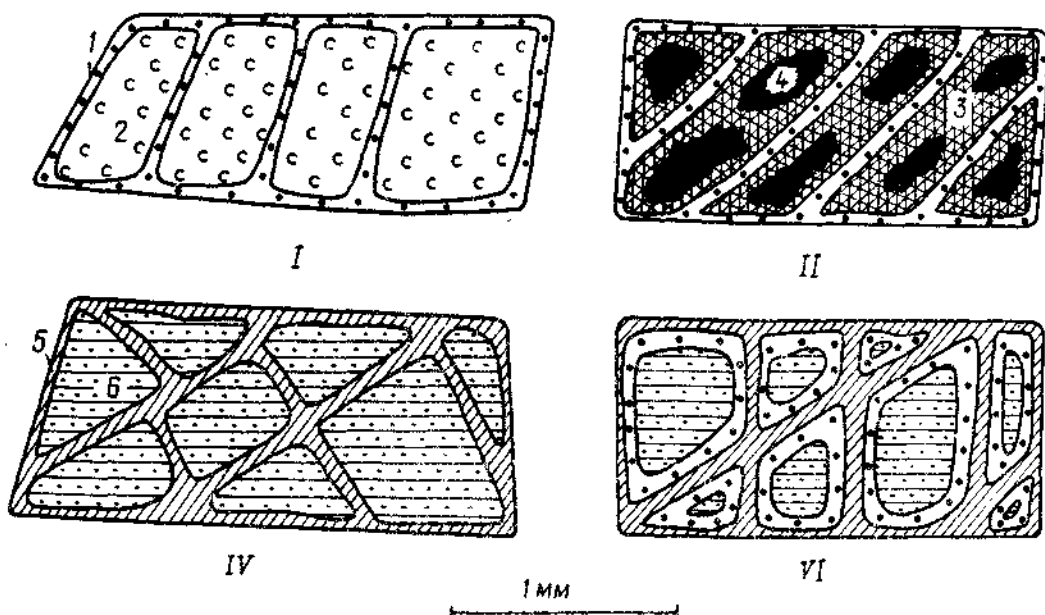


Рис. 59. Строение псевдоморфоз по полезовому шпату в разных зонах метасоматитов (Хинганское месторождение, Приамурье):

1 — ранний серицит; 2 — поздний серицит; 3 — хлорит с кварцем; 4 — флюорит; 5 — ранний хлорит; 6 — поздний хлорит с кварцем и поздним серицитом; I, II, IV, VI — зоны от питающей трещины

ствующих процессов сильно замаскированы последующими. Минералы березитов большей частью не синхронны, хотя и близки по условиям образования: обособленный рост мусковита (серицита) и пирита в среднем мало отличался (по законсервированным признакам) от мусковита и пирита, росших совместно и одновременно. Но встречаются и значительные отличия (в форме, составе минералов).

Таким образом, березиты, по-видимому, могут быть представлены какой-то усредненной метасоматической колонкой для сравнения с другими формациями. Однако надо помнить, что конкретные "колонки" вовсе не отвечают "простой" модели возникновения диффузионной метасоматической зональности в постоянных условиях. Поэтому эвристичность "простой" метасоматической модели березитизации не согласуется с данными по онтогенезу березитов.

Для рассмотрения второго примера обратимся к анализу полизональных грейзенов оловорудных восточных районов СССР. На Хинганском оловорудном месторождении вмещающими оруденение породами являются гранит-порфиры, липариты и порфириты, разбитые тектоническими трещинами на блоки размером от нескольких сантиметров до нескольких метров.

Породы в блоках возле трещин зонально изменены. Чередуются зоны разного состава (рис. 58): светлые и темные метасоматиты с разным количественным соотношением серицита и хлорита. Обычно наблюдается четыре — шесть зон, иногда до 30.

Расчет привноса — выноса главных компонентов, выполненный по рациональному атомно-объемному методу из данных химического анализа, показывает переменное поведение их. Первая от питающей трещины зона исследованного образца представляет кварц-серицитовый метасоматит по липариту, состоящий из реликтового порообразующего кварца (30 %) и новообразованного мелкозернистого серицита (70 %). В псевдоморфозах по альбит-олигоклазу и анортотклазу отчетливо различаются две генерации серицита (рис. 59): ранний серицит менее прозрачен (более мелкозернист) и заместил зерна полевых шпатов с краев и по трещинам спайности, а поздний серицит заместил оставшиеся участки зерен полевых шпатов.

Вторая зона имеет флюорит-серицит-хлорит-кварцевый состав. История ее формирования "записана" в строении псевдоморфоз полевых шпатов (рис. 59). Ранний серицит частично заместил полевые шпаты с краев зерен и по трещинкам спайности. Оставшиеся реликты полевых шпатов по пе-

риферии замещены железистым хлоритом (тюрингитом) в сростании с новообразованным мелкозернистым кварцем, а центральная часть реликтов замещена флюоритом. По количественному составу минералов среди псевдоморфоз можно выделить два типа: хлорит-кварцевый агрегат, развитый по анортоклазу и преимущественно флюорит, развитый по полевому шпату иного состава.

В третьей зоне метасоматит представлен серицит-хлорит-кварцевым агрегатом. Как и в четырех последующих зонах, здесь наблюдаются два типа псевдоморфоз по полевым шпатам: 1) по плагиоклазу с краев и по трещинам развит серицит, а оставшиеся реликты замещены хлорит-кварцевым агрегатом; 2) по калиевому полевому шпату развит только хлорит-кварцевый агрегат. Четвертая и пятая зоны метасоматитов по составу серицит-кварц-хлоритовые. Строение и состав псевдоморфоз по плагиоклазу в них одинаковы: серицит развит по периферии и по трещинкам, остальные части бывших кристаллов замещены хлорит-кварцевым агрегатом. Но псевдоморфозы по анортоклазу в этих зонах различны. В четвертой зоне с периферии и по трещинкам зерна замещены ранним хлоритом, остатки - агрегатом кварца и поздних хлорита с серицитом (рис. 59). Более сложным является строение псевдоморфоз по анортоклазу в пятой зоне - с периферии и по трещинкам развит ранний хлорит, затем маломощная зона раннего серицита, а оставшаяся часть реликтов замещена агрегатом кварца и поздними хлоритом и серицитом.

Шестая зона по составу хлорит-кварц-серицитовая. По плагиоклазу с краев и по трещинкам развивается ранний хлорит, реликты замещены агрегатом кварца и поздними хлоритом и серицитом (с резким преобладанием серицита). По анортоклазу развиты псевдоморфозы, аналогичные таковым в пятой зоне. Седьмая зона по составу серицит-кварц-хлоритовая. Псевдоморфозы по обоим полевым шпатам здесь имеют одинаковое строение: с периферии и по трещинам развивается ранний хлорит, по реликтам — кварц, серицит и хлорит (с преобладанием хлорита).

На основании этих наблюдений сделана реконструкция истории формирования метасоматитов в этом образце: серицит I - серицит II - хлорит I + кварц I - флюорит - хлорит II - серицит III - кварц II + хлорит III + серицит IV. Вслед-

ствие малых размеров зерен, слагающих метасоматиты, синхронизация минералов в разных зонах затруднена, поэтому приведенный ряд последовательности минералов является минимальным по количеству их генераций. Если ранние серицит, хлорит и кварц в разных зонах метасоматитов образовались не одновременно, то число их генераций должно быть больше, а ряд последовательности — сложнее. Анализ строения псевдоморфоз по полевым шпатам позволяет рассмотреть и относительный возраст зон в метасоматитах: зоны, расположенные ближе к трещине, образовались раньше, чем периферические; при формировании более поздних зон замещению подвергались реликты полевых шпатов в более ранних зонах. Обратим внимание и на морфологическое сходство зон возле трещин в породе с зонами в псевдоморфозах по полевым шпатам: внутренние зоны в блоках горных пород и в микроблоках зерен полевых шпатов являются более поздними, чем зоны, расположенные около трещин и по периферии.

Подобно хинганским грейzenам образовались зональные грейzenы на хр.Баджальский (участок Высокий). Метасоматоз происходил в вулканитах по сети трещин субмеридионального простираения (рис. 60). Вследствие примерно одинаковой ориентировки трещин кливажа возникли резко полосчатые метасоматические породы. Не является ли этот механизм широко распространенным и в метаморфических породах, когда тонкополосчатые текстуры описывают либо как первично осадочные, либо как следствие "метаморфической дифференциации"? Кстати, здесь развит метасоматический графит вдоль трещин в вулканитах хр.Баджальский, обычно ошибочно считающийся признаком паропород.

Трещинки, возле которых наблюдаются описываемые метасоматиты, выполнены различными минералами (их количественное соотношение также неодинаково): кварцем, мусковитом, сидерофиллитом, флюоритом, турмалином, топазом, арсенопиритом и акцессорными - бериллом и касситеритом. Цвет зон в метасоматитах определяется преимущественно соотношениями мусковита и сидерофиллита. Количество зон возле трещин колеблется от 1 до 18. Мощность метасоматитов не зависит от количества зон (рис. 61). Состав трещин выполнения также не коррелирует с количеством зон. Не выявлено закономерностей в мощности и составе зон мета-

соматитов возле соседних трещин. Имеются зоны с одной (мусковитом либо сидерофиллитом) или с обеими слюдами, причем фиксируется одновременная кристаллизация их по индукционным поверхностям (рис. 62).

Последовательность возникновения (и подновления) трещин и зон метасоматитов расшифровывается по пересечениям и сочленениям жил друг с другом. Например, на рис. 63 показано "пересечение" мусковитового метасоматита сидерофиллитовым. Вследствие подновления трещины, возле которой сформировался мусковитовый грейзен, во время образования сидерофиллита произошло формирование следующей (второй по счету, сидерофиллитовой по составу) зоны этого метасоматита. Хорошо видно, что расстояние от трещины до неизменных вмещающих пород в прожилках примерно одинаковое, т.е. скорость диффузии компонентов от трещин (и к ним) была примерно одинаковой в неизменной породе и в мусковитовом грейзене.

При пересечении трещиной пород с резко различной пористостью возникают метасоматиты разной мощности и разного контраста (рис. 64). При большой пористости породы границы между зонами как бы размываются, становятся мало заметными.

Полизональные метасоматиты очень широко распространены и в других районах. На хр.Сихотэ-Алинь часто встречается совмещение биотититов, грейзенов и пропилитов, развитых возле одних трещин (рис. 65). Последовательность их легко расшифровывается, поскольку каждый тип изменения встречается также отдельно в пересекающихся структурах. Однако есть и трудно интерпретируемые явления. Например, метакристаллы арсенопирита (на приведенном рисунке) есть как в центральном прожилке выполнения, так и в четырех симметричных относительно трещины зонах (по две зоны с каждой стороны). Трудность установления их относительного возраста чисто техническая (мелкие индивиды), но реально существующая. Предположительно такие зоны можно отнести к "осадочным хроматограммам".

Третий пример касается явлений метасоматоза без явно выраженной * зональности в пространстве. В Ильменских горах широко проявлена скаполитизация разных пород. Чаще всего скаполит развивается по плагиоклазу. Метасоматиты бы-

вают послойные и секущие (рис. 66). Случай, показанный на рисунке, интересен тем, что скаполит образует мегакристаллы пойкилитового строения: он замещает в амфиболите многочисленные зерна плагиоклаза, совершенно не затрагивая амфибол. У зерен амфибола сохраняются оптические свойства и унаследуются поверхности, которые он имел с замещенным плагиоклазом. В обнажениях и в образцах кажется, что в метасоматите уменьшается количество амфибола, однако это связано с оптическим эффектом — скаполит пористый и имеет перламутровый блеск, что повышает "белизну" агрегата.

В Ильменских горах очень часто в амфиболитах и гнейсах встречаются также псевдоморфозы по гранату. Они бывают полные и неполные (рис. 67), сложные и простые. К простым можно отнести моноплагиоклазовые псевдоморфозы с полным унаследованием формы кристаллов граната. Чаще встречаются сложные псевдоморфозы: биотит-плагиоклазовые, магнетит-плагиоклазовые, амфибол-плагиоклазовые, магнетит-амфибол-плагиоклазовые и др. Онтогенез сложных псевдоморфоз отражает последовательность событий. Приведем одну из расшифровок, выполненную на основе объемных исследований поверхностей индивидов и изучения шлифов.

Замещение плагиоклазом начиналось от поверхности граната и распространялось в обе стороны: по гранату и по вмещающему гранат амфиболу. В породе увеличилось количество плагиоклаза (№ 28—30). Скорость замещения граната была выше скорости замещения амфибола (роговой обманки). Контуры бывшего идиоморфного граната несколько "расплылись" из-за развития плагиоклаза в обе стороны. Возникли неполные плагиоклазовые псевдоморфозы по гранату. Далее процесс плагиоклазизации приостановился. В гранате образовались мелкие длиннопризматические кристаллы нового амфибола, развитые по периферии и по трещинкам в реликтах граната. В этом процессе плагиоклаз не замещался (остался индифферентным), поэтому новый амфибол (более щелочной) развит только по гранату, его нет в других местах амфиболита. Если бы новым амфиболом замещался и плагиоклаз, то старый амфибол был бы использован в качестве затравок.

Позднее началась новая плагиоклазизация граната (и только граната). Более

кислый плагиоклаз (№ 18—23) заместил оставшиеся реликты граната, используя их периферию, **трещинки** и границы между поздними амфиболом и гранатом. Вместе с поздним плагиоклазом образовалось небольшое количество магнетита, (между ними индукционные поверхности). Такова история этих **сложных** псевдоморфоз (рис. 67). Выстроить онтогению псевдоморфоз удалось благодаря неравномерности метасоматоза в амфиболите, где сохранилось **много** частичных псевдоморфоз с разными стадиями замещения.

В четвертом примере речь пойдет о происхождении текстур в яшмах (рис. 68, 69). Здесь особенно часто возникают осадочные хроматограммы и вообще диссипативные текстуры разного порядка. Минеральный состав яшмы труден для диагностики — индивиды **минералов** (кроме кварца) очень мелки и составляют не более 2—3 % объема породы. Цвет **яшмы** (коричнево-красный) обусловлен преимущественно распыленным гематитом. Цвет вновь возникших текстурных рисунков белый, зеленоватый. Гематит исчезает, появляются хлорит, эпидох и другие минералы. В возникшем новом распределении вещества замечается некоторая периодичность, которая в части случаев явно отличается от распределения вещества в рассмотренных выше метасоматитах. В то же время зоны осадочных хроматограмм (рис. 68) и яйцевидные текстуры (рис. 69), несомненно, возникают последовательно во времени. Различие симметрии продуктов метасоматоза должно соответствовать различию законов их формирования (см. соответствующие разработки в физике твердого тела).

Рассмотренные примеры **метасоматической** зональности и неоднородности подтверждают разнообразие путей (механизмов) возникновения **метасоматитов** (см., также: [200]). Онтогения метасоматитов является базисом для разработки физико-химических моделей метасоматоза. Из приведенного материала по метасоматитам можно **сформулировать** несколько вспомогательных принципов к разработке общей теории метасоматизма.

1. **П р и н ц и п п о д о б и я**. Зоны в **метасоматитах** могут возникать подобно зонам в кристаллах минералов: ранние зоны — в центре, поздние — на периферии. Условием сохранения зональности является индифферентность к изменяющимся условиям ранних образований при формировании поздних. Явление индифферент-

ности ранее использовалось исследователями [178]. Если условия метасоматоза изменяются настолько, что предыдущие минеральные образования в зонах (или в части их) станут неустойчивыми, начнется их замещение, что соответственно отразится на онтогении метасоматита. Явление индифферентности пород и минералов во многих случаях не позволяет рассматривать ассоциации минералов как равновесные парагенезисы.

2. **П р и н ц и п с и м м е т р и и**. Разная симметрия метасоматитов характеризует различие причин ее возникновения. К настоящему времени в метасоматитах известны симметрии конуса $L_{\infty} \propto P$ и цилиндра $L_{\infty} \propto L_2 \propto PPS$. Если исходная порода имела симметрию шара $\propto L_{\infty} \propto PS$, то появление симметрии конуса и цилиндра в процессе метасоматоза надо рассматривать как диссимметризацию или появление диссимметрии. Каждая зона в метасоматите может иметь свою симметрию (диссимметрию). Если одинаковые зоны повторяются в пространстве через определенное расстояние в некотором направлении, то возникает еще один элемент симметрии (диссимметрии) — трансляция (Т) вдоль оси бесконечного порядка (в осадочных хроматограммах, рис. 68). Иногда шаг трансляции закономерно изменяется (КТ). Таким образом, возникает транслируемая диссимметрия зоны (трансдиссимметрия).

Анализ показывает, что трансдиссимметрия возникает в процессе метасоматоза с неизменяющейся во времени (непрерывной) причиной (осадочные хроматограммы). Если временно прервать диффузию или изменить условия протекания процесса, исчезнет трансдиссимметрия (изменится шаг трансляции или состав метасоматита). Следовательно, симметричный анализ позволяет отличать метасоматиты с непрерывной и неизменной причиной от метасоматитов с прерывистой или изменяющейся по параметрам причиной.

Симметрия конуса (постепенное изменение количественных или качественных характеристик) соответствует метасоматитам, образовавшимся в изменяющихся условиях (во времени или пространстве). Встречаются метасоматиты, в которых разные зоны могут иметь различную симметрию (то конуса, то цилиндра).

3. **П р и н ц и п о б ъ е м н ы х с о о т н о ш е н и й**. При анализе привноса — выноса вещества в процессе метасоматоза используется "закон постоянства объемов

Линдгрена": объем породы в ходе метасоматического замещения остается постоянным [128, с.9]. Действительно, обычно в связи с телами метасоматитов не наблюдается явлений разбухания или усадки. Бывают и исключения. Но главное — в метасоматитах редко остается такая же пористость, какая была в породе до метасоматоза. Вследствие сложной онтогении минеральных агрегатов в общем случае пористость в метасоматите может возникнуть как во время конкретного метасоматоза, так и в другое время. Если этот вопрос специально не ставить и не рассматривать, анализ привноса — выноса вещества при метасоматозе во многих случаях теряет смысл. Добавим к этому часто встречающееся более позднее заполнение крупных пор или их уничтожение вследствие реологии породы. Таким образом, объемные соотношения при метасоматозе должны выясняться онтогенетическим изучением метасоматита.

Теперь коснемся анализа онтогении и также весьма широко распространенных в природе минеральных образований — тел, возникающих в полостях (см. Приложение, рис. XXVIII—XXX, XLV—L). В процессе деформации земной коры часто возникают полости, которые выполняются (заполняются) минеральным веществом. Образование полостей может быть не только деформационным, но и результатом растворения (карст, термокарст, выщелачивание минералов и т.д.). Существует большое разнообразие в абсолютных скоростях формирования полостей и в относительных скоростях процессов увеличения трещин и выполнения их минералами.

Онтогения минеральных агрегатов полостей выполнения познается на основе морфологических признаков, соответствующих разным явлениям: медленному разветвлению (раскрытию) трещин, геометрическому отбору, проявлению сил гравитации, дроблению, растворению и регенерации кристаллов, появлению раздела газовой и жидкой фаз, деформации, метасоматозу, перекристаллизации и т.д.

Если трещина раскрылась быстро (или полость образовалась быстро) и быстрее, чем скорость роста кристаллов, то появляется возможность для реализации геометрического отбора, сил гравитации и т.д. Если скорость образования полости меньше скорости роста кристаллов в ней, то возникают особые агрегаты, названные Д.П.Григорьевым параллельно-шестоваты-

ми агрегатами второго типа в отличие от параллельно-шестоватых агрегатов первого типа, образовавшихся в результате геометрического отбора. Позднее А.Г.Жабин выделил параллельно-шестоватые агрегаты третьего типа (со срединной просечкой), возникающие вследствие раздвигания стенок самим растущим агрегатом. О всех этих агрегатах подробно сказано в книге А.Г.Жабина [105]. Параллельно-шестоватые агрегаты четвертого типа [188] образуются в условиях роста резко различающихся размерами минеральных индивидов, когда в крупном кристалле зарождаются и растут мелкие индивиды и параллельно-шестоватый агрегат является результатом соотношений скоростей роста мелких кристаллов и гигантской грани крупного кристалла либо крупные кристаллы растут одновременно с мелкозернистой массой, имеющей общую протяженную поверхность кристаллизации.

Мы рассмотрим онтогению агрегатов полостей выполнения на примере скарновой формации. Кажется парадоксальным, что определение скарнов, грейзенов, березитов и других пород базируется только на рассмотрении метасоматических образований, хотя парагенезисы тел выполнения бывают неотличимы от метасоматических тел. Часто тела выполнения при неверной интерпретации принимают за метасоматиты, что склоняет к мысли об отнесении тел выполнения и синхронных с ними в некотором интервале времени метасоматитов к единой минеральной формации.

Практически на любом скарновом месторождении можно встретить скарновые минералы в жилах или прожилках выполнения. Иногда скарновые минералы выполняют огромные полости, образуя уникальные друзы — материал для музеев, частных коллекций, поделок, облицовок и т.д.

Нами проведены наблюдения на дальнегорских скарновых месторождениях в Приморье [196]. Зона скарнов мощностью 30 м вскрыта по падению в борту и на дне карьера более чем на 100 м. Скарновые тела приурочены к горизонту карбонатных или песчано-сланцевых пород карнийского возраста либо к тектоническим зонам разных направлений. По составу скарны волластонитовые, геденбергит-волластонитовые, гранатовые с более поздними кварцем, кальцитом, сульфидами. Текстура скарнов гигантопочковидная с концентрической зональностью сферолитов (рис. 70). Отдельные почки достигают 1–2 м в диаметре.

