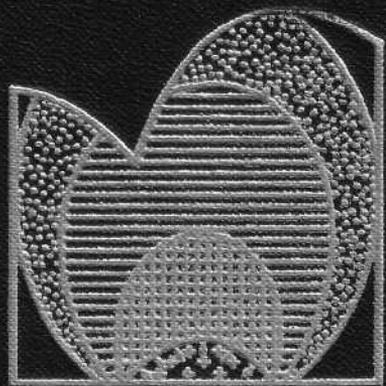


549  
№ 96

ИЛЮСТРИИ



ТОПО—  
МИНЕРАЛОГИЯ

Н. П. ЮШКИН

549  
№ 96

# ТОПОМИНЕРАЛОГИЯ



МОСКВА «НЕДРА» 1982

**Юшкин Н. П.** *Топоминералогия.* М., Недра, 1982.— 288 с. Топоминералогия рассматривается как самостоятельное научное направление современной минералогии, изучающее закономерности формирования и распределения минералов в различных геологических системах. Описаны задачи, общие принципы и методы топоминералогических исследований. Показано их значение для металлогенического анализа, прогнозирования, поисков, разведки и оценки месторождений полезных ископаемых. Изложены методы минералогического картирования и минералогических поисков. Особое внимание уделено анализу минералогических критериев рудоносности.

Для минералогов, геологов, специалистов в области металлогении и геологии рудных месторождений. Может быть полезна студентам геологических вузов.

Табл. 14, ил. 75, список лит.— 69 назв.

Рецензент — д-р геол.-мин. наук *А. Н. Гинзбург* (ВИМС)

**НИКОЛАИ ПАВЛОВИЧ ЮШКИН**

## **ТОПОМИНЕРАЛОГИЯ**

Редактор издательства **А. М. Поспелова**  
Переплет художника **В. А. Сергеева**  
Художественный редактор **Е. Л. Юрковская**  
Технический редактор **Н. Ю. Якунинская**  
Корректор **В. П. Крымова**

ИБ № 4072

Сдано в набор 09.02.82. Подписано в печать 10.05.82. Т-480-1  
Формат 60×90/16. Бумага типографская № 1. Гарнитура «Литературная». Печать высокая. Усл.-печ. л. 18,0. Усл. кр.-отт. 18,0.  
Уч.-изд. л. 19,71. Тираж 2300 экз. Заказ 70/8540-14. Цена 3 р. 50 к.

Оформлен знак Почета издательство «Недра», 103633, Москва, К-12,  
Пресненский проезд, 1/19  
Ленинградская типография № 8 ордена Трудового Красного  
Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга»  
им. Евгения Соколовой Союзполиграфпрома при Государственном  
комитете СССР по делам издательства, полиграфии и книжной  
торговли,  
190000, г. Ленинград, Прачечный переулок, 6.

ПРИНЯТЫЕ  
СОКРАЩЕНИЯ  
МИНЕРАЛОВ

<i>Alm</i> — алмаз	<i>Fl</i> — флюорит
<i>Amph</i> — амфибол	<i>Forst</i> — форстерит
<i>An</i> — анортит	<i>Gal</i> — галенит
<i>Andal</i> — андалузит	<i>Gr</i> — гранат
<i>Antr</i> — антраксолит	<i>Gross</i> — гроссуляр
<i>Antz</i> — анатаз	<i>Hem</i> — гематит
<i>Ax</i> — аксинит	<i>Mikr</i> — микроклин
<i>Bar</i> — барит	<i>Mol</i> — молибденит
<i>Bi</i> — биотит	<i>Mt</i> — магнетит
<i>Bor</i> — борнит	<i>Musc</i> — мусковит
<i>Bou</i> — бурнонит	<i>Pent</i> — пентландит
<i>Calc</i> — кальцит	<i>Px</i> — пироксен
<i>Car</i> — карбонаты	<i>Py</i> — пироп
<i>Chalc</i> — халькопирит	<i>Pyr</i> — пирит
<i>Chlt</i> — хлорит	<i>Pyrr</i> — пирротин
<i>Chs</i> — халькозин	<i>Q</i> — кварц
<i>Cls</i> — целестин	<i>Scap</i> — скаполит
<i>Co</i> — корднерит	<i>Sch</i> — шеелит
<i>Cob</i> — кобальтин	<i>Sill</i> — силлиманит
<i>Cop</i> — медь самородная	<i>Sph</i> — сфалерит
<i>Cs</i> — касситерит	<i>St</i> — ставролит
<i>Cub</i> — кубанит	<i>Sulv</i> — сульванит
<i>Dat</i> — датолит	<i>Tet</i> — тетраэдрит
<i>Diops</i> — диопсид	<i>Tr</i> — троилит
<i>Enst</i> — энстатит	<i>Cois</i> — коизит

В «Основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1981—1985 годы и на период до 1990 года», принятых XXVI съездом КПСС, поставлена задача обеспечить ускоренное развитие работ по геологическому изучению территории страны, увеличению разведанных запасов минерально-сырьевых ресурсов. Для решения этой задачи немаловажное значение имеет дальнейшее расширение топоминералогических исследований.