В почках наблюдается чередование волластонитовых, ильваит-волластонитовых, волластонит-геденбергитовых и геденбергитовых зон с различным строением, разной степенью расщепления кристаллов. Между сферолитами разных минералов видны индукционные поверхности совместного одновременного роста (рис. 71). В геденбергит-волластонитовых скарнах часто встречаются участки даптолитизации и даптолитовые прожилки выполнения. Многочисленные гигантские гнезда располагаются приблизительно по оси скарнового тела. На стенках гнезд видны гигантские почки волластонита и геденбергита, а сами гнезда частично или полностью выполнены кварцем, даптолитом, кальцитом и сульфидами. В таких полостях-гнездах на "дне" часто обнаруживаются брекчии, представляющие собой крустификационные минеральные слои, упавшие с "потолка" и сцементированные новым зональным минеральным веществом (рис. 72). В ряде последовательно расположенных гнезд, последние крустификационные зоны совершенно одинаковы. Часть таких зон сложена голубовато-зеленым зонально-секториальным даптолитом, часть — кальцит-даптолитовым мелкозернистым агрегатом. Более поздние зоны сложены волластонитом с геденбергитом и даптолитом, даптолитом с гранатом и одним даптолитом.

Строение брекчий свидетельствует об образовании их в открытых полостях при возобновляющихся тектонических деформациях. Обрушение части слоев с "потолка" на "пол" возможно только в открытых полостях. Нельзя объяснить метасоматической гипотезой образование кокардовых крустификационных текстур скарна в скарне: различные по составу слои, слагающие обломки, обрываются, а обломки облекаются новыми слоями сферических агрегатов тех же или других скарновых минералов.

Еще одним необычайно интересным и важным примером тел выполнения полостей являются пегматиты. Непревзойденный знаток пегматитов А.Е.Ферсман [242] не сомневался в том, что пегматитовые тела образовались путем выполнения полостей, камер, щелей, пустот. Попытки пересмотра этой точки зрения А.Н.Заварицким, В.Д.Никитиным, С.А.Руденко и многими другими исследователями представляются недостаточно обоснованными, хотя и полезными для уточнения природы пегматитов [188]. Действительно, в пегма-

титовых телах, претерпевших слабый метаморфизм, исключительно часто обнаруживаются признаки проявления силы тяжести, геометрического отбора от периферии к центру. Признаки проявления силы тяжести многообразны: минералогические отвесы (рис. 73), расслоение на разных уровнях (твердых тел, жидкостей, газов), обрушение обломков индивидов и агрегатов на "дно" полостей и др. Часто кажется, что сталактиты в пегматитах — это уже слишком большая степень домыслов. Однако наблюдения над агрегатами в горизонтальных и наклонных жилах с синхронными кварц-полевошпатовыми мелкозернистыми образованиями (рис. 74) подтверждают несомненную возможность образования сталактитов.

Рассмотрим онтогенез некоторых пегматитовых тел на примере Ильменских гор [197]. По преобладающему минеральному составу здесь выделяются гранитные, сиенитовые и миаскитовые пегматиты. По пересечениям жил выделяются четыре возрастные группы: 1) ранние гранитные; 2) щелочные; 3) поздние гранитные; 4) молодые гранитные (редкометалльные). Каждая возрастная группа имеет свою минеральную специфику [197]. Вмещающими породами являются гнейсы, амфиболиты, сланцы, кварциты, фениты, *миаскиты.

Абсолютное большинство пегматитовых тел Ильменских и Вишневых гор претерпело очень сильные пластические деформации (рис. 75) и рекристаллизацию минералов. Первичные структуры и текстуры этих тел в значительной мере утрачены. В слабо метаморфизованных телах хорошо заметны явления геометрического отбора от стенок полостей (рис. 76) либо внутри жил при появлении новых зародышей (рис. 77). Однако часто геометрический отбор идет не в условиях, установленных Г.Г.Леммлейном (индивиды имеют одинаковую скорость роста, зародыши расположены на равном расстоянии друг от друга, первичная ориентировка их случайна), а в условиях резкого различия количества зародышей разных минералов, разной скорости их роста, резко варьирующего расстояния между индивидами, смены формы кристаллов и состава парагенезисов во времени. Все это ведет к специфике структур и текстур в разных случаях.

В пегматитах сравнительно редки параллельно-шестоватые агрегаты первого типа (по Д.П.Григорьеву), что является следствием невыполнения условий Г.Г.Леммлей-

на. Чаще встречаются параллельно-шестоватые агрегаты четвертого типа (рис. 78) — как проявление борьбы за пространство (геометрического отбора) между крупными индивидами какого-либо минерала и нарастающей мелкозернистой массой полиминерального аплитовидного агрегата. Параллельно-шестоватый агрегат четвертого типа наблюдался нами в копи № 57 (А.Н.Заварицкого) и фрагментарно в других обнажениях южной части Ильменского заповедника.

Как и на других пегматитоносных территориях, текстура большинства пегматитовых жил Ильменского заповедника неоднородна (зональна — в частных случаях). В пространстве жил чередуются "зоны" разного состава, разных структур агрегатов. При этом наблюдаются чередования мелкозернистых структур с крупнозернистыми: неоднократно меняется размер вростков кварца в кварц-полевошпатовой графике, чередуются аплитовидные агрегаты с "пегматитовыми", имеется фациальное изменение структур агрегатов. В большинстве жил нет аплитовидных зон по контактам с вмещающими породами. Аплитовидные агрегаты могут развиваться в центре маломощных жил после крупнозернистых агрегатов или быть синхронными с ними.

Рассмотрим последовательную кристаллизацию в одной из маломощных пегматитовых жил из серии копей под общим номером 7. Здесь на стенке трещины в гастингситовом миаските выросли вначале редкие кристаллы калиевого полевого шпата; затем появилось много зародышей нефелина, ильменита и биотита, росших одновременно с продолжавшим расти калиевым полевым шпатом; позднее вновь рос только калиевый полевой шпат (рис. 79). Геометрический отбор здесь начался было между индивидами раннего калиевого полевого шпата, но параллельно-шестоватый агрегат первого типа не образовался. Отбор усложнялся появлением зародышей нефелина, ильменита и биотита. Эти минералы в значительной мере перекрывали свободную поверхность индивидов калиевого полевого шпата, продолжавших расти. Далее все минералы резко прекратили свой рост (их головки идиоморфны). Продолживший кристаллизацию калиевый полевой шпат в последний отрезок времени формирования этой жилки законсервировал весь предыдущий минеральный агрегат. Кроме того, появление

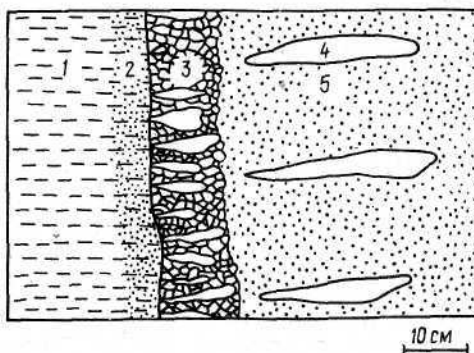


Рис. 78.

Параллельно-шестоватый агрегат четвертого типа в миаскитовом пегматите (Ильменские горы, Урал):

1 — гранито-гнейс; 2 — пироксеновый фенит; 3 — полевошпатовый крупнозернистый агрегат; 4 — "шесты" калиевого полевого шпата; 5 — среднезернистый биотит-нефелин-плагиоклазовый агрегат (с пироксеном, магнетитом и цирконом)

новых центров роста индивидов калиевого полевого шпата в последний отрезок времени завершило формирование неравномерно-зернистой структуры агрегата.

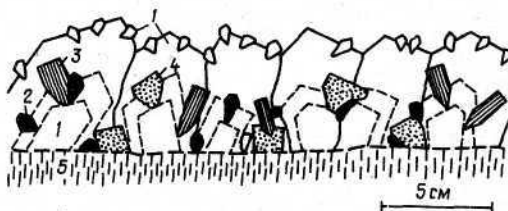
Неравномерно-зернистая структура пегматитовых тел часто представляет значительные трудности для интерпретации, побуждает искать признаки перекристаллизации и метасоматоза. Приведенный выше пример показывает, что неравномерность и неоднородность структуры может быть вызвана первичными кристаллизационными причинами. Поэтому важно вопрос происхождения структуры решать не созерцательно, а вскрывая поверхности и анатомию минеральных индивидов. Рассмотрим другие детали строения пегматитовых агрегатов.

Основными зонами в пегматитовой жиле копи № 50 являются (от ранних к позд-

Рис. 79.

Неоднороднозернистая структура в миаскитовом пегматите как результат сложной во времени кристаллизации минералов (Ильменские горы, Урал):

1 — калиевый полевой шпат; 2 — ильменит; 3 — биотит; 4 — нефелин; 5 — гастингситовый миаскит



ним): биотит-кварц-двуполевошпатовая (с геометрическим отбором от контактов к центру жилы) - биотит-кварц-двуполевошпатовая мелкографическая - биотит-кварц-двуполевошпатовая разнографическая - биотит-двуполевошпатовая гигантозернистая с большим разнообразием аксессуарных минералов и очень небольшим количеством кварца - кварц-амазонитовая графическая с альбитом - мусковит-биотит-альбит-кварц-амазонитовый агрегат с топазом, флюоритом, бериллом и другими минералами. Мечевидный биотит отмечен как синхронный минерал в двух ранних зонах пегматита; он имеет сильно уплощенные индукционные поверхности с кварцем и полевыми шпатами, что создает кажущийся идиоморфизм его индивидов.

Биотит в биотит-двуполевошпатовой гигантозернистой зоне образует огромные сильно уплощенные и частично расщепленные пластины. Из-за такой формы индукционные поверхности биотита с полевым шпатом резко уплощены, поэтому биотит кажется идиоморфным. На пластинах биотита преимущественно на верхних гранях находится значительное число аксессуарных минералов — гранат, магнетит, циркон, самарскит, колумбит, монацит. Аксессуарные минералы имеют индукционные поверхности с биотитом, что красочно показано на рисунках и фотографиях А.Г.Жабиным [100]. Однако кажущийся идиоморфизм биотита "сделал свое дело" — выделения биотита были интерпретированы как метасоматические (метакристаллы). Отсюда и аксессуарная минерализация, синхронная с биотитом, была интерпретирована как метасоматическая по отношению к полевому шпату. Специальное препарирование индивидов биотита, картирование их распределения в теле пегматита, наблюдения над проявлением силы тяжести, поиски индукционных поверхностей аксессуарных минералов с полевым шпатом изменили интерпретацию хронологических взаимоотношений минералов. Действительно, огромные пластины биотита и гигантские индивиды полевого шпата (пертитовый калиевый полевой шпат) образуют единичную зону (полосу) в пегматитовом теле; биотит имеет с полевым шпатом уплощенные индукционные поверхности; аксессуарные минералы находятся преимущественно на верхних гранях биотита (проявление силы тяжести); найдены аксессуарные минералы по зонам роста

в полевоом шпате, где нижние части аксессуарных кристаллов образуют индукционные поверхности с полевым шпатом, а верхние — идиоморфны.

Замечательны некоторые особенности кристаллизации и метаморфизма минералов жилы Блюмовской копи, которые характерны и для многих других пегматитовых жил. Имеются фациальные переходы в крупности индивидов минералов по простиранию одной зоны пегматитового тела (от среднезернистых до гигантозернистых). Структура агрегата, несомненно, первичная, кристаллизационная, поскольку между индивидами сохранились индукционные поверхности одновременного роста. Обычно принято считать, что биотит и мусковит кристаллизуются разновременно. В Блюмовской копи имеются минеральные агрегаты, где изометричные индивиды биотита образуют прекрасные индукционные поверхности с изометричными индивидами расщепленного мусковита. Иногда встречаются синтаксические срастания мусковита с биотитом.

Вообще в пегматитах очень часты синтаксические срастания минералов. Наблюдается синтаксия кварца с полевыми шпатами (графический пегматит общеизвестен), двух полевых шпатов (рис. 80), нефелина и биотита с амфиболом (рис. 81), биотита и корунда с полевым шпатом, амфибола с пироксеном, колумбита с самарскитом и многие другие. Подчеркнем различные количественные соотношения фаз при синтаксии, т.е. ведущей (преобладающей) может быть любая из фаз в сростке, а также любые их количественные соотношения в зависимости от пересыщений в многокомпонентной системе.

В гигантозернистой биотит-калишпатовой зоне жилы Блюмовской копи встречается небольшое количество дымчатого кварца и отдельные индивиды олигоклаза (№ 12). В то же время калиевый полевой шпат содержит большое количество пертитовых вростков плагиоклаза № 12. Рассмотрение индукционных поверхностей калиевого полевого шпата с кварцем и отдельными разноориентированными индивидами олигоклаза показало, что пертитовые вростки образуют собственную индукционную поверхность более мелкого порядка (рис. 82), т.е. пертитовые тела существовали уже в процессе кристаллизации. Отсюда вывод о их синтаксическом происхождении. Наблюдения над пертитами в других пегматитовых телах Ильменских гор при-

вели нас к выводу о преобладании синтаксических пертитов в них. Такие же наблюдения сделаны над пегматитами горы Плоской на Кольском п-ове, где вследствие яркой амазонитовой окраски оказалось возможным получить более контрастные фотографии.

Многие индивиды амазонита зональны по количеству пертитовых вростков (рис. 83). В некоторых зонах альбит абсолютно преобладает над амазонитом. Часть пертитовых тел отклонена от правильной кристаллографической ориентировки в амазоните, и тогда они легко отделяются от амазонита, обнажая индукционные поверхности одновременного роста. На некоторых кристаллах амазонита из полостей пертитовых вросток альбита выходят на их поверхность (рис. 84); и здесь наблюдались дополнительные бугры и подъем слоев роста амазонита по контакту с альбитом. Это говорит о синхронном росте альбита с амазонитом во взаимно ориентированном положении. Синтаксические пертиты обычно располагаются своим уплощением параллельно {100} матрицы, однако есть и другое расположение: перпендикулярно {110}, параллельно {110}; отмечаются сложное ветвистое строение пертитов либо изометричные тела пертитов (рис. 85, 86). Пертиты распада обычно очень мелкие, плоскости их уплощения {13.02} расположены параллельно.

Кроме синтаксии в полевых шпатах очень часто наблюдается эпитаксия: на калиевый полевой шпат ориентированно нарастает плагиоклаз или наоборот, создавая впечатление гомоосевых псевдоморфоз. Эпитаксия (автоэпитаксия) калишпата на калишпат обусловила появление одной из знаменитых гипотез — "амазонитизации как сквозьрешеточного метасоматоза" А.Н.Заварицкого. Наблюдая зеленые прожилки в желтоватом и розоватом калиевом полево-м шпате пегматита Блюмовской копи, А.Н.Заварицкий [120] пришел к выводу об их метасоматическом происхождении. Он считал, что от волосовидных трещин в кристаллическую решетку калиевого полевого шпата мигрировали рубидий и свинец, обусловившие появление зеленого цвета,

В.О.Поляков и В.А.Попов [185] вновь проанализировали онтогенез амазонита Ильменских гор. Ими приводятся следующие признаки первичного (ростового) распределения зеленой окраски в калиевом полево-м шпате. Зеленые прожилки амазо-

нита в желтоватом и красноватом полево-м шпате всегда имеют свой парагенезис минералов, отличный от парагенезиса красноватого калиевого полевого шпата. В этих прожилках обычен кварц с другой плотностью дымчатой окраски, появляются топаз, флюорит, слюды, акцессорные тантало-ниобаты и берилл. Все эти минералы имеют индукционные поверхности с амазонитом. В тех прожилках, которые не совсем заполнены минералами и сохранились щели, хорошо видна многоглавая регенерация калиевого полевого шпата амазонитом. Однако внешне кажется, что переходы от яркой амазонитовой окраски к красноватой нечеткие, постепенные. Очевидно, это и привело А.Н.Заварицкого к представлению о ее метасоматическом происхождении. Надо учитывать не только окраску, но и все онтогенетические признаки явления, отмеченные выше. Постепенность переходов в окраске связана с явлением "деамазонитизации" — исчезновение окраски в связи с "отжигом", распределенным неравномерно, пятнисто.

Явления "отжига" в калиевом полево-м шпате весьма распространены: его мутность, часто относимая к пелитизации, обусловлена появлением пор вследствие движения и аннигиляции дислокаций с противоположным знаком. Дислокации в калиевом полево-м шпате появляются в связи с ростовыми несовершенствами, напряжениями вследствие пластических деформаций и триклинизацией моноклинной структуры. Микроклиновые двойники, видимые в виде решетки в оптическом микроскопе, исчезают в местах отжига с появлением мелких пор. В амазоните в этих же местах исчезает окраска. Следовательно, как только исчезают напряжения в связи с движением дислокаций (отжигом) и появляются поры, исчезает амазонитовый цвет. Это мы и называем "деамазонитизацией". Явление само по себе сложное, поскольку при движении дислокаций не только исчезают напряжения, но вместе с дислокациями идет какая-то миграция атомов. Когда напряжения вызваны только триклинизацией с появлением микроклиновой решетки, то отжиг тоже подчиняется распределению двойников в микроклиновой решетке, а сетка замутнения (появление пор) дает видимую картину деамазонитизации по сетке (рис. 87). Если отжиг и распад твердого раствора (красновато-желтоватый цвет полевого шпата за счет гематита) отражают сложную картину напряжений, вызванных

пластическими деформациями, триклинизацией калиевого полевого шпата, то и видимая картина замутнения сложнее - пятна, полосы. Эта картина и привела, на наш взгляд, А.Н.Заварицкого к "гипотезе амазонитизации".

Онтогенез пегматитов, развитых на больших пространствах с разнообразным геологическим строением — это уникальный научный полигон для разработки крупных минералогических проблем. В частности, щелочная провинция Ильменских и Вишневых гор в сочетании с окружающим метаморфическим комплексом является благоприятным объектом, имеющим сложнейшую историю пегматитов, соответствующую истории метаморфизма всего этого блока земной коры. Рассматривая всю совокупность пегматитовых жил от мельчайших, мощностью в несколько миллиметров, до весьма мощных и протяженных тел, можно, например, раскрыть генезис пегматитов этого комплекса пород. Их история в целом соответствует истории метаморфизма комплекса. Состав пегматитовых жил и прожилков коррелирует с составом вмещающих пород. Образование пегматитов подчиняется принципу жил альпийского типа. Синхронные жилки и прожилки в породах разного состава имеют соответствующий состав: в миаскитах — миаскитовый, в фенитах — фенитовый, в гранито-гнейсах — гранитовый. Крупные жилы пересекают разные породы, и их состав сформировался за счет флюидов, далеко "ушедших" от места формирования. Поэтому состав крупных жил часто кажется чуждым составу вмещающих пород.

Тему о генезисе пегматитов продолжим на примере их камерных (занорышевых) представителей, характеризующихся тесной связью с вмещающими породами и кристаллизацией в гипабиссальных условиях [152]. Указанная связь отражает образование пегматитовых тел *in situ* из магмы, общей для пегматитов и вмещающих пород, но пегматитовые тела образовывались только в тех местах, где среда отличалась резко повышенным содержанием летучих компонентов, существенно повлиявших на дальнейшую историю магмы — кинетику и температуру кристаллизации, а затем и на посткристаллизационное преобразование.

В до сих пор дискуссионной концепции формирования пегматитов принципиальное значение имеет выяснение генезиса кристаллов и зернистых агрегатов кварца — основного полезного минерала ка-

мерных пегматитов. Для рассмотрения этого вопроса сначала обратимся к анализу анатомии кристаллов кварца [33, 152, 172].

В кристаллах кварца из камерных пегматитов благодаря распределению окраски и включений выделяются следующие зоны (см. рис. 50, 51): сотовая, горного хрусталя или розового кварца, дымчатая, морионовая, позднего кварца регенерации и аметистовая. Сотовый кварц составляет центральную часть кристаллов, имеет дипирамидально-призматический габитус и резкую границу со следующей зоной горного хрусталя (иногда дымчатого кварца), которая затем постепенно переходит в разновидности все более плотной дымчатой окраски и завершается черным кварцем (морионом). Границы между морионом и зоной позднего горного хрусталя (кварца регенерации) тоже резкие, часто с присыпками и следами растворения — признаки дробления занорыша, предшествовавшего росту позднего горного хрусталя. Последний нарастает на более ранние кристаллы или регенерирует их обломки. В крупных кристаллах обычно наблюдаются все отмеченные зоны, в мелких внутренние зоны, особенно горного хрусталя, часто не развиты. Отмечены случаи, когда стержневая часть зоны сотового кварца не разбита трещиноватостью и строго повторяет его внешние очертания или имеет более сложную форму (см. рис. 51).

Классический онтогенический прием интерпретации описанного примера анатомии кристаллов кварца: постепенные переходы от зоны к зоне — следствие эволюционного изменения условий минералообразующей среды, резкие — скачкообразного. По такой оценке, резкое изменение условий роста произошло на границе сотового кварца и горного хрусталя, а также на границе мориона и позднего горного хрусталя. Второй случай действительно соответствует такой интерпретации, подтвержден всесторонне [130, 152] и здесь не рассматривается. Проанализируем первый случай, т.е. границу сотового кварца и горного хрусталя. На первый взгляд здесь нет принципиального различия с уже интерпретированной границей мориона и позднего горного хрусталя. Так, нередко вершина или боковые части палеокристаллов сотового кварца обломаны, что свидетельствует о существенных изменениях условий, происходящих на границе сотового кварца и горного хрусталя. Казалась незыблемой точка

зрения [82], что сотовый кварц образовался при $\beta \rightarrow \alpha$ -переходе в результате резкого снижения температуры. В связи с этим необычное положение сотовой зоны в кристалле (см. рис. 51) можно интерпретировать как следствие раскрытия пегматитов на разных стадиях развития и с различной амплитудой температурного спада. В итоге, в одних пегматитовых телах "соты" поражают кристалл β -кварца полностью (резкое и значительное охлаждение), в других — трещиноватость не проявилась или затронула периферические части кристалла (слабое и неравномерное охлаждение).

С такой интерпретацией не согласуются полученные нами данные о примесной, структурной дефектности и термолюминесценции кристаллов кварца с сотовой зоной и без нее [172]. Общий вывод, следующий из анализа распределения в кристаллах кварца водородных дефектов, центров $Al - O^-$ и E , значений термолюминесценции, таков: выделяется два крайних случая изменения примесной и структурной дефектности кристаллов, однако ее распределение по зонам не контролируется наличием или отсутствием сотовой зоны. Первый случай соответствует индивидам (см. рис. 48), образовавшимся в условиях (наша интерпретация) спокойного режима в камере, второй характеризует кристаллы, которые росли в среде со скачкообразным изменением внешних условий (см. рис. 49). В соответствии с этим выделены кристаллы двух типов. Отметим основные особенности термолюминесценции кристаллов первого типа: 1) более интенсивный высокотемпературный максимум ($315-325^\circ C$) по сравнению со среднетемпературными ($220-260^\circ C$) в кристаллах с сотовой зоной, начало кристаллизации которых совершалось при $600^\circ C$ и более; 2) общее возрастание свечения при переходе от сотового кварца к мориону, соответствующее понижению температуры и увеличению щелочности кристаллообразующих растворов, в этом же направлении возрастает интенсивность низкотемпературного свечения (около $180^\circ C$).

Для второго типа кристаллов характерно скачкообразное изменение параметров термолюминесценции, тесно коррелирующее с распределением в них центров $Al - O^-$, хотя сотовая зона в них не развита.

Д.К.Возняк [33] всесторонне изучил рассматриваемую проблему. Им выдвинута гипотеза о том, что в β - α -полиморфном переходе, при котором образуется сотовый кварц, существенную роль играют

метастабильные состояния, обеспечивающие скорость фазового перехода, достаточную для его растрескивания в больших объемах вещества при постепенном (эволюционном) изменении PT -параметров среды минералообразования.

В дальнейшем к проблеме образования сотового кварца Д.К.Возняк и др. [35] привлекли метод электронного парамагнитного резонанса, а также результаты исследований фазовых переходов в физике твердого тела. Установлена корреляция между содержанием центров $Al - O^-$ в кварце, размером сот и дофинейских двойников инверсии. Остановимся более детально на объектах этих исследований. Изучались зональные кристаллы, в которых центральная часть либо не была разбита сотовой трещиноватостью, либо по размерам сот она резко отличалась от промежуточной — типично сотовой разновидности кварца. Их внешняя зона выросла в виде низкотемпературной α -модификации, а промежуточная и центральная зоны — как высокотемпературная β -модификация. Центральная зона кристаллов характеризуется дофинейскими двойниками, значительно превышающими "признанные" размеры (не более 2–3 мм) двойников инверсии, и отсутствием или необычно большими размерами залеченной сети сотовой трещиноватости, т.е. признаками, по которым кварц центральной зоны нельзя было бы отнести к параморфозе α - по β -кварцу, не будь оно в центре кристаллов. Как видим, объект исследования по анатомическим особенностям уникален. Такие кристаллы — раритеты природы. Анализ распределения центров $Al - O^-$ по зонам описанных выше кристаллов в совокупности с другими данными подтвердил [33] гипотезу о том, что в процессе β - α -полиморфного перехода при образовании сотового кварца довольно часто возникают метастабильные состояния, хотя сам фазовый переход при достижении некоторой степени метастабильности осуществляется скачком при плавном (эволюционном) изменении условий внешней среды. Поскольку степень метастабильности мала, то сотовые включения можно использовать [33] для определения PT -параметров β — α -превращения кварца или же минералообразующего флюида в момент полиморфного перехода.

Таким образом, приведенные факты и рассуждения в совокупности с онтогенетическими наблюдениями противоречат адабатической концепции происхождения камерных пегматитов.

РОЛЬ ОНТОГЕНИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ПРАКТИКЕ

Учение онтогении, в соответствии с запросами науки и практики, за относительно короткий (менее чем сорокалетний) период получило широкое развитие. Некоторые ее теоретические положения стали общим достоянием минералогической науки или даже вышли за ее пределы. Возросло также значение онтогении минералов, особенно анатомии минеральных индивидов, при разработке минералогических поисковых и оценочных признаков. Велика роль ныне и еще больше перспектива онтогенических исследований в области обогащения полезных ископаемых. Поэтому не случайно авторы неоднократно цитировавшегося труда заключили его словами: "для практического использования учения об онтогении минералов открываются все новые и новые перспективы" [76, с.315]. В настоящее время можно выделить уже несколько прикладных направлений, в развитие которых онтогенические достижения внесли существенный вклад. Это прежде всего:

- происхождение и генезис минеральных тел;
- поисковая минералогия;
- технологическая минералогия;
- синтез минералов и выращивание монокристаллов;
- металлургия и металловедение.

Кратко рассмотрим эти пять направлений с позиций излагаемой темы.

Происхождение и генезис минеральных тел. Восстановление истории минеральных тел, слагающих месторождения полезных ископаемых и горные породы, составляет одну из важнейших практических задач. Результаты решения этой задачи — основа для разработки прогнозно-поисковых и оценочных критериев. В доонтогенический период эта задача была исключительно слож-

на, поскольку текстурно-структурный анализ не давал возможности объективно судить о последовательности минералогических событий.

Онтогенический метод, который хотя и разрабатывается на базе текстурно-структурного анализа, опирается на фундаментальные эволюционные закономерности минералогенезиса: прохождение минеральным индивидом через этапы зарождения, роста, изменения и разрушения и наследование минералом структурных особенностей минералогенетических систем. Главным же "инструментом" онтогенического метода являются (см. гл. II, VII, VIII) прямые и косвенные критерии одновременного и последовательного роста минералов, критерии замещения.

Онтогенический метод располагает довольно эффективными приемами синхронизации и возрастной корреляции пространственно разобщенных минералов. Эти приемы разрабатывались Д.А.Миневым и Н.И.Розенковой [161], Д.П.Григорьевым в сотрудничестве с В.В.Букановым и Г.А.Марковой [74, 77] на основе фотометрирования зональности кристаллов и поиска синхронных реперов. Кроме зон роста такие реперы можно найти в форме включений в кристаллах, в строении минеральных агрегатов, в следах деформаций, растворении минералов и т.д. [278]. Теоретические основы возрастной корреляции минералов разработаны в последнее время В.И.Поповой [192, 193]; ею же дан анализ существующих методов корреляции и выполнен ряд новых методических разработок. Важное обобщение по этой проблеме сделано А.Г.Жабиным [104].

С помощью онтогенического метода наиболее надежно выделяются генерации минералов в минеральных телах и уста-

нашивается стадийность их формирования. Открывается возможность определения не только временных, но и пространственных взаимоотношений между генерациями. Первые же приложения онтогении в этом направлении вскрыли не учитывавшиеся ранее явления. Так, В.А.Попов [192] обратил внимание на явление "исчезновения" определенных генераций минералов в результате их растворения или замещения другими минералами, что существенно усложняет историю формирования минеральных тел.

Важным результатом онтогенического метода является создание пространственно-временных моделей анализируемого объекта (минерального агрегата, минерального тела, месторождения и т.д.). Модели эти, общие или частные, отражают динамическую картину развития кристаллизационных и других событий в процессе формирования минерального месторождения; они создаются в виде традиционных словесно-таблично-графических описаний, но главное их отличие качественное: они построены на основе критериев высокой степени надежности.

На основе пространственно-временной модели и с помощью соответствующих методов и приемов расшифровки признаков условий минералообразования (гл. IX) восстанавливается сам процесс образования минеральных индивидов, агрегатов и тел, определяются параметры состояния среды (химический состав, температура, давление и др.), в которых он протекал. Пространственно-временная модель минерального тела как бы трансформируется в модель генетическую. Совершенно ясно, что здесь широко привлекаются типоморфные признаки минералов, типоморфные минералы и ассоциации, а также геологические данные.

Онтогенический метод сейчас применяется при изучении месторождений настолько широко, что трудно проанализировать всю выполненную работу, да и нет надобности, поскольку принципиальные возможности метода рассмотрены в гл. IX. Весьма подходящим, как и следовало ожидать, метод оказался для характеристики месторождений кристаллосырья, и это убедительно показал В.В.Буканов [21], детально воссоздавший стадийность формирования месторождений Полярноуральской хрусталеносной провинции. Работами Н.З.Евзиковой проиллюстрирована эффективность онтогенического подхода к изучению оловорудных месторождений, В.И.Поповой — флюоритовых и золоторудных, В.А.Поповым — касситеритовых, золото-

рудных. Б.Задирова и др. [121] опубликовали принципиально новые результаты изучения одного из болгарских флюоритовых месторождений — Михалковского — на основе онтогенического подхода. Ими получена интересная минералогенетическая карта, отражающая динамику минералообразования во времени и пространстве.

Известно, что установление способа роста минералов имеет принципиальное значение для решения проблемы происхождения пород (см. также гл. IX). Еще не так давно вкрапленники минералов, рассматривавшиеся петрографами с позиций структурно-текстурного анализа, трактовались как наиболее ранние выделения из расплава. Однако онтогенический метод показывает, что подобные выделения образуются по-разному. В некоторых протерозойских гранитах Украинского щита, например, порфирировидные выделения калиевого полевого шпата выросли метасоматически. Одно из наиболее веских доказательств — анатомия вкрапленников, в частности, отсутствие пирамид роста граней, характерных для высокотемпературных разновидностей.

Очень продуктивно онтогенический метод стал применяться для восстановления кристаллизационной истории лунных пород и космических объектов. Эту область приложения онтогении открыли работы Д.П.Григорьева, вначале по метеоритам [65, 66], затем по лунным породам [68, 71 и др.]. Из других работ выделяются исследования О.Б.Джеймса [301] по реставрации кристаллизационной истории лунных полевошпатовых базальтов.

Онтогенический метод создавался для минералогенетических реконструкций, но он оказался эффективен и в других областях естествознания. В частности, он применен в пограничной с биологией области минералогии — биоминералогии при изучении различных паталогенных образований. А.К.Полиенко, А.Г.Жабин, П.П.Юханов и другие минералоги интересно и продуктивно работают с почечными камнями. А.А.Кораго провел важные исследования по определению природы ювелирных свойств пресноводного жемчуга.

Благодаря исследованию Э.Г.Коломыча [139] онтогенический метод стал широко применяться в метеорологии и гляциологии для изучения эволюции структуры снега и льда. Им разработаны оригинальные эволюционные схемы для индивидов снега, кристаллизующихся в различных условиях. Особенно глубоко рассмотрен сублимационно-метаморфический цикл отложен-

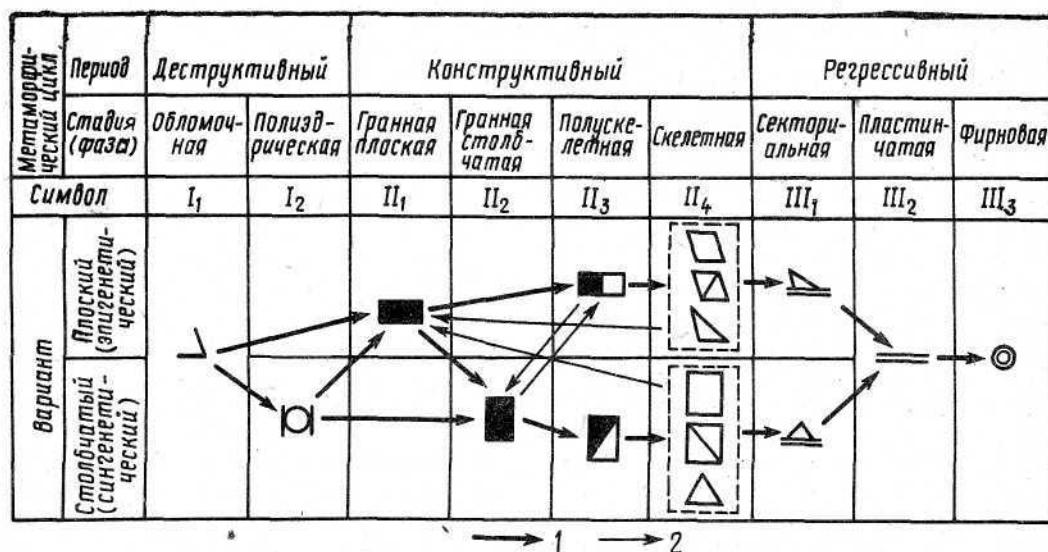


Рис. 88. Сублимационно-метаморфический цикл отложенного снега [139]:

1 — переходы основной (элементарной) цепи преобразований форм кристаллов и снежных горизонтов; 2 — переходы возрастного усложнения структуры горизонтов и перемещения их с одного уровня (программы) метаморфизма на другой

ного снега, вплоть до фирновой стадии, для которого установлены два эволюционных ряда, разделяющихся на обломочной стадии деструктивного этапа и снова смыкающихся на регрессивном этапе (рис. 88). Благодаря тому что Э.Г.Коломыц в своих исследованиях исходил из онтогенической концепции развития, он не только сумел по-новому решить ряд актуальных проблем снего- и ледоведения, но и получил результаты, интересные для онтогенеза минералов. Имеется в виду анализ регуляторных механизмов в системе "индивид — среда", саморегуляция, наследственность, направленность эволюции.

Поисковая минералогия. Одна из важнейших задач современной минералогии — разработка минералогического метода прогнозирования, поисков и оценки месторождений полезных ископаемых. Такого метода как единого целого пока не существует. Есть отдельные частные методы, например шлиховой, есть отдельные приемы [46]. Задача состоит в том, чтобы разработать единую методическую систему, обоснованную единой теорией, которая давала бы возможность получать результаты, принципиально не достижимые другими методами (геохимическими, геофизическими и т.д.). Это сверхзадача поисковой минералогии и ее решение подразумевает синтез комплекса данных практически всех направлений минералогии, прежде всего учения о типоморфизме минералов. Немаловажна здесь роль онтогенеза минералов

лов: "Доставляя для учения о типоморфизме данные о том, как распределяются химические примеси в объеме минералов, как создаются анатомические и морфологические особенности кристаллов и зерен, каким образом индивиды срастаются в агрегаты, онтогенез вносит свой вклад в развитие знаний о поисково-оценочной роли минералов" [76, с.314]. Наиболее интересные работы по применению онтогенетических идей и метода в геологоразведочном деле выполнены Г.Н.Вертушковым, Н.З.Евзиковой, Б.В.Чесноковым, В.В.Букановым, В.А.Поповым и др.

Концептуальная модель онтогенетического прогнозирования [92, 93, 95, 97] основывается на главной идеи онтогенеза — идеи направленного развития минеральных индивидов, прежде всего их анатомии и внешней формы. На основе изучения морфологии и анатомии кристаллов и зерен, анализа взаимоотношений между ними устанавливается генеральный эволюционный ряд комбинаций простых форм или морфологических типов кристаллов (рис. 89). Кристалл на рисунке изображен в проекции на (110), ореол минерализации — в продольной проекции на вертикальную плоскость. Наиболее густо заштрихованная область соответствует переходу от кристалломорфологического типа III к типу IV и наиболее продуктивному по содержанию олова горизонту ореола минерализации. Толстой ломаной линией обозначен контур кондиционных оловянных руд, штриховыми линиями

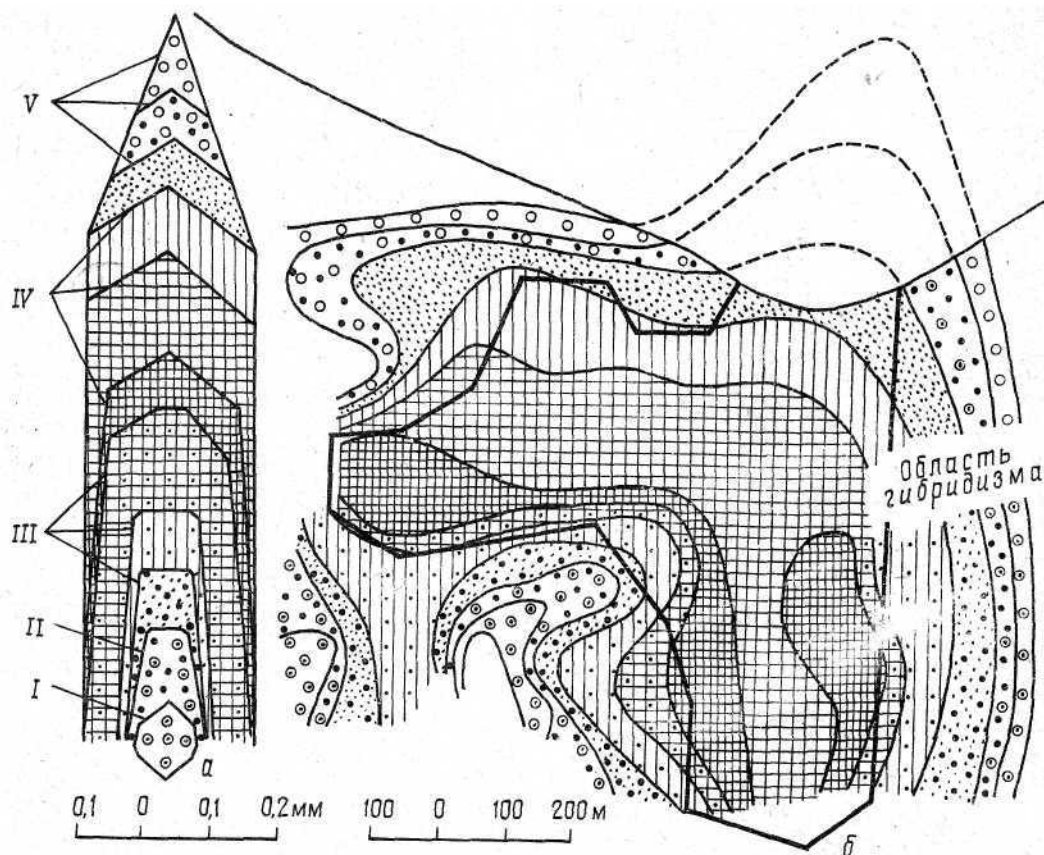


Рис. 89. Зональное строение кристалла касситерита (а) и ореол касситеритовой минерализации (б): I-V — • поверхности разграничения соответственных кристалломорфологических типов касситерита или границы распространения их в оруденелом пространстве

ми — эродированная часть ореола минерализации. Область гибризма — область распространения укороченных по оси *c* кристаллов касситерита, грани которых характерны для различных кристалломорфологических типов и обычно встречаются порознь.

Эволюционные морфолого-анатомические ряды возникают вследствие проявления в природе морфологической изменчивости кристаллов — роста со временем кристаллов, покрывающихся гранями уменьшающейся плотности [94] в связи с принципом В.И.Михеева и И.И.Шафрановского динамического поведения кристаллической структуры в изменяющейся среде. Поскольку эти ряды развиваются направленно во времени, то они могут развиваться строго направленно и в пространстве, обуславливая отчетливую эволюционную (онтогеническую) зональность месторождений. И такая зональность действительно вскрыта на месторождениях. Ее, собственно, можно предполагать а priori, исходя из геогенетического закона, сформулированного Д.В.Рундквистом

[210], Следовательно, установив положение минеральных индивидов интересующей пробы в эволюционном ряду, мы фиксируем положение опробованного участка в пространстве онтогенической зональности. А если известна хотя бы относительная продуктивность зон, то можно, прийти к определенным практическим предсказаниям. Этот метод, в частности, позволяет определить уровень эрозионного среза рудного тела, уровень подсечения его горной выработкой, возможную протяженность и продуктивность на глубину. И хотя описываемый метод формально кристалломорфологический, о чем свидетельствует также его название — поисковая кристалломорфология [97], он, несомненно, и онтогенический. Его важный, если не основной, тезис о поисках руд по наиболее плотным граням возник как следствие переосмысливания закона Браве в свете установленных онтогенетических эволюционных закономерностей, прежде всего касающихся пространственно-временной эволюции формы кристаллов, Н.З.Евзикова [97] дала теоретическое обоснование поисковой кристалломорфологии

и определила возможности ее практического применения. В частности, на примере касситерита и пирита ею рассмотрены основные закономерности распределения их кристаллов во времени, пространстве, а также в связи с местоположением и сохранностью руд. Наиболее эффективно работает этот метод при оценке неперспективных участков. Метод достаточно эффективно используется сейчас для прогнозирования, поисков и оценки месторождений олова, золота, флюорита, барита, киновари, горного хрусталя, редкоземельных минералов и др. В качестве примера приведем уже упоминавшееся Михалковское флюоритовое месторождение в Болгарии, в пространственной зональности которого находят отчетливое отражение эволюционные тенденции изменения габитуса кристаллов флюорита [121]. Строго закономерным является также пространственное распределение различных типов кристаллов кварца в хрусталеносных полях. Оно отражает эволюцию параметров кристаллогенетической среды во времени и пространстве и поэтому имеет значение для поисков и оценки различных типов кристалло-сырья.

Исходя из изложенного, наметим схему последовательности операций, которая может быть рекомендована при поисках и оценке месторождений полезных ископаемых: 1) исследование минералов — выявление их пространственно-временных отношений — 2) установление эволюционных минералогических рядов — 3) площадное минералогическое опробование перспективного района — 4) выявление эволюционной минералогической зональности аномалий — 5) поисковый прогноз и оценка аномалий — 6) проверка аномалий.

Рассмотренный выше метод можно успешно применять и при шлиховых поисках. В данном случае по индивидам полезного минерала в шлихах определяется возможное положение коренного источника сноса, глубина его вскрытия, продуктивность. Заметим, что в шлиховом методе поисков в последнее время наметились две тенденции. Первая — предельное упрощение с целью повышения оперативности, снижения трудоемкости и стоимости; эта тенденция привела к созданию шлихо-геологического метода А.В.Костерина [141]. Вторая тенденция как бы противоположна первой — развивается по линии существенного увеличения объема полезной информации, извлекаемой из шлихов; отра-

жением ее является учет эволюционных критериев, определение дальности переноса по характеру и степени изменения зерен, учет метаморфизма. Примером такого подхода являются работы И.А.Карякина [133], Н.З.Евзиковой [93], В.И.Зубова [122] и др.