Предлагаемая книга представляет собой первый обобщающий труд по теории, принципам и методам региональных минералогических исследований, минералогического прогнозирования, поисков и оценки минеральных месторождений.

В основу книг!! положен опыт многолетних исследований автора и его коллег в Средней Азии, на Урале, Европейском Севере, арктических островах, в Приморье, опыт других минералогических коллективов, а также результаты анализа обширной отечественной и мировой литературы. В приложенном к книге списке литературы указаны лишь главнейшие работы.

В книге дан детальный обзор основных этапов развития топоминералогических исследований и проанализировано их современное состояние. На основе теоретического анализа определены основные направления топоминералогических исследований, сформулированы их задачи, обсуждаются структура этих направлений, ведущие методы. Главное внимание уделяется региональным минералогическим исследованиям разного масштаба, методам минералогического картирования, методам минералогического реконструирования и прогнозирования; описываются принципы и методы минералогических поисков.

В монографии автора «Опыт среднемасштабной топоминералогии» [(51)] на примере Панхойско-Южноновоземельской минералогической провинции показана практическая реализация излагаемых здесь принципов и методов топоминералогии.

Идея книги, ее структура, общее содержание или отдельные проблемы обсуждались с В. В. Букановым, А. И. Гинзбургом, Д. П. Григорьевым, Ю. М. Дымковым, Н. З. Евзиковой, Л. Г. Жабиным, В. В. Матисом, Д. А. Минеевым, В. А. к В. И. Поповыми, Д. В. Рундквистом, В. С. Урусовым, В. Г. Фек-

личевым и другими исследователями. Всем минералогам, оказавшим помощь в работе над этой книгой, автор выражает сердечную благодарность.

Автор весьма признателен сотрудникам Лаборатории генетической и экспериментальной минералогии Института геологии Коми филиала АН СССР, в первую очередь А. М. Асхабову, В. Н. Каликову, С. К. Кузнецову, А. Ф. Кунцу, Д. Н. Литошко, Т. П. Майоровой, А. Б. Макееву, Г. А. Марковой, Я. М. Нюсику, Б. А. Остащенко, В. С. Остащенко, В. А. Петровскому, В. М. Полежаеву, Ю. Н. Ромашкину, А. С. Савельеву, В. И. Силаеву, Т. И. Тараниной, В. Д. Тихомировой, В. Н. Филиппову и др., в постоянном творческом контакте с которыми разрабатывались, проверялись и практически реализовывались основные теоретические и методические идеи топоминералогии.

Автор высоко ценит большую работу своих трудолюбивых помощников Л. Н. Божеско, В. А. Сычевой, Г. Л. Мысковой, помогавших в подготовке рукописи к печати.

Главной целью топоминералогических исследований является установление пространственных закономерностей формирования и распределения минералов и минеральных ассоциаций в геологических объектах различного масштаба (в минеральных телах, геологических регионах, земной коре и других планетосферах, в космических объектах и т. п.).

В структуре современной минералогической науки топоминералогия представляет собой одно из важнейших направлений, обеспечивающих наиболее существенный прогресс в накоплении минералогических знаний и в их практической реализации [60, 61].

Ведущая роль топоминералогии определяется рядом обстоятельств. Изучая минералы в их естественной геологической среде, акцентируя внимание на пространственных и временных взаимосвязях минералов, топоминералогия определяет геологическую сущность и геологический смысл минералогической науки, рассматривая ее не просто как физику и химию минералов, а как фундаментальную науку в системе геологических наук. Топоминералогические закономерности составляют научную основу металлогенических построений, прогноза, поисков и оценки месторождений полезных ископаемых, следовательно в топоминералогии наиболее тесно минералогическая наука смыкается с геологической практикой, обуславливая их взаимоотношение и совершенствование. Топоминералогические исследования, давая разнообразные данные о минералах, формируют основную фактурную базу минералогии, на которой разрабатываются все минералогические теории и представления. Именно топоминералогическими исследованиями проверяются основные теоретические положения и испытываются новейшие методические достижения.

Перечисленные обстоятельства достаточно определенно подчеркивают ведущую роль топоминералогии среди других минералогических направлений. Роль эта в полной мере начинает осознаваться только в наше время, хотя с появления первых топоминералогических трактатов прошло более 250 лет. Термин «топоминералогия» используется уже около 175 лет, а с момента, когда А. Е. Ферсман [55] определил основные научно-методические принципы топоминералогии, прошло более 50 лет.