Представление о существовании строгих эволюционных онтогенетических рядов, отклонения от которых рассматриваются лишь как исключение — мутационное или наложенное, не является общепринятым. Есть точка зрения, согласно которой (см. гл. VII) таких рядов много, возможно, для каждого месторождения характерен свой ряд. Следовательно, прогнознопойсковая интерпретация такого рода онтогенетических данных значительно сложнее, чем она изложена выше. Есть и крайне категорическое возражение — мнение об отсутствии эволюционных рядов, рассмотренных в изложенном выше представлении; есть лишь эволюционные этапы (зарождение, рост, изменение, разрушение). Одним из аргументов последнего соображения является, по мнению В.А. и В.И.Поповых, несовпадение часто противоположных тенденций изменения свойств по зонам роста в соседних пирамидах нарастания граней.

Анализ результатов изучения широкого круга месторождений и экспериментальные данные все же свидетельствуют о том, что онтогенетические ряды и онтогенетическая зональность существуют, но среди них есть, в полном соответствии со сложностью (прежде всего с точки зрения тектоники) месторождений, наряду с простыми рядами и зональностью, более сложные ряды, которые, вероятно, целесообразно именовать эволюционно-революционными. Их сложность и гетерогенность тем выше, чем сложнее геолого-тектоническая история месторождений. Онтогенетический метод тем и хорош, что позволяет фиксировать революционные всплески на фоне эволюционной смены событий. Особенно убедительно получается, если онтогенетические данные синтезируются с типоморфизмом минералов, о чем более детально сказано в гл. I и IX. Здесь мы только отметим, что и революционно-эволюционный ряд находится в определенном соответствии с рудоносностью объектов. Так, резкая смена призматических (столбчатых) кристаллов кварца на сложнокомбинированные обелисковидные индивиды (анатомически это заметно в переходе секториальных дофинейских двойников в пятнистые) — интерпретировано

как следствие тектонического воздействия на кристаллообразование в полости — сопровождается таким же резким ухудшением качества кристаллосырья. Это отражается также в изменении термолюминесценции, содержании и соотношении электронно-дырочных центров, окраске, количестве водородных дефектов и других конституционных особенностях кристаллов кварца [172]. Причем морфология, особенно габитус кристаллов, в связи с ее зависимостью от морфологии предшествующих индивидов, может быть в такой ситуации более консервативной, чем конституция. Таким образом, есть основание считать актуальными разработки по созданию эволюционно-революционных моделей развития минеральных месторождений [145,186].

С помощью онтогенических исследований решаются практические и другие задачи. Имеются в виду замечательные работы Г.Н.Вертушкова, который вместе с сотрудниками [31, 32] на основе глубокого онтогенического изучения изменения (метаморфизма) жильного кварца спрогнозировал новые типы кварцевого сырья для плавки, что привело к открытию уникальных месторождений. Этот онтогенический подход Г.Н.Вертушкова является сейчас ведущим при изучении всех хрусталеносных провинций. Он используется при поисках и оценке и других видов оптического сырья. В частности, нами на Основе онтогенического анализа флюоритовых тел установлено, что зернистый флюорит некоторых месторождений образовался в результате динамометаморфизма кристаллического флюорита. Это позволило рекомендовать подобные разновидности в качестве шихты для выращивания высококачественных сингенетических монокристаллов [286].

Обратим внимание еще на один из новых вариантов структурного картирования динамометаморфизованных пород и руд, имеющего онтогеническую основу. Это метод регенерации шаров, и применим он в первую очередь к изотропным минералам, ориентировку индивидов которых в пространстве трудно определить традиционными оптическими методами. По площади изучаемого участка, как при обычном структурном картировании, отбираются ориентированные образцы, из которых выпиливаются шары с сохранением ориентационных марок. Поверхность шаров регенерируется с помощью подходящих приемов кристаллосинтеза (например, в ав-

токлавах) — покрывается кристаллическими поверхностями. Путем фотогониометрии или гониометрии устанавливается ориентировка регенерированных субиндивидов и по ним строятся статистические структурные диаграммы. Метод эффективно применяется нами при изучении флюоритовых месторождений. Этим же методом регенерации можно определить разориентировку блоков деформации в пределах выделений любой формы.

В заключение отметим, что применение на практике онтогении — при прогнозировании и поисках минеральных месторождений — находится еще в зачаточном состоянии, и здесь предстоит большая работа по части разработки и внедрения поисковых признаков. Дело в том, что поисковые критерии (признаки), обычно устанавливаемые, имеют как бы статическое содержание, поскольку они отражают какой-то закончившийся процесс, а не его ход (эволюцию), который невозможно постичь без знания анатомии. Последняя, по выражению Д.П.Григорьева, "представляет возможность как бы растягивать признаки, существенно увеличивать их разрешаемость, и тем самым повышать точность наблюдений". Приведем такой простой пример. Распределение центров $A1 - O^-$ по зонам роста кристаллов кварца оказалось неодинаковым в рудоносных кварц-сульфидных жилах и жилах, лишенных сульфидов. Содержание этих центров в пирамидах роста призмы на два порядка ниже, чем в пирамидах роста основных ромбоэдров, поэтому корреляции и сопоставления имеют смысл, если они выполняются на онтогенической основе. Анализ этих индивидов без учета анатомии дает статистически неразличимые результаты.

Технологическая минералогия. Создавая учение об онтогении минералов, Д.П.Григорьев видел как одну из ведущих областей его практического приложения технологию минерального сырья: "Уже при дроблении и измельчении руд сказываются структура и текстура минеральных сростаний, т.е. онтогения агрегатов, а такие процессы обогащения или переработки, в которых имеют место смачивание, адсорбция, адгезия, растворение или разложение и т.д., серьезно зависят от распределения химических примесей, включений, дислокаций и деформаций и других особенностей индивидов. Предопределяя физико-химические, технические свойства руд, эти качества минералов возникают при кристалло-

генезисе и всех прочих явлениях онтогении" [76, С.18].

Не случайно технологи в последнее время обращают серьезное внимание на учет онтогенических особенностей руд при разработке схем их технологической переработки. Главным фактором, определяющим технологию, являются взаимоотношения между индивидами рудных и нерудных минералов, направленность свойств индивидов и их другие качества (в том числе анатомия), выявляемые онтогеническим методом. Проблеме учета генетических особенностей минералов в связи с обогащением руд посвящен специальный труд В.А.Глембоцкого и Г.М.Дмитриевой [48], она обсуждается также в программных статьях В.З.Блискового [15], Н.Ф.Челищева [246], Б.И.Пирогова [180] и наиболее полно - в обобщении А.И.Гинзбурга с соавторами [46]. В указанных работах заложены, по сути, методологические основы технологической минералогии.

Смысл применения онтогенических данных для технологических изысканий определяется следующими соображениями:

- выбором оптимальных условий раскрытия зерен полезного компонента; для этого недостаточно знать только размер зерен, определяемый гранулометрическим анализом, а необходимо учитывать их форму, природу сростаний, особенности границ, знания о которых дает онтогенический метод;

- оптимизацией технологического процесса с учетом неперенной неоднородности состава и свойств мономинеральных зерен (эта задача решается комплексно на основе анализа анатомии индивидов).

Онтогенические характеристики руд позволяют выделить среди них принципиально разные по обогатимости типы, предусмотреть ступенчатую систему измельчения с использованием различных технологий обогащения на различных стадиях. Например, первое измельчение раскрывает два типа агрегатов, которые разделяются гравитацией, затем второе измельчение только концентрата раскрывает зерна полезного минерала, отделяемого флотацией и т.д. Подобная схема реализуется, например, на некоторых фосфоритовых месторождениях [15].

В связи с изложенным многие технологи и минералоги предлагают разрабатывать онтогенические классификации руд, дополняющие и уточняющие текстурно-структурные. Такие классификации имеются и при-

меняются, но онтогения используется в них в весьма примитивном виде. Это, например, классификация А.М.Годэна [52], состоящая примерно из таких таксонов: зерна двух минералов с прямой или изогнутой поверхностью раздела; один минерал пронизывает другой в виде жилок; один минерал образует полную или частичную оболочку вокруг другого; окклюзии или тончайшие включения одного минерала в другом и т.д. Есть и частные классификации для разных типов руд, например, для фосфоритовых — классификация А.И.Смирнова и Н.Г.Фридмана [224]. Несомненно, что разработка и внедрение строго, научных онтогенических классификаций даст серьезный эффект. В настоящее время работы в этом направлении ведутся достаточно интенсивно. Например, Б.И.Пирогов [179] осуществил очень полезный анализ минерало-генетических особенностей железных руд для целей обогащения, продуктивно используя онтогенический подход. Эти руды, как известно, состоят из нескольких железистых минералов, "причем выделение каждого из них требует применения специфических методов: магнетита — магнитной сепарации, оксидов — флотации, карбонатов — применения обжига. Генетический подход дал возможность спланировать наиболее оптимальную технологию.

Несомненно, внедрение онтогенического подхода в обогащение и другие области технологии минерального сырья, которое только началось, весьма перспективно. Это относится прежде всего к тем видам минерального сырья, утилизация которых осуществляется путем разрушения минералов с целью извлечения ценных компонентов. Что же касается минералов, представляющих ценность как монокристалл, как физическое тело (кварц, кальцит, слюды, асбест, алмаз, камнесамоцветное и коллекционное сырье и т.д.), то учение об онтогении минералов уже стало здесь тем теоретическим фундаментом, на котором строится рациональная технология их добычи, обогащения и облагораживания.

На различных этапах технологической цепочки значимость онтогенических данных неодинакова.

1. Для рационального извлечения минеральных индивидов из минерального агрегата необходимо прежде всего знать строение этого агрегата, природу границ между минеральными индивидами.

2. Сортировка индивидов наиболее легко осуществляется по их внешним призна-

кам, которые обуславливаются генезисом. Например, по форме кристаллов, по рисунку гранных скульптур можно безошибочно отобрать монокристаллы кварца, которые после облучения приобретают цитриновую окраску.

3. Раскрой кристаллов, извлечение из них блоков кристаллического материала с различными свойствами требуют глубокого знания анатомии индивида. Это учитывается даже на самых начальных стадиях грубого раскроя. Так, гигантские кристаллы кварца из камерных пегматитов обогащаются с помощью кувалды, и весь этот, казалось бы, разрушительный процесс направлен на извлечение из соответствующих частей кристалла пирамид роста основных ромбоэдров, которые обладают наиболее высоким совершенством структуры и пригодны для изготовления пьезоизделий. Предложенная коллективом минералогов Горного института под руководством А.В.Скропышева "онтогеническая" распиловка кристаллов исландского шпата с учетом их анатомии взамен раскалывания по спайности резко повысила качество изделий, позволила более экономно расходовать кристаллосырье и дала крупный экономический эффект. То же относится и к кристаллам кварца.

4. Для облагораживания минеральных индивидов, повышения их качества (например, снятие дефектов, окрашивание или, наоборот, обесцвечивание и т.д.) необходимо, во-первых, подобрать такой процесс, такое воздействие, которое было бы для полезного качества созидющим, а это функция онтогении; во-вторых, надо предугадать, как кристалл прореагирует на это воздействие, как распределятся в теле кристалла результаты этого воздействия. Это тоже функция онтогении.

Синтез минералов и выращивание монокристаллов. Чаще всего онтогенические идеи применяются в области синтеза минералов, который в значительной мере представляет собой практическую реализацию онтогенических моделей. "Именно из онтогении минералов мы черпаем постоянно новые данные для наших представлений о механизме роста", — так авторитетно и справедливо подчеркивает известный экспериментатор В.Клебер [136, с.25]. Это очевидно и широко известно, поэтому мы не будем подробно останавливаться на анализе использования достижений онтогении в этой области. Обратим внимание только на некоторые ростовые проблемы,

в решении которых достижения онтогении могут быть эффективно использованы.

Актуальная и сложная задача — выращивание монокристаллов заданной формы. Сейчас это достигается главным образом введением "формоуправляющего" внешнего фактора: формы-матрицы, теплового барьера и т.д. Представляется, что с помощью онтогении может быть разработан и разрабатывается принципиально иной, более естественный метод, в котором к заданной форме кристалл будет "заходить" в процессе эволюции или под действием внешних диссимметрирующих факторов. Такой подход уже реализуется для получения в кристаллах отверстий или полостей заданной формы, размера и ориентировки путем управления процессами зарастания газовых пузырьков.

В последнее время нередко возникает задача гибридизма качеств разных кристаллов. Скажем, одному веществу надо дать форму другого (например, кварцу — форму слюды). Осуществить гибридизм можно путем прямого или ступенчатого, поэтапного замещения одного минерала другим. Программу такого замещения можно разработать, опираясь на закономерности псевдоморфизации, которые раскрыты в учении об онтогении минералов.

Металлургия и металловедение. Задачи металловедения в какой-то мере сходны с задачами минералогии. Для оптимизации металлургического процесса, для получения металлов с заданной структурой необходимо знать, как развивается процесс кристаллизации. Расшифровка кристаллизационной истории металлов методически близка к расшифровке кристаллизационной истории руд. Поэтому онтогенический метод может быть применен и применяется в металлургии в том же виде, как и в минералогии. Впрочем, металловеды самостоятельно пришли к приемам онтогении еще задолго до оформления самого учения об онтогении. Здесь можно вспомнить классическую расшифровку генезиса так называемого кристалла Чернова. Это типично онтогеническое исследование.

В настоящее время онтогенический метод в металловедении — один из наиболее популярных. Особенно эффективно он применяется при изучении металлов и сплавов с крупнокристаллической и сложной текстурой. Наибольшие успехи достигнуты в расшифровке генезиса эвтектик. В одной из солидных монографий, посвященных этой проблеме [231], разработаны деталь-

ные онтогенические модели самых различных простых и сложных эвтектик. Это крупный шаг вперед от формальных, в значительной степени надуманных моделей, подобных модели электрических пакетов Тиллера или модели эвтектической колонии Чэдвика.

Существенные коррективы в управление сферолитной кристаллизацией металлов внесла онтогеническая расшифровка генезиса сферолитов.

Очевидно, онтогения тоже может кое-что позаимствовать из металловедения. Уже отмечалось, что в металловедении существует хорошо проработанный методический раздел "стереология", удачные приемы которой могли бы обогатить онтогенический анализ (см. гл. IV). Впрочем, уже появляются интересные работы, направленные на взаимопроникновение кристаллизационных идей металлургии и геологии [309].

Заключая краткий анализ онтогенических работ прикладного содержания, мы с удовлетворением констатируем, что прак-

тические функции онтогении минералов весьма многогранны и что с помощью онтогенических подходов решаются задачи, в принципе не решаемые другими методами. За относительно короткий срок существования онтогении минералов достаточно четко определились области практических приложений онтогении, в каждой из них сделано немало интересных и полезных работ. Но в целом же практическая реализация онтогенических идей находится в самом начальном, зачаточном состоянии, и за ними большое практическое будущее. Из всех прикладных областей онтогении сейчас, пожалуй, самой важной, самой актуальной является разработка минералогических методов прогнозирования, поисков и оценки месторождений полезных ископаемых. Без этих методов мы не вернем минералогии ее определяющее значение в цикле наук о Земле, не поднимем ее престиж. Вот в этой-то области и надо сконцентрировать основной творческий потенциал минералогов.

В этой книге, адресованной главным образом минералагам и другим специалистам, изучающим полиминеральные или поликристаллические природные и искусственные агрегаты (петрографам, геологам — рудникам и нерудникам, химикам, металловедом, гляциологам и др.), мы попытались определить общие основы онтогенетического метода исследований, рассмотреть по возможности детально всю процедуру метода, показать особенности его приложения к исследованию некоторых минералогических объектов. Обобщая и подытоживая изложенный в предыдущих главах материал, еще раз определим общую схему онтогенетического анализа и последовательность операций в процессе онтогенетического исследования. Они сводятся к следующему.

1. Определение конкретной цели онтогенетического исследования исходя из особенностей решаемой проблемы (геологической, генетической, поисково-оценочной, технологической и т.д.).

2. Выделение первоочередных объектов для детальных онтогенетических исследований на основе результатов общих или специальных геолого-минералогических работ — геологического или минералогического картирования, маршрутных или площадных наблюдений, съемочной, геолого-разведочной, горно-эксплуатационной документации и т.д.

3. Полевая онтогенетическая документация исследуемого объекта в масштабе, разрешающем его структуру (т.е. важнейшие взаимоотношения между минеральными системами, слагающими объект: разрешение до уровня минеральных тел, агрегатов, индивидов и т.д.). Полевая документация должна дать по возможности полное представление о внутреннем строении объекта, о положении его во вмещаю-

щей геологической среде, о причинно-следственных и пространственно-временных взаимоотношениях объекта и его элементов со средой. Полевая документация включает в себя онтогенетическое описание объекта, общие и детализационные зарисовки, особенно по наиболее характерным и информативным естественным срезам и горным выработкам, фотодокументацию, необходимые измерения и испытания. Полевая документация сопровождается возможными генетическими интерпретациями, в том числе предварительными диаграммами последовательности минералогенетических событий.

4. Опробование исследуемого объекта, отбор представительных образцов и проб для лабораторных исследований, измерений, аналитических работ и экспериментального моделирования.

5. Лабораторное изучение и препарирование образцов и проб. В лаборатории проводятся повторное детальное изучение и описание отобранных в поле образцов и проб с применением увеличительной техники, макро- и микрохимическими испытаниями. При этом образцы механически или химически полностью или частично расчленяются на индивиды, инструментально измеряются и взвешиваются интересные элементы, делаются угловые измерения. Подготавливаются препараты для микроскопических физических и химических исследований. Особое внимание уделяется изучению поверхностей срастания индивидов. Уточняются созданные на основе полевых исследований генетические построения.

6. Исследование препаратов и проб. Этот этап принципиально отличается от всех предыдущих, так как исследуется уже не объект в целом, а его искусственно

выделенные части, вплоть до мельчайших; место этих частей в общей структуре объекта можно восстановить лишь на основе полевой и лабораторной документации. Это обстоятельство необходимо постоянно учитывать, чтобы не потерять связи части и целого и не сделать серьезных ошибок при интерпретации (не распространить результаты исследований фрагмента на другие части объекта, не имеющие общности с изученным фрагментом). Данный этап включает в себя микроскопические исследования прозрачных и полированных шлифов с необходимыми физическими измерениями и химическими испытаниями, микроскопические и электронно-микроскопические исследования поверхностей, текстурные и структурные рентгеновские исследования, химические анализы, особенно топахимические, пространственные с применением ионного, электронного и лазерного микрозондирования, измерение физических и химических свойств и особенностей их изменения в пространстве, выявление и изучение анатомии индивидов и т.д.

7. Синтез всех полученных в результате онтогенического исследования данных и создание общей структурной пространственно-временной модели минералогического объекта, обязательно отражающей последовательность формирования всех его элементов, последовательность событий, т.е. историю объекта; описание модели — словесное, символическое, графическое, аналитическое, комплексное.

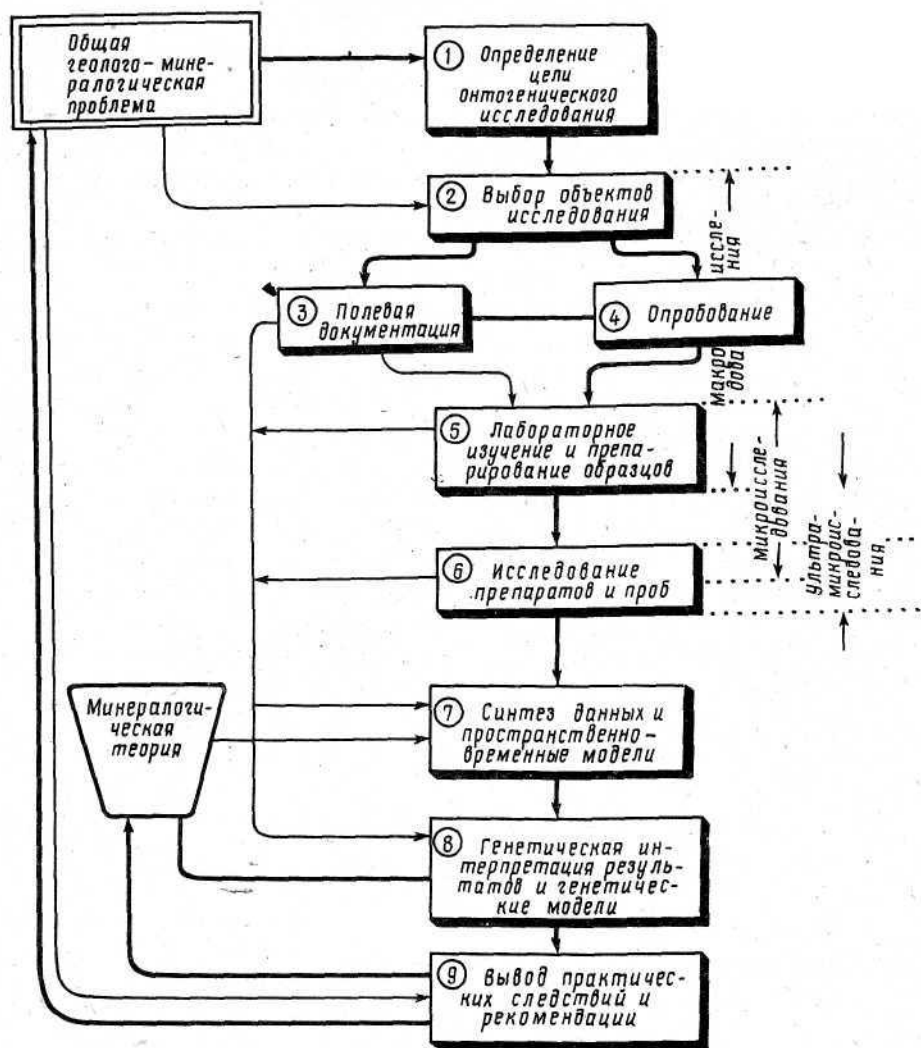
8. Генетическая интерпретация (минералогенетическая реконструкция) результатов онтогенических наблюдений с привлечением всего комплекса данных по объекту, в том числе результатов модельных экспериментов, создание комплексной генетической модели объекта на строгой исторической основе.

9. Определение практических следствий онтогенического исследования, в первую очередь с позиций решения поставленных перед этим исследованием конкретных задач, а также следствий, вытекающих из самого исследования, разработка рекомендаций по научному и практическому использованию результатов.

Взаимосвязь исследовательских операций, перечисленных, выше, иллюстрируется прилагаемой схемой.

Онтогенический метод изучения минералогических объектов стал в настоящее время основным средством установления эволюционных закономерностей минералогенезиса и важным поставщиком знаний для решения многих теоретических и практических задач, возникающих в процессе топоминералогических исследований, минералогического картирования, прогнозирования, поисков и оценки месторождений полезных ископаемых, задач технологической минералогии. Онтогенический метод все шире применяется в практике минералогических исследований, все большее число минералогов в СССР и за рубежом берут его на вооружение. Из года в год накапливается онтогенический опыт, повышается эффективность онтогенических исследований. Однако нужно подчеркнуть, что освоение и внедрение в практику этого метода осуществляется еще недостаточно энергично, возможности его используются далеко не полностью. Это определяется целым рядом причин — недостатком специалистов, знакомых с теоретическими и методическими разработками в онтогении минералов, слабой оснащенностью научных и производственных исследовательских подразделений соответствующим оборудованием, приборами, аппаратурой, а также наличием "узких" мест в самой онтогенической методологии, слабой разработанностью многих методических приемов.

Минералогам нужно приложить еще немало усилий для совершенствования онтогенического метода, его пропаганды и внедрения не только в минералогию, но и в петрографию, литологию, кристаллографию, гляциологию, металловедение, технологию минерального сырья, кристаллотехнологию и в другие области естествознания и техники, исследующие минеральное вещество. Чтобы метод эффективно внедрялся, необходимо наряду с теоретическими и практическими онтогеническими исследованиями больше внимания уделять общей методологии и конкретным методологическим разработкам, анализирую-



вать и обобщать накопленный методический опыт.

Как специальную цель в минералогических исследованиях следовало бы поставить разработку новых онтогенетических приемов, в том числе и полевых, а также методов препарирования минеральных агрегатов и индивидов. При этом кроме широко применяемых методов механического разрушения и раскрытия минеральных тел целесообразно более широко опробовать методы избирательного физического и химического воздействия, методы неразрушающего проникновения внутрь твердого вещества (рентгенографию, топографию и т.д.). Требуют существенного совершенствования методы полевой и лабораторной документации, их специальной приспособленности к решению онтогенетических задач,

существенного повышения наглядности и информативности. Важной методической задачей является и переход на все более глубокие микроуровни в исследовании минеральных индивидов и агрегатов, причем необходимо, чтобы микроскопические и электронномикроскопические (включая микрозондовые) исследования из эпизодических превратились в рядовые, широкоприменяемые.

Очень слабо в решении онтогенетических задач используется модельный эксперимент, хотя он, как показали работы Д.П.Григорьева, В.С.Балицкого, А.В.Шубникова, В.Я.Хаимова-Малькова, М.Малеева, А.М.Асхабова, В.А.Петровского, А.Ф.Кунца, Б.В.Чеснокова и многих других, весьма эффективен и в ряде случаев дает исчерпывающий ответ на казалось бы неразрешимые другими методами задачи.

К важнейшим и ответственным инструментам онтогенического метода относятся критерии одновременного и последовательного роста минералов, замещения, перекристаллизации, разрушения и других минералогенетических явлений. Арсенал этих критериев, особенно прямых, неоспоримых, пока очень ограничен. Нужны специальные целенаправленные поиски новых прямых и косвенных онтогенических критериев.

Для совершенствования онтогенического метода и повышения его эффективности необходимо продолжить выяснение опытным путем особенностей применения метода к изучению различных объектов, в том числе и таких малоизученных в онтогеническом отношении, как осадочные породы, особенно тонкозернистые, и им подобные. Ценный опыт может быть накоплен в результате онтогенического изучения современных минералообразующих процессов.

Следует более широко обсудить методические проблемы онтогении минералов

в печати, на минералогических собраниях, школах, обращать внимание на эти проблемы при преподавании минералогии в вузах, подготовке аспирантов.

В списке литературы мы приводим довольно большое количество опубликованных работ, изучение которых позволит расширить и углубить знания по онтогении минералов. Считаем полезным закончить книгу рекомендацией нескольких работ, методически принципиально важных в онтогенических исследованиях. Это работы А.Г.Жабина по онтогении минеральных агрегатов и минеральных тел [105, 106 и др.], Ю.М.Дымкова [90] по онтогении гидротермальной минерализации крупного региона, Э.Г.Коломыца [139] по онтогении снега, А.М.Дымкина и А.А.Пермякова [85] по онтогении магнетита, а также статьи Р.Л.Бродской [18, 19 и др.] по онтогении горных пород. Надеемся, что этот рекомендательный список вскоре можно будет расширить.

1. *Адамс С.Ф., Колони Р.Ж., Ньюхауз В.Г. и др.* Критерии возрастных соотношений рудообразующих минералов по микроскопическим исследованиям. - М.; Л.: Горгеолнефтиздат, 1934. - 210 с.
2. *Алиев Р.М.* Исследование онтогении кристаллов кальцита из Дашкесанского железорудного месторождения // Генезис минеральных индивидов и агрегатов. Онтогения минералов. - М.: Наука, 1966. - С.181-200.
3. *Асхабов А.М.* Регенерация кристаллов. - Л.: Наука, 1979. - 176 с.
4. *Асхабов А.М.* Процессы и механизмы кристаллогенезиса. - Л.: Наука, 1984. - 168 с.
5. *Асхабов А.М.* Онтогеническое значение гравитационной дифференциации минералообразующих растворов // Проблемы онтогении минералов. - Л.: Наука, 1985. - С.31-36.
6. *Балицкий В.С.* Экспериментальное изучение процессов хрусталеобразования. - М.: Недра, 1978. - 144 с.
7. *Барабанов В.Ф.* Лекции по генетической минералогии. - Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1969. - Т.1. - 191 с.
8. *Барабанов В.Ф.* Генезис гидротермальных жил и проблема источников растворов их образующих // Зап. Всесоюз. минерал. о-ва. - 1976. - Вып. 1. - С.121-129.
9. *Барабанов В.Ф.* Генетическая минералогия. - Л.: Недра, 1977. - 332 с.
10. *Белов Н.В.* Предисловие редактора // Рост кристаллов / О.Г.Козлова. - М.: Изд-во Моск. ун-та, 1967. - С.3.
11. *Белое Н.В.* Очерки по структурной минералогии. - М.: Недра, 1976. - 334 с.
12. *Белянкин Д.С.* Магматическая ликвация - можно ли верить в нее и какие мы имеем к тому основания // Изв. АН СССР. Сер. геол. - 1949. - № 5. - С.35-40.
13. *Бетехтин А.Г.* О генетической минералогии и генезисе минералов // Зап. Всесоюз. минерал. о-ва. - 1954. - С.65-67.
14. *Бетехтин А.Г., Генкин А.Д., Филимонова Л.А., Шадлун Т.Н.* Текстуры и структуры руд. - М.: Госгеолтехиздат, 1958. - 435 с.
15. *Блисковский В.З.* Обогажительная минералогия руд - самостоятельный раздел минералогической науки // Вещественный состав фосфоритных руд. - М., 1979. - С.3-29. - (Тр.ГИГХС; Вып. 30).
16. *Блох А.М.* Структура воды и геологические процессы. - М.: Недра, 1969. - 216 с.
17. *Брауне Р.* Химическая минералогия. - Спб., 1904. - 408 с.
18. *Бродская Р.Л., Жданов В.В.* Опыт количественной характеристики процесса перекристаллизации метаанортозитов // Зап. Всесоюз. минерал. о-ва. - 1978. - Вып.5. - С.597-602.
19. *Бродская Р.Л., Марин Ю.Б.* Использование стереометрических методов в онтогеническом анализе горных пород // Там же. - 1979. - Вып. 2. - С.141-153.
20. *Буканов В.В.* Морфология и внутреннее строение кристаллов природного кварца // Минералогия и минералогическая кристаллография. - Свердловск: Изд-во Свердл. горн. ин-та, 1971. - С.170-176.
21. *Буканов В.В.* Горный хрусталь Приполярного Урала. - Л.: Наука, 1974. - 210 с.
22. *Булах А.Г.* Термодинамические свойства H₂O в области до 1000 °С и 100 кбар и особенности фазовых переходов в H₂O-системе // Зап. Всесоюз. минерал. о-ва. - 1977. - Вып. 4. - С.448-459.
23. *Васильев В.И., Драгунов В.И., Рундквист Д.В.* Парагенезис минералов и "формация" в концепции об уровнях организации вещества // Там же. - 1972. - Вып.3. - С.281-289.
24. *Белинский В.В.* Закон тождества и гомологические ряды в минералогии // Минералогия и петрохимия интрузивных комплексов Сибири. - Новосибирск: Наука, 1982. - С.3-16.
25. *Вернадский В.И.* Задачи минералогии в нашей стране // Природа. - 1928. - № 1. - С.21-40.
26. *Вернадский В.И.* История минералов Земной коры // Избр. соч.: В 5 т. - М.: Изд-во АН СССР, 1959. - Т.4, кн. 1. - 624 с.
27. *Вернадский В.И.* История минералов Земной коры // Избр. соч.: В 5 т. - М.: Изд-во АН СССР, 1960. - Т. 4, кн.2. - 651 с.
28. *Вернадский В.И.* Проблема времени в современной науке // Размышления натуралиста. - М.: Наука, 1975. - С.29-50.
29. *Вернон Р.Х.* Метаморфические процессы. Реакции и развитие микроструктуры. - М.: Недра, 1980. - 227 с.
30. *Вертушков Г.Н.* Минералогическое картирование // Минералогия и петрография Урала. - Свердловск: Изд-во Свердл. горн. ин-та, 1972. - С.3-12.

31. Вертушков Г.Н., Борисков Ф.Д., Емлин Э.Ф. и др. Жильный кварц восточного склона Урала. - Свердловск, 1970. - Ч.2. - 103 с. - (Тр. Свердл. горн. ин-та; Вып.66).
32. Вертушков Г.Н., Емлин Э.Ф., Синкевич Г.А. и др. Жильный кварц восточного склона Урала. - Свердловск, 1969. - Ч.1. - 100 с. - (Тр. Свердл. горн. ин-та; Вып. 58).
33. Возняк Д.К. О генезисе сотовых кварцев // Регион. и генет. минералогия. - 1979. - Вып.3. - С.39-47.
34. Возняк Д.К., Лазаренко Е.К., Павлишин В.И. Новый генетический тип кварца - скелетные кристаллы с включениями углеводородов // Там же. - 1978. - Вып. 2. - С.15-26.
35. Возняк Д.К., Матяш И.В., Брик А.Б. и др. Об образовании сотового кварца по данным ЭПР // Геохимия. - 1984. - № 4. - С.534-540.
36. Гайдукова В.С., Соколова С.В., Дубинчук В.Т. и др. О многоступенчатом распаде магнетита из железистых руд Ковдорского месторождения // Минерал. журн. - 1984. - № 1. - С.64-70.
37. Ганеев И.Г. Строение и свойства гидротермальных растворов. Форма миграции минерального вещества // Изв. АН СССР. Сер. геол. - 1977. - № 3. - С.22-35.
38. Генезис минеральных индивидов и агрегатов. Онтогенез минералов: Сб. ст. / Под ред. Д.П. Григорьева. - М.: Наука, 1966. - 304 с.
39. Гениш Г. Выращивание кристаллов в гелях. - М.: Мир, 1973. - 112 с.
40. Герасимовский В.И. О задачах генетической минералогии // Зап. Всесоюз. минерал. о-ва. - 1953. - Вып.1. - С.68-70.
41. Герасимовский В.И. Задачи генетической минералогии // Вопросы геохимии и минералогии. - М.: Изд-во АН СССР, 1956. - С.129-138.
42. Гзовский М.В. Моделирование тектонических процессов // Проблемы тектонофизики. - М.: Изд-во АН СССР, 1969. - С.50-90.
43. Гинзберг А.С. Лекции по экспериментальной петрографии. - Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1938. - 167 с.
44. Гинзберг А.С. Экспериментальная петрография. - Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1951. - 270 с.
45. Гинзбург А.И. Генетическая минералогия — задачи и проблемы // Проблемы кристаллохимии и генезиса минералов. — Л.: Наука, 1983. - С.14-20.
46. Гинзбург А.И., Кузьмин В.И., Сидоренко Г.А. Минералогические исследования в практике геологоразведочных работ. - М.: Недра, 1981. - 237 с.
47. Глазов А.И. Методы морфометрии кристаллов. - Л.: Недра, 1981. - 140 с.
48. Глембоцкий В.А., Дмитриева Г.М. Влияние генезиса минералов на их флотационные свойства. - М.: Наука, 1965. - 143 с.
49. Гоцишвили В.Г., Выхирев Н.П., Ярошевич В.З. О влиянии структурного состояния исходных материалов на продукты гидротермального синтеза // Структура, рост и методы изучения кристаллов. — Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1974. - С.9.
50. Годовиков А.А. Введение в минералогию. — Новосибирск: Наука, 1975. — 232 с.
51. Годовиков А.А., Калинин Д.В., Карпинский В.А. и др. Об интерпретации результатов экспериментальных исследований // Тр. VIII совещ. по эксперимент. и технич. минералогии и петрографии. - М.: Наука, 1971. - С.16-25.
52. Годэн А.М. Основы обогащения полезных ископаемых. - М.: Металлургиздат, 1946. - 535 с.
53. Григорьев Д.П. О реакционном принципе в петрогенезисе // Сов. геология. - 1939. - № 12. - С.61-67.
54. Григорьев Д.П. Новые наблюдения результатов гравитационного передвижения кристаллов в жилах альпийского типа на Урале // ДАН СССР. - 1944. - 44, № 5. - С.217-219.
55. Григорьев Д.П. О генезисе минералов. // Зап. Всесоюз. минерал. о-ва. - 1947. — № 1. - С.51-62.
56. Григорьев Д.П. Минералогия в Горном институте за 175 лет // Там же. - 1948. - № 3. - С.178-184.
57. Григорьев Д.П. Новые задачи генетической минералогии // Природа. - 1950. — № 9. - С.22-30.
58. Григорьев Д.П. Что известно о зарождении минералов? // Зап. Всесоюз. минерал. о-ва. - 1951. - № 1. - С.15-32.
59. Григорьев Д.П. О генезисе натечных или метакolloидных, колломорфных агрегатов минералов // Там же. - 1953. - № 1. - С.7-21.
60. Григорьев Д.П. Новые запросы минералогии в отношении экспериментальных работ по генезису минералов // Тр. IV совещ. по эксперимент. минералогии и петрографии. - М.: Изд-во АН СССР, 1953. - Ч.2. - С.15-21.
61. Григорьев Д.П. Что же такое генетическая минералогия? // Зап. Всесоюз. минерал. о-ва. - 1955. - № 3. - С.377-378.
62. Григорьев Д.П. Развитие представления об объектах минералогии и понятие о минералах по А.К.Болдыреву // Там же. - 1956. - № 4. - С.468-471.
63. Григорьев Д.П. О скорости кристаллизации минералов // Там же. - 1959. - Вып. 5. - С.550-560.
64. Григорьев Д.П. Онтогенез минералов. - Львов: Изд-во Львов. ун-та, 1961. — 284 с.
65. Григорьев Д.П. Первичная кристаллизация минералов и структуры метеоритных хондр // ДАН СССР. - 1964. - 156, № 6. - С.1355-1357.
66. Григорьев Д.П. Кристаллизация пироксена в метеоритных хондрах // Там же. - 1969. - 187, № 1. — С.160-162.
67. Григорьев Д.П. О законах анатомии кристаллов // Кристаллография. — 1971. — 16, № 6. — С.1226-1229.
68. Григорьев Д.П. Морфология скелетных кристаллов оливина во фрагменте шпинелевого троктолита, доставленного автоматической станцией "Луна-20" // ДАН СССР. - 1975. - 225, № 2. - С.403-405.
69. Григорьев Д.П. Минерал как организм // Проблемы генетической информации в минералогии. - Сыктывкар, 1976. - С.*-?.
70. Григорьев Д.П. Позиции онтогенеза минералов // Зап. Всесоюз. минерал. о-ва. — 1978. - Вып. 4. - С.407-415.
71. Григорьев Д.П. Телесные модели генезиса минералов // Там же. - 1979. — Вып. 2. - С.129-140.
72. Григорьев Д.П. Сравнительно-исторический анализ при изучении генезиса минералов

- и минеральных месторождений // Там же. - 1982. - Вып. 4. - С.422-431.
73. Григорьев Д.П. Анатомия минералов // Там же. - 1984. - Вып.3. - С.262-272.
74. Григорьев Д.П., Буканов В.В., Маркова Г.А. Синхронизация процессов кристаллизации по зональности кристаллов // ДАН СССР. - 1969. - 185, №5. - С.1129-1132.
75. Григорьев Д.П., Евзикова Н.З., Зидарова Б. и др. Кристалломорфологическая эволюция минералов // Науч. докл. Коми фил. АН СССР. - 1981. - Вып. 76. - 28 с.
76. Григорьев Д.П., Жабин А.Г. Онтогенез минералов. Индивидуальность. - М. : Наука, 1975. - 340 с.
77. Григорьев Д.П., Маркова Г.А. Фотометрическое исследование зонально-секториального строения мусковита // Проблемы кристаллологии. - М. : Изд-во Моск. ун-та, 1971. - С.171-178.
78. Григорьев Д.П., Юшкин Н.П. Новые идеи и методы в генетической минералогии // Новые идеи в генетической минералогии. - Л. : Наука, 1983. - С.3-7.
79. Гриздейл Р.О. Рост кристаллов из молекулярных комплексов // Теория и практика выращивания кристаллов. - М. : Металлургия, 1962. - С.176-189.
80. Гулин С.А. Закономерности формирования метасоматической зональности. - Л. : Недра, 1972. - 171 с. - (Тр. НИИГА; Т.169).
81. Дементьева Г.И. Индукционные грани на кристаллах: Автореф. дис. ...канд. геол.-минерал. наук. - Л., 1964. - 24 с.
82. Долгов Ю.А. Особенности генезиса высокотемпературных кварцев // Минерал. сб. Львов. ун-та. - 1955. - № 9. - С.85-89.
83. Доливо-Добровольская Г.И. Морфология индукционных граней на кристаллах // Зап. Ленингр. горн. ин-та. - 1968. - 54, вып. 2. - С.78-82.
84. Домарев В.С. Об эволюции процессов рудообразования в истории Земли // Проблемы кристаллохимии минералов и эндогенного минералообразования. - Л. : Наука, 1967. - С.221-237.
85. Дымкин А.М., Пермяков А.А. Онтогенез магнетита. - Свердловск : УВД АН СССР, 1984. - 190 с.
86. Дымков Ю.М. Урановая минерализация Рудных гор. - М. : Атомиздат, 1960. - 100 с.
87. Дымков Ю.М. О книге "Онтогенез минералов" Д.П.Григорьева // Зап. Всесоюз. минерал. о-ва. - 1963. - Вып. 4. - С.489-491.
88. Дымков Ю.М. Вопросы генезиса сферолитов настурана // Атомная энергия. - 1966. - Вып. 3. - С.256-260.
89. Дымков Ю.М. Природа урановой смоляной руды. - М. : Атомиздат, 1973. - 240 с.
90. Дымков Ю.М. Парагенезис минералов ураноносных жил. - М. : Недра, 1985. - 206 с.
91. Дэна Дж., Дэна Э.С., Фрондель К. Система минералогии : Минералы кремнезема. - М. : Мир, 1966. - 430 с.
92. Евзикова Н.З. Практический аспект кристалломорфологии касситерита. // Зап. Всесоюз. минерал. о-ва. - 1972. - Вып. 2. - С.237-249.
93. А.С. 469101. Способ определения уровня среза рудных тел / Н.З.Иванова (Евзикова) // Открытия. Изобретения, промышленные образцы, товарные знаки. - 1975. - № 16. - 97 с.
94. Евзикова Н.З. О времени и месте появления плотных граней на кристаллах минералов // Кристаллогенезис и процессы минералообразования (Материалы Всесоюз. конф. 1975 г.). - Л. : Изд-во Ленингр. горн. ин-та. - 1976. - С.23-29.
95. Евзикова Н.З. Кристалломорфологические основы учения о типоморфизме минералов // Регион. и генет. минералогия. - 1979. - Вып. 3. - С.3-19.
96. Евзикова Н.З. Оценка гидротермальных рудопроявлений олова и золота кристалломорфологическим методом // Минералогические критерии оценки рудоносности. - Л. : Наука, 1981. - С.99-109.
97. Евзикова Н.З. Поисковая кристалломорфология. - М. : Недра, 1984. - 144 с.
98. Елисеев Э.Н. Общие принципы моделирования процессов минералообразования // Минерал. сб. Львов. ун-та. - 1974. - Вып. 4, № 28. - С.7-13.
99. Ермаков Н.П., Долгов Ю.А. Термобарогеохимия. - М. : Недра, 1979. - 272 с.
100. Жабин А.Г. О времени выделения минералов ниобия, циркония и редких земель в транзитном пегматите Блюмовской копи // Тр. ИМГРЭ. - 1960. - Вып. 4. - С.74-84.
101. Жабин А.Г. Границы зерен в агрегатах // Онтогенетические методы изучения минералов. - М. : Наука, 1970. - С.11-27.
102. Жабин А.Г. Структура и текстура минеральных индивидов как источники генетической информации о рудообразовании : Автореф. дис... д-ра геол.-минерал. наук. - М., 1975. - 43 с.
103. Жабин А.Г. Существует ли эволюция видообразования минералов на Земле? // ДАН СССР. - 1979. - 247, № 1. - С.199-202.
104. Жабин А.Г. Диагностика синхронности продуктов минералообразования // Минерал. журн. - 1979. - № 1. - С.42-56.
105. Жабин А.Г. Онтогенез минералов. Агрегаты. - М. : Наука, 1979. - 276 с.
106. Жабин А.Г. Стадиальный анализ в генетической минералогии // Исследование рудообразующих минеральных систем. - Свердловск : УНЦ АН СССР, 1981. - С.45-55.
107. Жабин А.Г. Онтогенез минералов и кинетика, динамика геохимических процессов // Динамические модели физической геохимии. - Новосибирск : Наука, 1982. - С.9-16.
108. Жабин А.Г. Проблемы филогении минералов // Новые идеи в генетической минералогии. - Л. : Наука, 1983. - С.7-12.
109. Жабин А.Г. Понятия онтогенеза и филогенеза в эволюционном направлении генетической минералогии // Проблемы кристаллохимии и генезиса минералов. - Л. : Наука, 1983. - С.21-26.
- ПО. Жабин А.Г. Фундаментальные проблемы минералогии // Проблемы онтогенеза минералов. - Л. : Наука, 1985. - С.10-21.
111. Жабин А.Г. Минералогическое картирование рудного тела в онтогенетическом аспекте // Минералогическое картирование рудоносных территорий. - Свердловск : УНЦ АН СССР, 1985. - С.13-21.
- 111а. Жабин А.Г., Жабин Е.Г., Харченков А.Г. Новый стереологический метод определения формы, количества и размеров зерен минералов в агрегате по статистическому набору их сечений // Минерал. журн. - 1981. - № 4. - С.90-100.

112. *Жабин А.Г., Русинов В.Л.* Классификация и генезис псевдоморфоз // Зап. Всесоюз. минерал, о-ва. - 1973. - Вып. 3. - С.241-253.
113. *Жабин А.Г., Самсонова КС.* Градиентные конституционные и коллекторские свойства минералов в околорудных ореолах // Минерал, журн. - 1982. - № 1. - С.9-19.
114. *Жабин А.Г., Харченко А.Г.* Равновесная структура минерального агрегата // Кристаллография и минералогия. - Л.: Ленингр. горн, ин-т, 1972. - С.61-70.
115. *Жабин А.Г., Юшкин Н.П., Асхабов АМ.* Процессы экспериментального кристаллообразования и генетическая минералогия // Зап. Всесоюз. минерал, о-ва. - 1979. - Вып. 2. - С.250-253.
116. *Жарилов В.А.* Экспериментальная минералогия // Вестн. АН СССР. - 1971. - № 10. - С.38-43.
117. *Жарилов В.А.* Некоторые актуальные проблемы экспериментальной минералогии // Зап. Всесоюз. минерал, о-ва. - 1976. - Вып. 5. - С.543-561.
118. *Жилинский Г.Б.* Основные проблемы экспериментальной минералогии и рудогенеза // Вестн. АН КазССР. - 1974. - № 9. - С.26-30.
119. *Жоль М.* Исследование границ сростаний минералов железистых кварцитов. - Деп. ВИНТИ, № 5298-82, 1982. - 27 с.
120. *Заварицкий А.Н.* Об амазоните // Зап. Всесоюз. минерал, о-ва. - 1943. - Вып. 1. - С.29-38.
121. *Зидарова Б., Малеев М., Костов И.* Кристаллогенезис и хабитус на зональность на флюорита от Михалковского находище. Централните Родопи // Геохимия, минералогия, петрология (Болгария). - 1978. - Кн.8. - С.3-26.
122. *Зубов В.И.* Кристалломорфология кинвари и ее использование при поисках ртутных месторождений. - М.: Недра, 1976. - 80 с.
123. *Иванов И.Л.* Проблемы экспериментального изучения минеральных равновесий метаморфических и метасоматических процессов. - М.: Наука, 1970. - 248 с.
124. *Иванов М.Л.* Роль микробиологических процессов в генезисе месторождений самородной серы. - М.: Наука, 1964. - 368 с.
125. *Иванов О.Л., Воробьев Ю.Ж., Ефременко Л.Я. и др.* Особенности изменения состава и свойств природного кристалла касситерита в процессе роста // ДАН СССР. - 1980. - 251, № 3. - С.689-692.
126. *Иванов О.П., Ефременко Л.Я.* Об изменении во времени характера зональности отложения в оловянных жилах Певека // Там же. - 1976. - 230, № 2. - С.429-431.
127. *Казицын Ю.В.* Метасоматизм в земной коре // Л.: Недра, 1979. - 208 с.
128. *Казицын Ю.В., Рудник В.А.* Руководство к расчету баланса вещества и внутренней энергии при формировании метасоматических пород. - М.: Недра, 1968. - 364 с.
129. *Калюжный В.А.* Перенасыщение жидких включений в минералах и его генетическое значение // Минерал, сб. Львов, ун-та. - 1971. - Вып. 2, № 25. - С.124-131.
130. *Калюжный В.А.* Основы учения о минералообразующих флюидах. - Киев: Наук, думка, 1982. - 240 с.
131. *Кантор Б.З.* Коллекционирование минералов. - М.: Недра, 1982. - 174 с.
132. *Корякин А.Е.* Об источнике кремнезе-
- ма кварцевых жил и хрусталеносных гнезд Приполярного Урала // Тр. ВНИИП. - 1958. - 2, вып. 1. - С.25-36.
133. *Корякин Н.А.* Использование типоморфных признаков касситерита при изучении и оценке оловянных россыпей // Минералогические критерии оценки рудоносности. - Л.: Наука, 1981. - С.119-126.
134. *Корякина Т.А., Эшкин В.Ю.* К вопросу об эволюции морфологии кристаллов кварца // Проблемы онтогенеза минералов. - М.: Наука, 1985. - С.125-128.
135. *Касаткин А.Л., Петров Т.Г., Лукин Ю.О. и др.* О возможности моделирования природных кристаллообразующих процессов на низкотемпературных системах // Минерал, сб. Львов. ун-та. - 1966. - Вып. 3, № 20. - С.345-399.
136. *Клебер В.* Структурные вопросы роста кристаллов // Генезис минеральных индивидов и агрегатов. Онтогенез минералов. - М.: Наука, 1966. - С.24-34.
137. *Кокшаров Н.И.* Лекции по минералогии. - СПб., 1863. - 191 с.
138. *Кокшаров Н.И.* Предмет минералогии, краткая ее история, кристаллы как настоящие индивидуумы неорганической природы // дан. Санкт-Петербургу. минерал, о-ва. Сер.2. - 1876. - 11,4.10. - С.253-372.
139. *Коломыц Э.Г.* Методы кристалломорфологического анализа структуры снега. - М.: Наука, 1977. - 200 с.
140. *Коржинский Д.С.* Очерк метасоматических процессов // Основные проблемы в учении о магматогенных рудных месторождениях. - М.: Изд-во АН СССР, 1953. - С.335-456.
141. *Костерин А.В.* Шлихо-минералогический и шлихо-геохимический методы поисков рудных месторождений. Новосибирск: Наука, 1972. - 124 с.
142. *Костов И.* Минералогия. - М.: Мир, 1971. - 584 с.
143. *Котов К.В., Соболева С.В., Гойло Э.А.* Структурная преемственность при слодообразовании по каолиновым минералам в гидротермальных условиях // Изв. АН СССР. Сер. геол. - 1980. - № 12. - С.68-80.
144. *Кузнецов С.И., Иванов М.В., Ляликова Н.Н.* Введение в геологическую микробиологию. - М.: Изд-во АН СССР, 1962. - 240 с.
145. *Кузнецов С.К.* Морфология, анатомия, дефекты и газово-жидкие включения кристаллов кварца как индикаторы условий хрусталеобразования // Проблемы генет. информации в минералогии. - Сыктывкар, 1980. - С.61-62.
146. *Кузнецов С.К., Юхтанов П.Л.* Морфометрия и генетическая информативность кристаллов кварца // Науч. докл. Коми фил. АН СССР. - 1981. - Вып. 64. - 32 с.
147. *Кулашев Н.Т.* Параллельно-шестоватый гранат с секториальным строением индивидов // Онтогенетические методы изучения минералов. - М.: Наука, 1970. - С.147-154.
148. *Лазаренко Е.К.* Основы генетической минералогии. - Львов: Изд-во Львов, ун-та, 1963. - 412 с.
149. *Лазаренко Е.К.* Успехи минералогии в СССР за 50 лет Советской власти // Зап. Всесоюз. минерал, о-ва. - 1967. - Вып. 5. - С.503-513.
150. *Лазаренко Е.К.* Опыт генетической классификации минералов. - Киев: Наук, думка, 1979. - 312 с.

151. Лазаренко Е.К., Гершойг Ю.Г., Бучинская Н.И. и др. Минералогия Криворожского бассейна. - Киев : Наук. думка, 1977. - 542 с.
152. Лазаренко Е.К., Павлишин В.И., Латыш В.Т., Сорочкин Ю.Г. Минералогия и генезис камерных пегматитов Вольны. - Львов : Изд-во Львов. ун-та, 1973. - 359 с.
153. Лазаренко Е.К., Панов Б.С., Павлишин В.И. Минералогия Донецкого бассейна. - Киев : Наук. думка, 1975. - Ч.2. - 501 с.
154. Лазаренко Е.К., Сливко М.М. Пути развития минералогии // Сов. геология. — 1976. — №4. - С.31-38.
155. Лазаренков В.Г. Исследование индукционных граней в связи с условиями роста кристаллов // Зап. Всесоюз. минерал. о-ва. - 1958. - Вып. 3. - С.459-364.
156. Лебедев В.И. О механизме преобразования кристаллических веществ в процессах эпигенеза - явление дэпитизации // Вестн. Ленингр. ун-та. - 1981. - № 12. - С.21-35.
157. Лебедев Л.М. Метаколлоиды в эндогенных месторождениях. — М. : Наука, 1965. — 312 с.
158. Лебедев Л.М. Современные рудообразующие гидротермы. - М. : Недра, 1975. - 261 с.
159. Леммлейн Г.Г. Порядок выделения силикатов из магматического расплава и энергия их кристаллических решеток // ДАН СССР. - 1936. - № 1. - С.29-31.
160. Леммлейн Г.Г. Морфология и генезис кристаллов. - М. : Наука, 1973. - 325 с.
161. Минеев Д.А., Розенкова Н.И. О зональности кристаллов вишневогорского пироклора // Зап. Всесоюз. минерал. о-ва. — 1962. - Вып. 1. — С.89-93.
162. Набоко СИ. Вулканические эксталяции и продукты их реакций. - М. : Изд-во АН СССР, 1959. - 301 с.
163. Наковник Н.И. К развитию учения о рудном и околорудном метасоматозе // Зап. Всесоюз. минерал. о-ва. - 1972. - Вып.1. - С.97-108.
164. Некрасов И.Я. Фазовые соотношения в оловосодержащих системах. - М. : Наука, 1976. - 361 с.
165. Овчинников Л.Н., Баранов В.Д. Проблема стереометаллогении // Проблемы металлогении и рудогенезиса. — Алма-Ата, 1974. — С.54-71.
166. Овчинников Л.Н., Масалович А.М. Экспериментальное исследование гидротермального рудообразования. - М. : Наука, 1981. - 212 с.
167. Оноприенко В.И. Современная концепция минералогического знания // Докл. АН УССР. Сер. Б. - 1982. - № 6. - С.35-38.
168. Онтогенетические методы изучения минералов / Под ред. А.Г.Жабина. - М. : Наука, 1970. - 224 с.
169. Онтогенетия минералов в практике геологических работ / Под ред. В.И.Поповой. - Свердловск : УНЦ АН СССР, 1984. - 134 с.
170. Онтогенетия пегматитов Урала / Под ред. В.А.Попова и Б.В.Чеснокова. - Свердловск : УНЦ АН СССР, 1980. - 120 с.
171. Островский И.А. Эксперимент в геологии // Природа. - 1973. - № 1. - С.7-8.
172. Павлишин В.И. Типоморфизм кварца, слюды и полевых шпатов в эндогенных образованиях. - Киев : Наук. думка, 1983. - 232 с.
173. Патрис А., Мак-Коннел Дж. Основные черты поведения минералов. - М. : Мир, 1983. - 304 с.
174. Перельман А.И. О методологии и структуре геохимии // Геохимическое изучение гипосферы. - Минск, 1977. - С.198-206.
175. Петровская Н.В. Весьма крупные кристаллы минералов и условия их образования (на примере кристаллов самородного золота) // Минерал. журн. - 1985. - № 2. - С.3-12.
176. Петровский В.А. Рост кристаллов в гетерогенных растворах. - Л. : Наука, 1983. - 144 с.
177. Петровский В.А., Рузов В.П., Ракин В.И. Взаимодействие кристалла и среды // Науч. докл. Коми фил. АН СССР. - 1979. - Вып. 48. - 30 с.
178. Перцев Н.Н. Парагенезисы при последовательном минералообразовании // Очерки физико-химической петрологии. - М. : Наука, 1973. - Т.2. - С.177-187.
179. Пирогов Б.И. Минералогические исследования при изучении технологических свойств руд // Вопросы регион. и генет. минералогии. - Киев : Наук. думка, 1977. - С.36-43.
180. Пирогов Б.И. Онтогенетический метод в познании технологических свойств минералов // Проблемы онтогенетии минералов. - Л. : Наука, 1985. - С.22-30.
181. Платонов АД., Таран М.Н., Балицкий В.С. Природа окраски самоцветов. - М. : Недра, 1984. - 196 с.
182. Поваренных А.С. Некоторые важнейшие проблемы современной минералогии // Зап. Всесоюз. минерал. о-ва. — 1964. — Вып.5. — С.521-536.
183. Поваренных А.С. Важнейшие проблемы современной минералогии // Там же. - 1977. - Вып. 1. - С.6-16.
184. Поваренных А.С., Оноприенко В.И. Минералогия: прошлое, настоящее, будущее. - Киев : Наук. думка, 1985. - 160 с.
185. Поляков В.О., Попов В.А. К онтогенетии ильменского амзонита // Исследования по минералогии и геохимии Урала. - Свердловск, 1978. - С.59-64.
186. Попов В.А. Пути составления кристаллогенетического определителя // Кристаллогенезис и процессы минералообразования, - Л. : Изд-во Ленингр. горн. ин-та, 1976. - С.10-22.
187. Попов В.А. К модели гидротермального процесса на основе онтогенетических наблюдений // Проблемы минералогии Урала. - Свердловск : УНЦ АН СССР, 1976. - С.3-17.
188. Попов В.А. Практическая кристалломорфология минералов. - Свердловск, 1984. - 192 с.
189. Попов В.А. К морфологическому анализу структур минеральных агрегатов // Проблемы онтогенетии минералов. — Л. : Наука, 1985. - С.46-60.
190. Попов В.С. Ликвация в магмах - иллюзия и реальность (обзор иностранной литературы) // Зап. Всесоюз. минерал. о-ва. - 1982. - Вып. 5. - С.614-621.
191. Попова В.А., Попова В.И. Об относительном возрасте зон в метасоматитах // Проблемы минералогии Урала. - Свердловск : УНЦ АН СССР, 1976. - С.97-110.
192. Попова В.И. Синхронизация минералов: состояние вопроса // Там же. - С.23-43.
193. Попова В.И. Методы синхронизации минералов в геолого-минералогических исследованиях : Автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. - Л., 1977. - 28 с.
194. Попова В.И. Зональность и секториаль-

ность состава в кристаллах акцессорного циркона полевых шпатовых жил Ильменских гор по данным нейтронной радиографии // Материалы к минералогии Южного Урала. - Свердловск : УНЦ АН СССР, 1978. - С.77-91.

195. *Попова В.И.* Нейтронная радиография — эффективный метод изучения зональности и секториальности состава кристаллов циркона // Неоднородность минералов и рост кристаллов (Материалы XI съезда ММА). - М. : Наука, 1980. - С.203-206.

196. *Попова В.И., Попов В.А.* О скарнах выполнения полостей // Магматизм и метаморфизм ультраосновных и щелочных пород Урала. - Свердловск : УНЦ АН СССР, 1978. - С.125-238.

197. *Попова В.И., Попов В.А., Поляков В.О., Шербакова Е.П.* Пегматиты Ильменских гор // Науч. докл. УНЦ АН СССР. 1982. - 48 с.

198. *Попова В.И., Чесноков Б.В.* Электролитическое травление крупных кристаллов пирита методом тампона // Геология и полезные ископаемые Урала. — Свердловск, 1971. - С.123-125.

199. *Поспелов Г.Л.* Методологические вопросы и задачи геолого-физико-химического и физико-химического моделирования рудообразующих и магматических процессов // Физика и физико-химия рудообразующих процессов. — Новосибирск : Наука, 1971. - С.3-16.

200. *Поспелов Г.Л.* Парадоксы, геолого-физическая сущность и механизм метасоматоза. - М. : Наука, 1973. - 354 с.

201. *Предисловие* // Генезис минеральных индивидов и агрегатов. Онтогения минералов / Под ред. Д.П.Григорьева. - М. : Наука, 1966. - С.5-6.

202. *Проблемы онтогении минералов* / Под ред. Д.П.Григорьева, В.И.Поповой и В.А.Попова. - Л. : Наука, 1985. - 134 с.

203. *Процессы* реального кристаллообразования. - М. : Наука, 1977. - 235 с.

204. *Путищева Н.В.* Типоморфные особенности акцессорного и рудного апатита по данным кристалломорфологического и стереометрического анализа : Автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. — М., 1985. — 18 с.

205. *Пушкарев Ю.Д.* Актуальные проблемы К-Аг геохронометрии. - Апатиты : Коми фил. АН СССР, 1977. - 54 с.

206. *Пшеничное Ю.Л.* Выявление тонкой структуры кристаллов : Справочник. - М. : Металлургия, 1974. - 528 с.

207. *Ракин В.И., Асхабов А.М., Петровский В.А.* Топографические и теневые методы в исследовании процессов роста кристаллов // Новые науч. методики. Коми фил. АН СССР. — 1983. - Вып.Ю. - 30 с.

208. *Розовский Л.Б.* Введение в теорию геологического подобия и моделирования (применение природных аналогов и количественных критериев подобия в геологии). - М. : Наука, 1969. - 127 с.

209. *Рудашевский Н.С., Касатов Б.К., Цеховальская Д.И.* Рентгеновские, термические и ИК-спектроскопические исследования изоморфного ряда пренит — железистый пренит // Кристаллохимия и структура минералов. - Л. : Наука, 1974. - С.118-124.

210. *Рундквист Д.В.* Вопросы изучения филогенеза месторождений полезных ископаемых // Зап. Всесоюз. минерал. о-ва. - 1968. - Вып. 2. - С.191-209.

211. *Рундквист Д.В.* Дальнейшие пути совершенствования прогнозно-металлогенических исследований // Критерии прогнозной оценки территорий на твердые полезные ископаемые. - Л. : Недра, 1978. - С.602-605.

212. *Рундквист Д.В.* Общие закономерности развития геологических процессов // Минералы, горные породы и месторождения полезных ископаемых в геологической истории: Тез. докл. к VI съезду Всесоюз. минерал. о-ва (Ленинград, 1981). - Л. : Наука, 1981. - С.4-7.

213. *Сазонов В.Н., Бородаевский Н.И.* Генезис текстур и структур метасоматитов березит-лиственитовой формации. - Свердловск : Изд. УНЦ АН СССР, 1980. - 28 с.

214. *Салтыков С.А.* Стереометрическая металлография. - М. : Металлургия, 1976. - 272 с.

215. *Сальников В.Н.* Электромагнитные эффекты в интервале выделения конституционной воды из кристаллической решетки мусковита // Изв. вузов. Сер. физика. - 1977. - № 1. - С.20-27.

216. *Сауков А.А.* Историзм в геохимии // Взаимодействие наук при изучении Земли. — М. : Изд-во АН СССР, 1963. - С.285-309.

217. *Сауков А.А.* Геохимия. - М. : Наука, 1975. - 480 с.

218. *Сергеев В.Н.* О структурном травлении плавиковой кислотой некоторых минералов из класса окислов и силикатов // Зап. Всесоюз. минерал. о-ва. - 1963. - Вып. 1. - С.66-73.

219. *Сергеев В.К., Кузьмин А.М.* Внутреннее строение и генезис минеральных индивидов на примере магнетита // Минерал, сб. Львов. ун-та. - 1966. - Вып.4, № 20. - С.507-512.

220. *Сечевица А.М.* Природа гидротермальных рудообразующих растворов. - М. : Недра, 1976. - 165 с.

221. *Сидоренко А.В.* Вступительное слово на съезде Всесоюзного минералогического общества 18 октября 1976 г. // Зап. Всесоюз. минерал. о-ва. - 1977. - № 2. - С.129-134.

222. *Сидоренко А.В., Лазаренко Е.К.* Состояние и задачи современной минералогии // Там же. - 1972. - Вып. 2. - С.176-189.

223. *Силаев В.И.* Зональность Саурей-Лыкентальбейского рудного узла и прогноз рудности Полярного Урала // Науч. рекомендации - народному хозяйству. Коми фил. АН СССР. 1982. - Вып. 36. - 36 с.

224. *Смирнов А.И., Фридман Н.Г.* Методики изучения вещественного состава фосфоритных руд для технологических целей // Геология, добыча и переработка горно-химического сырья. — М., 1971. - С.17-28. - (Тр. ГИГХС; Вып. 15).

225. *Смит Ф.Дж.* Межзерновые поверхности и рост зерен при метаморфизме // Тр. I Междунар. геохим. конгр. (Москва, 1971). — М. : Наука, 1972. - Т.2, кн.1. - С.136-161.

226. *Соболев В.С., Добрецов Н.Л., Ревердатто В.В. и др.* Проблемы метаморфических фаций и задачи экспериментальных исследований // Тр. VIII совещ. по эксперимент. и технич. минералогии и петрографии. - М. : Наука, 1971. - С.4-15.

227. *Соколова Г.А., Каравайко Г.И.* Физиология и геохимическая деятельность тионовых бактерий. - М. : Наука, 1964. - 333 с.

228. *Стенина Н.Г.* Просвечивающая электронная микроскопия в задачах генетической минералогии. - Новосибирск : Наука, 1985. — 110 с.

229. Степанов В.И. О происхождении так называемых "колломорфных" агрегатов минералов // Онтогенетические методы изучения минералов. - М. : Наука, 1970. - С.198-206.
230. Степанов В.И. О целях и методах при исследовании последовательности кристаллизации в минеральных агрегатах руд // Исследования в области прикладной минералогии и кристаллохимии. - М. : Наука, 1974. - С.3-10.
231. Таран Ю.Н., Мазур В.И. Структура эвтектических сплавов. - М. : Металлургия, 1978. - 312 с.
232. Тугаринов А.И. Геохимическая эволюция Земли // Природа. - 1967. - № 11. - С.46-58.
233. Тугаринов А.И. Эволюция рудообразования в истории Земли // Вести. Моск. ун-та. Сер. геология. - 1977. - № 5. - С.57-66.
234. Уклонский А.С. Задачи минералогии и геохимии // Зап. Узб. отд. Всесоюз. минерал. о-ва. - 1951. - Вып. 2. - С.3-30.
235. Федоровский Н.М. Генетическая минералогия. - М. : Химтехиздат, 1920. - 152 с.
236. Федоровский Н.М. Минералогия. - М.: ОНТИ, 1932. - 456 с.
237. Фекличев В.Г. Микрокристалло-морфологический анализ. - М. : Наука, 1966. - 199 с.
238. Фекличев В.Г. Микрокристалло-морфологические исследования. - М. : Наука, 1970. - 177 с.
239. Фекличев В.Г. Диагностика минералов (теория, методика, автоматизация). - М.: Наука, 1975. - 350 с.
240. Ферсман А.Е. Элементы разграничения двух одновременно кристаллизующихся веществ // ДАН СССР. Сер. А. - 1922. - Декабрь-январь. - С.7-8.
241. Ферсман А.Е. Геохимические и минералогические методы поисков полезных ископаемых // Изб. тр. : В 7 т. - М. : Изд-во АН СССР, 1953. - Т.2. - С.443-768.
242. Ферсман А.Е. Избр. тр. : В 7 т. - М. : Изд-во АН СССР, 1960. - Т.6. - 742 с.
243. Франк-Каменецкий В.А., Котов Н.В. Гойло Э.А. Трансформационные преобразования слоистых силикатов при повышенных Р-Т-параметрах. - Л.: Недра, 1983. - 152 с.
244. Хитаров Н.И. Содержание и задачи современных экспериментальных исследований в области минералообразования // Зап. Всесоюз. минерал. о-ва. - 1957. - Вып. 2. - С.281-293.
245. Хомяков А.Л., Юшкин Н.П. Принцип наследования в кристаллогенезисе // ДАН СССР. - 1981. - № 5. - С.1229-1234.
246. Челищев Н.Ф. Основные направления технологической минералогии // Изв. АН СССР. Сер. геол. - 1977. - № 11. - С.86-94.
247. Черепанов В.А., Шафрановский И.И., Рундквист Д.В. Веха в развитии минералогической науки // Зап. Всесоюз. минерал. о-ва. - 1977. - Вып.3. - С.367-369.
248. Чермак Г. Учебник минералогии. - Спб., 1884. - 379 с.
249. Чернявский К.С. Стереология в металловедении. - М. : Металлургия, 1977. - 280 с.
250. Чесноков Б.В. Относительный возраст минеральных индивидов и агрегатов. - М. : Недра, 1974. - 104 с.
251. Чесноков Б.В. Вторая Всесоюзная школа по онтогении минералов // Зап. Всесоюз. о-ва. - 1982. - Вып. 5. - 627-630.
252. Чухров Ф.В. О состоянии некоторых общих вопросов минералогии // Изв. АН СССР. Сер. геол. - 1967а. - № 7. - С.37-57.
253. Чухров Ф.В. Некоторые итоги изучения генезиса минералов // Проблемы кристаллохимии минералов и эндогенного минералообразования. - Л. : Наука, 1967б. - С.134-144.
254. Чухров Ф.В. Современные проблемы минералогии // Проблемы геологии минеральных месторождений, петрологии и минералогии. - М. : Наука, 1969. - Т.2. - С.181-199.
255. Шанти В. Конституция, свойства и онтогения рудных минералов неокисленных железистых кварцитов докембрия: Автореф. дис.... канд. геол.-минерал. наук. - Киев, 1981. - 30 с.
256. Шафрановский И.И. Кристаллы минералов. 4.1. Плоскогранные формы. - Л. : Изд-во Ленингр. ун-та. 1957. - 200 с.
257. Шафрановский И.М. Лекции по кристалломорфологии минералов. - Львов : Изд-во Львов. ун-та, 1960. - 164 с. (2-е изд.: М. : Высшая школа, 1968. - 174 с.).
258. Шафрановский И.И. Кристаллы минералов. Кривогранные, скелетные и зернистые формы. - М. : Госгеолтехиздат, 1961. - 332 с.
259. Шафрановский И.И. Развитие минералогической кристаллографии за 50 лет Советской власти // Зап. Всесоюз. минерал. о-ва. - 1967. - Вып. 5. - С.514-525.
260. Шафрановский И.И. Очерки по минералогической кристаллографии. - Л. : Недра, 1974. - 152 с.
261. Шафрановский И.И. Динамическая симметрия в кристаллографии, минералогии и органическом мире // Зап. Ленингр. горн. ин-та. - 1974. - 67, вып. 2. - С.174-184.
262. Шафрановский И.М., Григорьев Д.П. О поверхностях соприкосновения кристаллических индивидов // Зап. Всесоюз. минерал. о-ва. - 1948. - Вып. 3. - С.185-193.
263. Шефтель Н.Н. К вопросу о реальном кристаллообразовании // Рост кристаллов. - 1957. - Вып. 1. - С.5-31.
264. Шефтель Н.И. Ритмичность в процессах роста кристаллов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. геология. - 1966. - № 6. - С.28-36.
265. Шубников А.В. Симметрия и физические свойства пирамид роста // Кристаллография. - 1961. - Вып.3. - С.319-322.
266. Щербаков Д.М. Состояние и некоторые задачи советской минералогии // Изв. АН СССР. Сер. геол. - 1953. - № 2. - С.7-19.
267. Электронная микроскопия в минералогии / Под ред. Г.Р.Венка. - М. : Мир, 1979. - 542 с.
268. Эшкин В.Ю. Об источниках минералообразующих компонентов на примере одного из хрусталеносных месторождений Приполярного Урала // Зап. Всесоюз. минерал. о-ва. - 1964. - Вып. 6. - С.672-681.
269. Эшкин В.Ю. Некоторые особенности формирования гнезд с кристаллами кварца // Зап. Ленингр. горн. ин-та. - 1977. - 74, вып.2. - С.97-104.
270. Эшкин В.Ю. Школа по онтогении минералов // Зап. Всесоюз. минерал. о-ва. - 1978. - Вып.4. - С.496-497.
271. Эшкин В.Ю., Корякина Т.А. Принципы анатомического выражения анатомии кристаллов // Зап. Ленингр. горн. ин-та. - 1977. - 24, вып.2. - С.74-79.
272. Эшкин В.Ю., Корякина Т.А., Богдано-

- за Г.Н. Эволюция и типоморфизм кристаллов кварца на одном из хрусталеносных полей Южного Урала // Зап. Всесоюз. минерал. о-ва. - 1975. - Вып. 4. - С.413-421.
273. Юшкин В.Ю., Корякина Т.А., Богданова Г.Н. Эволюция кристаллов кварца и стадийность хрусталообразования // Новые идеи в генетической минералогии. - Л. : Наука, 1983. - :82-87.
274. Юшкин Н.П. Понятие о минерале и таксономические системы минералогии // Тр. Ин-та геологии Коми фил. АН СССР. - 1971. - Вып.15. - С.3-34.
275. Юшкин Н.П. Теория микроблочного роста кристаллов в природных гетерогенных растворах. - Сыктывкар : Изд-во Коми фил. АН СССР, 1971. - 52 с.
276. Юшкин Н.П. Зарождение при участии организмов // Онтогенез минералов. Индивиду / Д.П. Григорьев, А.Г. Жабин. - М. : Наука, 1975. - С.41-45.
277. Юшкин Н.П. Проблемы и методы генетико-информационной минералогии // Зап. Всесоюз. минерал. о-ва. - 1976. - Вып.6. - С.633-647.
278. Юшкин Н.П. Теория и методы минералогии. - Л. : Наука, 1977. - 291 с.
279. Юшкин Н.П. Онтогенез минералов: успехи и перспективы // Минерал. журн. - 1979. - № 1. - С.87-90.
280. Юшкин Н.П. Практическое значение онтогенеза минералов // Зап. Всесоюз. минерал. о-ва. - 1980. - Вып.4. - С.385-395.
281. Юшкин Н.П. Опыт среднемасштабной топоминералогии. Пайхойско-Южновоземельская минералогическая провинция. - Л. : Наука, 1980. - 376 с.
282. Юшкин Н.П. Топоминералогия. - М. : Недра, 1982. - 283 с.
283. Юшкин Н.П. История минералогии и эволюция фундаментальных минералогических идей // Науч. докл. Коми фил. АН СССР. - 1984. - Вып. 102. - 52 с.
284. Юшкин Н.П. Третья практическая школа по онтогенезу минералов // Зап. Всесоюз. минерал. о-ва. - 1985. - Вып.2. - С.254-255.
285. Юшкин Н.П. Генетические методы минералогии и онтогенеза минералов // Проблемы онтогенеза минералов. - Л. : Наука, 1985. - С.3-9.
286. Юшкин Н.П., Волкова Н.В., Куц А.Ф. Флюорит Уральско-Новоземельской провинции и проблемы его использования // Науч. рекомендации - народному хозяйству. Сер. Коми фил. АН СССР. - 1977. - Вып. 12. - 48 с.
287. Юшкин Н.П., Жабин А.Г. Перспективные направления генетической минералогии // Зап. Всесоюз. минерал. о-ва. - 1978. - Вып.5. - С.305-318.
288. Юшкин Н.П., Фишман А.М. О происхождении округлых поверхностей зерен пиропса из алмазоносных кимберлитов // Изв. вузов. Геология и разведка. - 1971. - Вып.3. - С.53-56.
289. Юшкин Н.П., Хомяков А.П., Евзикова Н.З. Принцип наследования в минералогенезе // Науч. докл. Сер. Коми фил. АН СССР. - 1984. - Вып.93. - 32 с.
290. Яхонтова Л.К., Грудев А.П., Андреев П.Н. Минералогические аспекты биотехнологии переработки минерального сырья // Минерал. журн. - 1984. - № 3. - С.109-115.
291. Яхонтова Л.К., Нестерович Л.Г., Любарская Г.А. и др. Разрушение силикатов с помощью бактерий // Минерал. журн. - 1983. - № 2. - С.28-38.
292. Amstutz G.C., Giger H. Stereological methods applied to mineralogy, petrology, mineral deposits and ceramics // J. Microsc. - 1972. - 95, N2. - P.17-29.
293. Becke F. Der Aufbau der Kristall an Wachstumsregeln // Jahrb. Naturwiss. Lotos. - 1894. - Bd. 14. - S.1-18.
294. Beyer H. Biogen e Mineralbildungen - eine Ubersicht // Aufschluss. - 1976. - 27, N 4. - P. 133-138.
295. Durand Marie-Christine. Vers une stereologie des agregats // Univ. Orleans U.E.R. sci. fond et appl. - 1979. - 69 p.
296. Ehrlich R., Vogel T., Weinberg B. et al. Variation in petrogenetic analyses // Bull. Geol. Soc. Amer. - 1972. - 83, N 3. - P.665-676.
297. Ehrlich R., Weinberg B. An exact method for characterization of grain shape // J. Sediment. Petrol. - 1970. - 40, N 1. - P.205-213.
298. Fifth International Congress for Stereology. Proceedings (Salzburg. 3-8 September 1979) // Mikroskopie. - 1980. - P.37-197.
299. Frank-Kamenetskij V.A., Kotov N.V., Goilo E.A. Inheritance of polytypes by structural transformations of layer silicates // Tenth Intern. Congr. of Crystallogr. Collected Abstracts. - Amsterdam, 1975. - P.296.
300. Harris J.W., Vance E.R. Studies of reaction between diamond and heated Kimberlite // Contr. Miner. Petrol. - 1974. - 47, N 4. - P.237-244.
301. James O.B. Crystallization history of lunar feldspathic basalt // U.S. Dep. of the inter. Geol. Surv. Prof. paper. - 1973. - N 841. - 86 p.
302. Kazansky Y.P. Geochemical periodicity in the system of atmospheric water-weatering products // Proc. II Intern. Sympos. of Water-Rock interaction. Sec. 1. - Strasbourg, 1977. - P.160-164.
303. Lelen M., Guyalski T. Synthese de wurtzite par voie bacterienne // Bull. Bur. rech. geol. et mineres. Sec. 11. - 1976. - 44, N 1. - P.57.
304. Pupine I.P. Zircon and Granite Petrology // Contrib. Mineral. Petrol. - 1980. - N73. - P.207-220.
305. Ramdohr P. Die Erzminerale und ihre Verwachsungen. 4. Aufl. - Berlin : Akad. Verlag, 1975. - 1277 s.
306. Riss J., Durand M. Stereological Properties of Polyhedra // Mikroskopie. - 1980. - 37. - P.387-389.
307. Strunz H. Pseudomorphosen - der zeitige Kenntnisstand. Versuch einer Klassifizierung // Aufschluss. - 1982. - 33, N 9. - S.313-342.
308. Thompson R.N. One atmosphere melting behaviour and nomenclature of terrestrial lavas // Contr. Miner. Petrol. - 1973. - 41, N 34. - P.197-204.
309. Tiller W.A. On the Gross-Pollination of Crystallization Ideas between Metallurgy and Geology // Phys. Chem. Minerals. - 1977. - 2, N 1/2. - P.125-151.
310. Trudinger P.A. Experimental Geomicrobiology in Australia // Earth. Sci. Rev. - 1976. - 12, N 2/3. - P.259-278.
311. Walter H. Containerless processing of single crystals in low-g-environment A(AA) AGU Conference on Scientific Experiments of Skylab // Paper N 74-1241. - 1974. - 9 p.
312. Wiedemeier H., Klaessig F.C., Wey S.J. Crystal growth of Gese and GeTe in microgravity environment // Tenth Intern. Congr. Crystallogr. Collected Abstracts. - Amsterdam, 1975. - P.216.
313. Wyllie P.J. Experimental limits for meeting in the earth's crust and upper mantle // Struct. Phys. Propert. Earth's Crust. - Washington : D.C., 1972. - P.279-300.
314. Yushkin N.P., Petrovsky V.A., Yushmanov P.P. The influence of gravitation on crystal growth and form // Tenth Intern. Congr. Crystallogr. Collected Abstracts. - Amsterdam, 1975. - P.216.

ПРЕДИСЛОВИЕ	3		
ГЛАВА I. ГЕНЕТИЧЕСКАЯ МИНЕРАЛОГИЯ И ЕЕ МЕТОДЫ	7		
Структура генетической минералогии	8	Исследование пространственно-временных взаимоотношений в минеральном агрегате	56
Экологическая минералогия	10	Исследование пространственно-временных взаимоотношений в минеральных телах на месторождениях	59
Историческая минералогия	13	Синхронизация и возрастная корреляция пространственно разобщенных минералов	60
Эволюционная минералогия	15	Выделение генераций минералов	62
Геогенетическая минералогия	18	Влияние процессов распада твердых растворов, явлений эпитаксии и синтаксии на пространственно-временные взаимоотношения минералов	63
Методы генетической минералогии	19	О некоторых дополнительных условиях исследования пространственно-временных взаимоотношений минералов	65
Эксперимент в генетической минералогии	22	ГЛАВА VIII. ВОССТАНОВЛЕНИЕ КРИСТАЛЛИЗАЦИОННОЙ ИСТОРИИ МИНЕРАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ	67
ГЛАВА II. ОСНОВЫ ОНТОГЕНИЧЕСКОГО МЕТОДА МИНЕРАЛОГИИ	27	ГЛАВА IX. МИНЕРАЛОГЕНЕТИЧЕСКИЕ РЕКОНСТРУКЦИИ	74
ГЛАВА III. ОНТОГЕНИЧЕСКАЯ ЛАБОРАТОРИЯ	30	ГЛАВА X. ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ОНТОГЕНИЧЕСКОГО МЕТОДА В ИССЛЕДОВАНИИ ПРИРОДНЫХ ОБЪЕКТОВ	83
ГЛАВА IV. СТЕРЕОЛОГИЧЕСКИЕ РЕКОНСТРУКЦИИ (ТЕЛЕСНЫЕ МОДЕЛИ)	36	ГЛАВА XI. РОЛЬ ОНТОГЕНИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ПРАКТИКЕ	98
ГЛАВА V. ИЗУЧЕНИЕ АНАТОМИИ МИНЕРАЛЬНЫХ ИНДИВИДОВ	41	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	107
ГЛАВА VI. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ СОПРИКОСНОВЕНИЯ МЕЖДУ ИНДИВИДАМИ	47	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	111
Первичные поверхности	47	ПРИЛОЖЕНИЕ. ОНТОГЕНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В МИНЕРАЛЬНОМ МИРЕ (атлас)	
Вторичные поверхности	50		
Перекристаллизационные поверхности	51		
ГЛАВА VII. ВЫЯВЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ВЗАИМООТНОШЕНИЙ МЕЖДУ МИНЕРАЛАМИ	52		
Методологические основы построения топологической структуры времени в минеральном объекте	52		
Исследование пространственно-временных взаимоотношений в минеральном индивиде	53		

МОНОГРАФИЯ

*Владимир Иванович Павлишин
Николай Павлович Юшкин
Владимир Анатольевич Попов*

Онтогенический метод
в минералогии

Утверждено к печати ученым советом
Института геохимии и физики минералов
АН УССР

Редактор *С.А.Свердлова*
Обложка художника *Н.И.Казаковой*
Художественный редактор *И.П.Савицкая*
Технический редактор *Л.Н.Муравцева*
Оператор *Т.Н.Шевченко*
Корректоры *М.Е.Ролинская, Н.А.Стрелец*

ИБ №8111

Сдано в набор 23.01.87. Подп. в печ. 14.12.87.
БФ 25713. Формат 70x108/16. Бум. офс. № 2.
Гарн. Пресс Роман. Офс. печ. Усл. печ. л. 14,0.
Усл.кр.-отг. 20,48. Уч.-издл. 12,61 + вкл. 3,33 =
= 15,94. Тираж 820 экз. Заказ № 90, Цена 3 р. 40 к.
Оригинал-макет подготовлен в издательстве "Нау-
кова думка". 252601 Киев 4, ул.Репина, 3.
Киевская книжная типография научной книги.
252004 Киев 4, ул.Репина, 4.

I — VI, LXI, LXIX, Индивиды
 LXX
 VII, VIII, LXIV, LXV, Зональный рост
 LXVII, LXXI и зональность индивидов
 IX — XV, LX Сложные индивиды
 XVI — XXXIV Последовательный
 и синхронный рост
 минералов
 XXXV — XLIV, LXII Минералогические отвесы
 и уровни
 XLV — L Ритмически слоистые
 минеральные тела
 LI — LIX, LXIII, Изменение и разрушение
 LXVI, LXVIII, LXXII, минералов
 LXXIII

ПРИЛОЖЕНИЕ

**ОНТОГЕНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
 В МИНЕРАЛЬНОМ МИРЕ**
(nTInC)



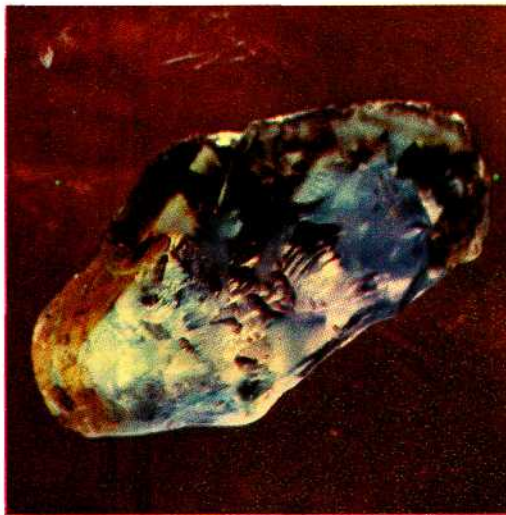


Рис. I. Голубой топаз с фигурами природного травления (камерные пегматиты Волыни)

Рис. II. Топаз. Уникальный кристалл «А. Е. Ферсман» (камерные пегматиты Волыни). Фото Э. С. Дехтулинского

Рис. III. Пирит. Штриховка вырождения $\{100\}$ - $\{210\}$, размер образца 6 см (Березовское месторождение, Урал). Музей кафедры минералогии ЛГУ

Рис. IV. Кристаллы граната с реберными формами, размеры кристаллов 1,5–2 см (р.Виллой, Якутия). Музей ЛГИ



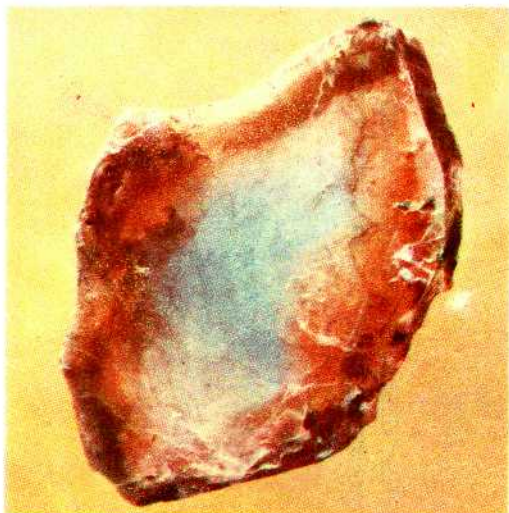


Рис. V. Кристаллы самородной серы с реберными формами (месторождение Щорсу, Узбекистан). Из коллекции Н. П. Юшкина

Рис. VI. Друза скаленоэдрических кристаллов кальцита с «захороненными» нарастаниями мелких кристаллов гематита по ребрам острого ромбоэдра, фиксирующим смену формы кристаллов кальцита, размер образца 7 см (Забайкалье). Музей ЛГИ

Рис. VII. Топаз зонально окрашенный (камерные пегматиты Волыни). Фото Э. С. Дехтулинского

Рис. VIII. Зональный кристалл иризирующего Лабрадора, размер 7 см. Музей кафедры минералогии ЛГУ



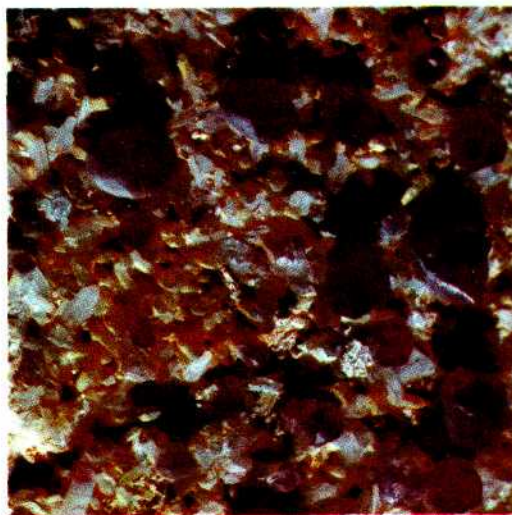


Рис. IX. Скиперовидное нарастание зонального аметиста на зонально-секториальный кристалл цитрина, разрез по L_z , размер образца 8 см (Приполярный Урал). Из коллекции Н. П. Юшкина

Рис. X. Автоэпитаксическое нарастание короткопризматических кристаллов аметиста на более ранний длиннопризматический кристалл горного хрусталя. Белые выделения каолинита на кристаллах указывают на направление силы тяжести — минералогические отвесы (месторождение Ватиха, Урал). Музей ЛГИ

Рис. XI. Скипетровидные кристаллы: автоэпитаксическое нарастание аметиста на головки призматических кристаллов белого кварца. На обращенных вверх гранях есть прищипки мелких кристаллов горного хрусталя, фиксирующие направление силы тяжести, размер образца 10 см (месторождение Липовка, Урал). Музей ЛГИ

Рис. XII. Сложный сросток кристаллов кальцита (Дальний Восток). Фото Н. В. Князевой





Рис. XIII. Друза плоскоромбоздрических кристаллов (папишпат) кальцита (Дальний Восток). Фото Н. В. Князевой

Рис. XIV. Друза кристаллов кальцита, выросших совместно с индивидами пирита (Белореченское месторождение). Из коллекции В. В. Морошкина. Фото Н. В. Князевой

Рис. XV. Сrostки (двойники и тройники прорастания) кристаллов ставролита в метаморфическом сланце (Кольский п-ов). Из коллекции А. Д. Тимченко. Фото Н. В. Князевой

Рис. XVI. Друза совместно выросших кристаллов полевого шпата и мориона (камерные пегматиты Волыни). Фото Э. С. Дехтулинского

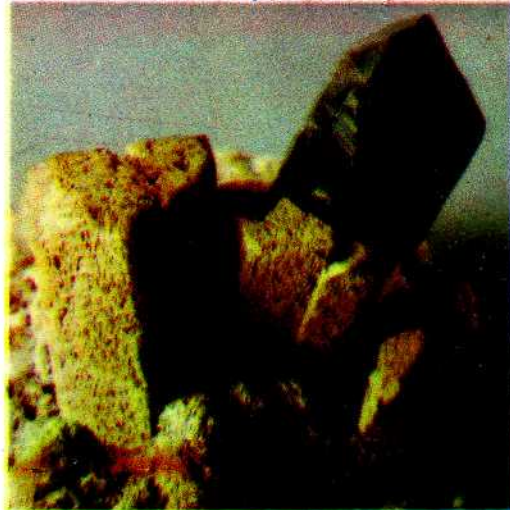
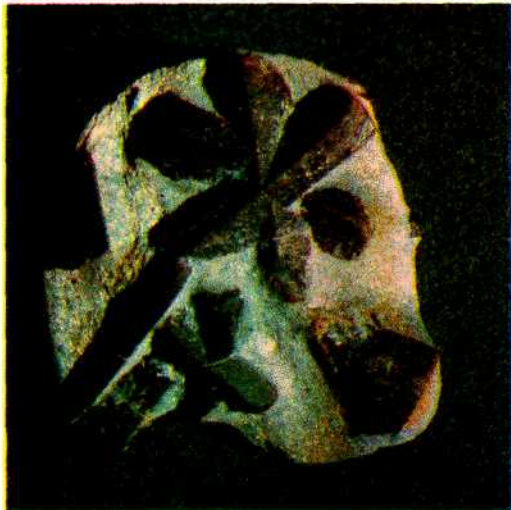


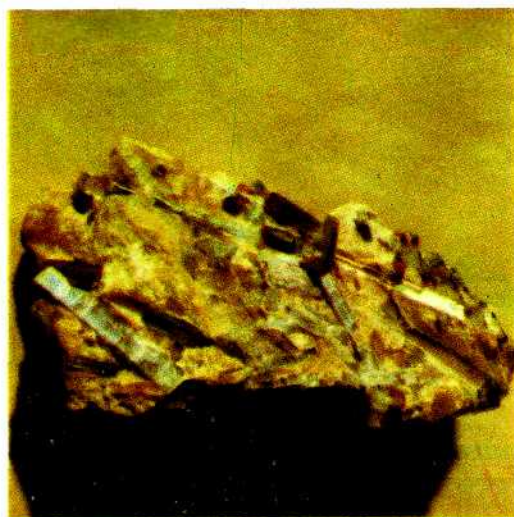


Рис. XVII. Нарастание кубических кристаллов флюорита на более ранние индивиды октаэдрического габитуса. Из коллекции Н. П. Юшкина

Рис. XVIII. Кристаллы кварца в агрегате пластинчатых индивидов альбита (камерные пегматиты Волыни), Фото Э. С. Дехтулинского

Рис. XIX. Друза синхронно выросших кристаллов дистена (голубые) и старолита (коричнево-бурые), размер образца 12 см (Южный Урал). Музей кафедры минералогии ЛГУ

Рис. XX. Друза кристаллов гетита, выросших на обломке кварца (камерные пегматиты Волыни). Фото Э. С. Дехтулинского



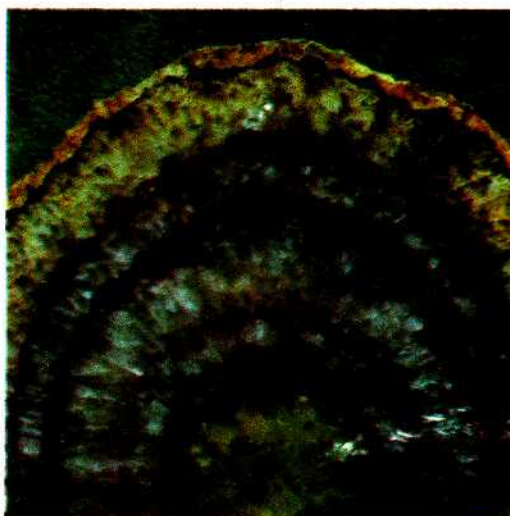
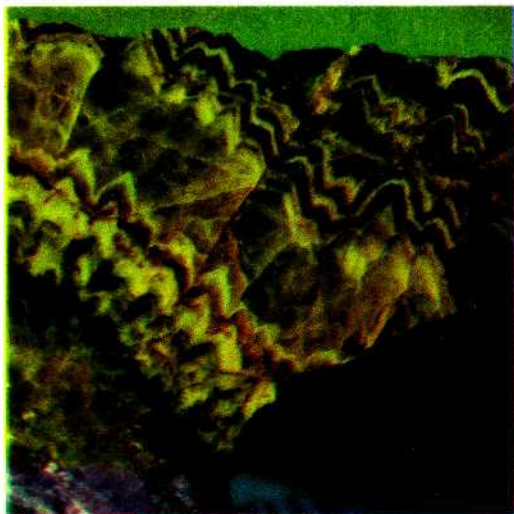


Рис. XXI. Лабрадор с разноцветной иризацией (Украинский щит, Приднестровье). Фото Э. С. Дехтулинского

Рис. XXII. Зональный мономинеральный агрегат: видна зональность окраски в сферолитовом агрегате флюорита, размер образца 13 см. Музей ЛГИ

Рис. XXIII. Зональность окраски в агрегате друзового жильного кварца, размер образца 12 см (месторождение Канжал, Таджикистан). Музей ЛГИ

Рис. XXIV. Зональный полиминеральный агрегат: сферолитовый агрегат с чередованием зон обычного кварца и халцедона и нарастанием аметиста, размер образца 8 см. Музей ЛГИ



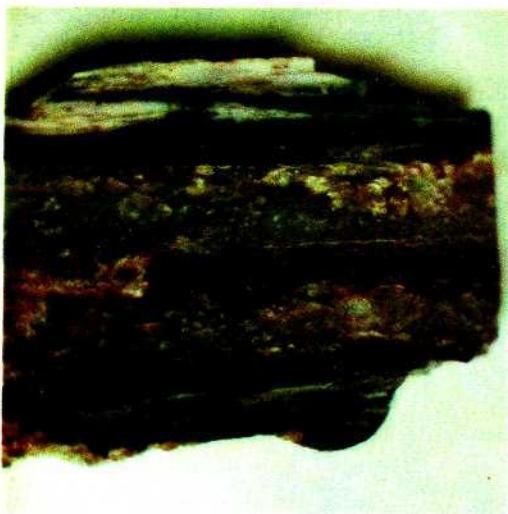
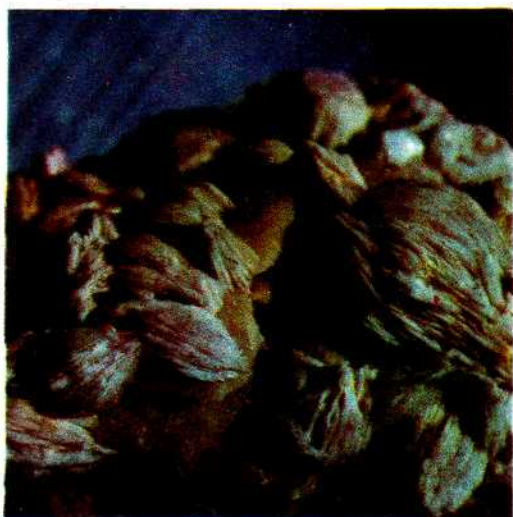


Рис. XXIX. Жильный агрегат чароита, размер образца 10 см (р. Чара, Забайкалье). Из коллекции Н. П. Юшкина

Рис. XXX. Волокнистый агрегат чароита (р. Чара, Забайкалье). Фото Л. Г. Фельдмана и Т. Б. Здорик

Рис. XXXI. Две генерации барита (раннего мелкокристаллического и позднего в виде крупных расщепленных кристаллов) с халькопиритом, размер сфотографированного участка 10 см. Музей ЛГИ

Рис. XXXII. Тонкозернистый полосчатый кварц, отложившийся между двумя генерациями жильного цитрина, размер образца 10 см (Гренада, Испания). Музей ЛГИ



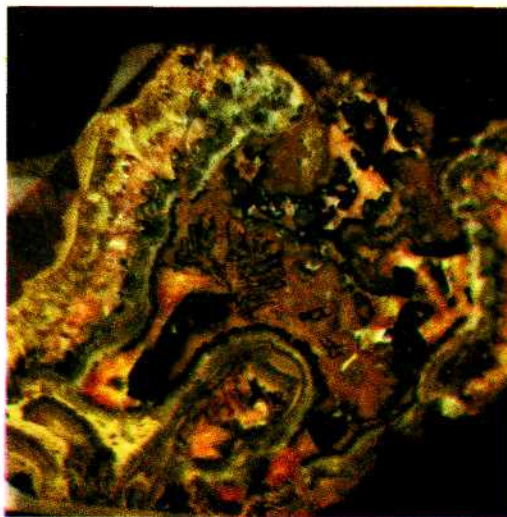


Рис. XXXIII. Гранат-волластонит-геденбергитовый (скарновый) агрегат со сложной онтогенией, размер образца 20 см (Дальнегорское месторождение, Приморье). Из коллекции Н. П. Юшкина

Рис. XXXIV. Сложный крустификационный жильный агрегат: сидерит, розовый анкерит, кальцит, в центре — решетчатые дендриты галенита, обросшие сферокристаллической коркой сфалерита, размер образца 8 см (месторождение Пршибрам, Чехословакия). Из коллекции Ю. М. Дымкова

Рис. XXXV. Конические сталактиты и сталагмиты кальцита (карстовая пещера Новая, хр. Кугитангтау, Памир). Фото В. В. Морошкина и Г. Р. Капусткина

Рис. XXXVI. Сталагмиты гипса (карстовая пещера, хр. Кугитангтау, Памир). Фото В. В. Морошкина





Рис. XXXVII. «Гипсовая люстра» — форма переходная от гравитационной к кристаллитивной, т. е. образуется из очень слабой капли (карстовая пещера, хр. Кугитангтау, Памир). Фото В. В. Морошкина и Г. Н. Капусткина

Рис. XXXVIII. Нарастание мелкокристаллического кальцита на обращенные вверх грани кристаллов флюорита — минералогический отвес, размер образца 10 см. Музей ЛГИ

Рис. XXXIX. Присыпки кристалликов пирита на кальците — минералогический отвес, размер образца 10 см (месторождение Корнуолл, Англия). Музей ЛГИ



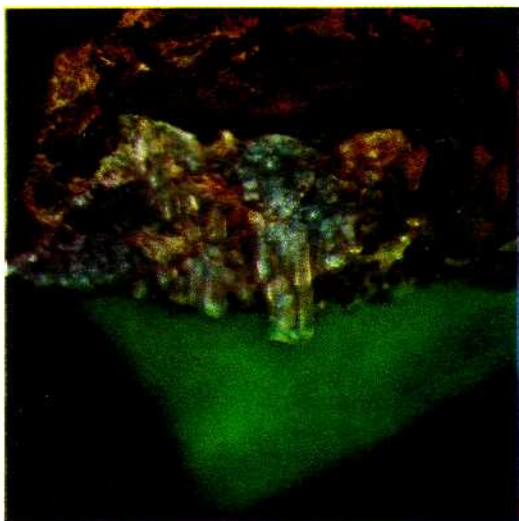


Рис. XL. Сталактиты халцедона — минералогические отвесы, размер образца 8 см (месторождение Пониhi, Чехословакия). Музей ЛГИ

Рис. XLI. Сталактиты малахита — минералогические отвесы, размер образца 12 см (район г. Нижний Тагил, Урал). Музей кафедры минералогии ЛГУ

Рис. XLII. Сталактиты элита (псевдомалахита) — минералогические отвесы, размер образца 10 см. Музей ЛГИ

Рис. XLIII. Геденбергит-воластонитовый агрегат: эффект гравитационного смещения центров сфалерита на краю «карниза», размер образца 15 см (Дальнегорское месторождение, Приморье). Из коллекции Н. П. Юшкина



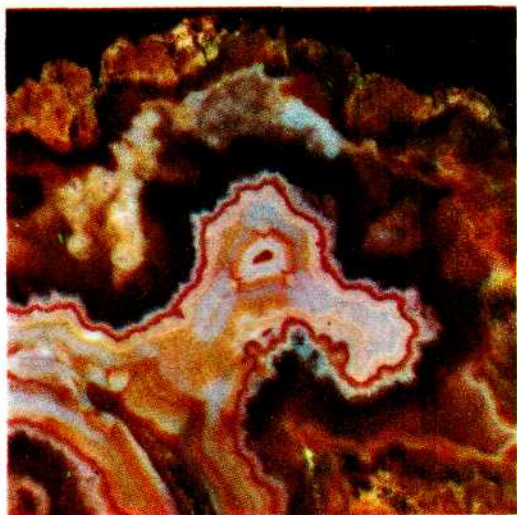


Рис. XLVIII. Фрагмент образца рис. XLVII. Эффект диффузионной самоочистки слоев в местах их острого перегиба

Рис. XLIX. Зональный агрегат мраморного оникса (Приднестровье)

Рис. L. Сердоликовый оникс (Горный Крым)

Рис. LI. Конусы растворения на дымчатом кварце, размер образца 10 см (Приполярный Урал). Музей ЛГИ

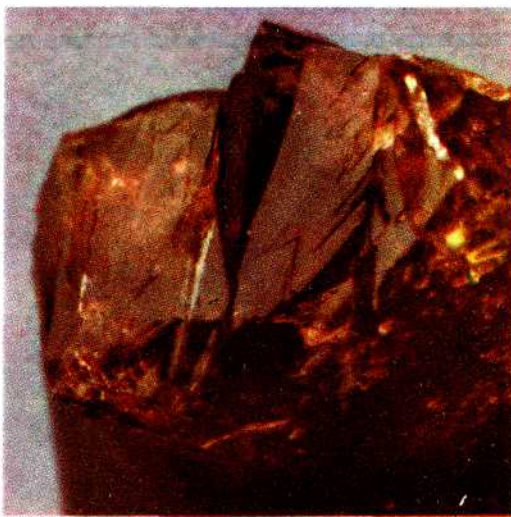
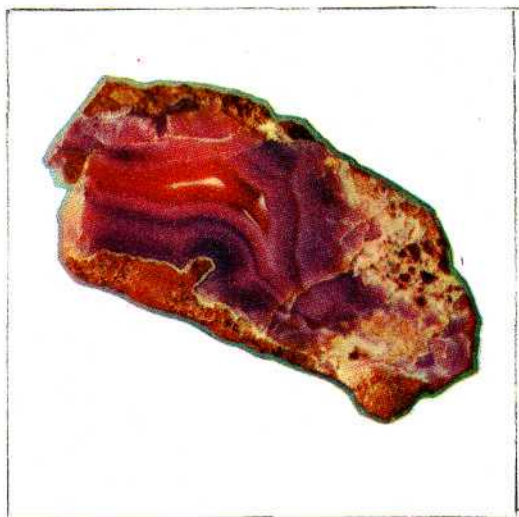


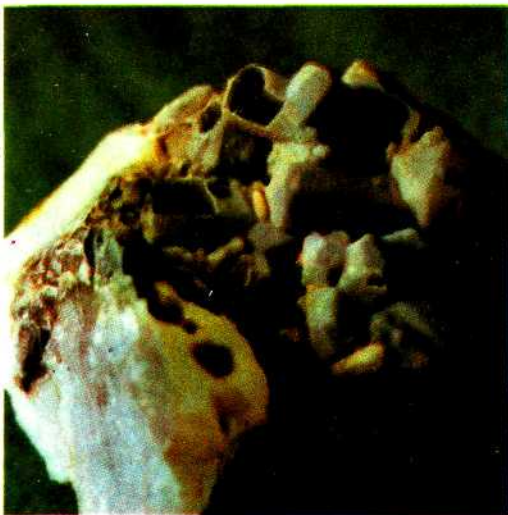


Рис. LII. Псевдоморфоза малахита по халькопириту, размер сростка 10 см (Турьинские рудники, Урал). Музей ЛГИ

Рис. LIII. Псевдоморфное замещение азурита малахитом в окисленной медной руде, размер образца 10 см (Урал). Музей ЛГИ

Рис. LIV. Сложная псевдоморфоза кварца (белая корка) и гетита (черное) по кристаллам кальцита, размер образца 8 см. Музей ЛГИ

Рис. LV. Метасоматический гематит (красное) в кварце и халцедоне, размер образца 13 см (р. Селенга, Забайкалье). Музей ЛГИ



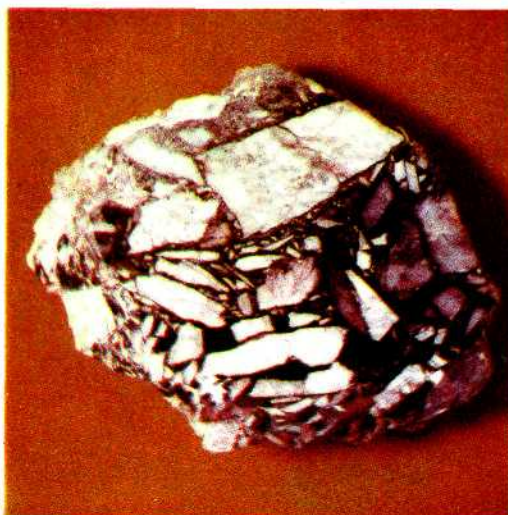
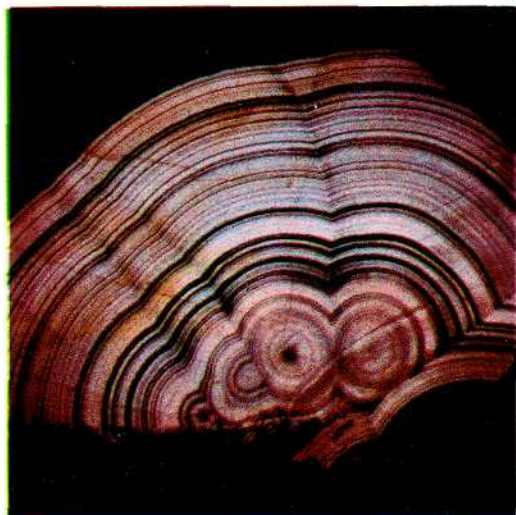


Рис. LVI. Геденбергит-волластонитовый сферолитовый агрегат. Эффект экранизации замещения границами сферолитов (Дальнегорское месторождение, Приморье). Из коллекции Н. П. Юшкина

Рис. LVII. Полевошпатовая брекчия, сцементированная кварцем (камерные пегматиты)

Рис. LVIII. Кристалл берилла, претерпевший интенсивное природное растворение — плоскогранные формы сменились округлыми (камерные пегматиты). Фото Э. С. Дехтулинского

Рис. LIX. Сложная псевдоморфоза минералов волокнистой формы — кошачий глаз (Криворожский бассейн). Из коллекции Б. И. Пирогова. Фото Х. Аркоса