Тем не менее, и это нужно признать, топоминералогия в своем развитии существенно отстает от других минералогических направлений, длительное время находясь в своего рода методическом застое. Дело в том, что в начале и середине этого века внимание минералогов было сосредоточено главным образом на конституционных (химия и особенно физика минералов) и генетических проблемах минералогии, повышенный

интерес к ним стимулировался впечатляющим прогрессом физических и химических наук. В геологию интенсивно внедрялись геофизические и геохимические методы, постоянно совершенствующиеся и достигшие высокой эффективности. Методы же региональной и полевой минералогии развивались лишь в частных направлениях и в целом недалеко ушли от древнего шлихового метода. И сегодня мы с сожалением должны признать, что минералогия еще не предложила своего комплексного минералогического метода прогноза, поисков и оценки месторождений полезных ископаемых, сравнимого по теоретической обоснованности, методической обработке и эффективности с геофизическими и геохимическими методами.

Все это, конечно, не означает, что топоминералогические исследования в настоящее время свернуты. Скорее, наоборот, их объем от года к году возрастает, ежегодно публикуются новые топоминералогические обобщения, совершаются интересные и важные открытия. Речь идет о низкой эффективности, а отсюда и малой популярности этих исследований, связанной в первую очередь с очень слабой разработкой теоретических и методологических основ топоминералогии. Назрела настоятельная необходимость тщательно проанализировать все, что достигнуто топоминералогией почти за трехвековой период ее развития, отобрать наиболее рациональные методические подходы, разработать теоретические принципы топоминералогии, на основе которых можно создать общую ее методологию.

Съезд Всесоюзного минералогического общества (октябрь 1976 г.), детально обсуждавший роль минералогии и сопредельных дисциплин в развитии минерально-сырьевой базы и наметивший генеральные пути развития минералогической науки, поставил задачу поднять роль минералогии как фундаментальной науки в системе геологических наук, особенно в той их группе, которая изучает состав геосферы Земли и других планет, и призвал усилить работу по топоминералогии как одному из главных направлений современной минералогии.

## **ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТОПОМИНЕРАЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Топоминералогические описания занимают в минералогической литературе всех стран ведущее положение. По их объему можно получить общее представление о минералогической изученности того или иного района, а структура и содержание отражают особенности различных методических подходов в топоминералогических исследованиях. Попытаемся на основе анализа главнейших топоминералогических работ проследить основные этапы становления топоминералогии, рассмотреть ее современное состояние и определить современные тенденции развития топоминералогических исследований.

### **РАННЯЯ ИСТОРИЯ ТОПОМИНЕРАЛОГИИ**

Становление топоминералогии как относительно самостоятельного автономного минералогического направления в работах по истории минералогии справедливо связывается с именем А. Е. Ферсмана. В 1922 г. вышла в свет его широко известная книга «Геохимия России» [55], представляющая собой общий топоминералогический очерк нашей страны и, кроме того, включающая две специальные методические главы «Типы топоминералогических исследований» и «Новые задачи топоминералогических исследований». В этой книге главную роль топоминералогических исследований А. Е. Ферсман определил как «.. минералогические описания отдельных областей земной поверхности» [55, с. 5].

Работами А. Е. Ферсмана, на которых мы остановимся ниже, топоминералогия была поставлена на научную основу, зародилась же она значительно раньше. Сам термин «топоминералогия» известен, очевидно, еще с конца XVII—начала XVIII в.; он был, в частности, использован в названии одной из первых сводных топоминералогических работ — трехтомника Г. Леонгарда «Handbuch einen allgemeinen topographisehen Mineralogie» (1805—1809).

Крупные топоминералогические работы, в которых рассматривалась топоминералогия отдельных стран, выходили еще до появления перечисленных выше сводок. Первой топоминералогической работой является, очевидно, двухтомный труд Магниде Бромеля по минералогии Швеции, изданный в 1730 г. и переведенный в 1740 г. Микрандерном на немецкий язык. Скандинавские страны к началу XX в. оказались наиболее изученными в минералогическом отношении по сравнению с другими.

европейскими странами. В Швеции регулярно выходили крупные топоминералогические обобщения различных авторов: Г. Хермелина в 1804 г., В. Хисингера в 1826 г., в 1819—1840 и в 1843 гг., Г. Флинка в 1908—1917 г. и др. Появились топоминералогические описания Норвегии. Топоминералогию Финляндии со второй половины XVIII в. представляли сводки П. Гадда 1788 и 1795 гг., работы Севергина и многих других минералогов. Публиковались и общескандинавские топоминералогические обобщения А. Кронштедта, В. Хисингера.

С середины XVIII в. топоминералогические исследования начинают развиваться и в ряде других европейских стран. Прежде всего во Франции, где широкую известность получили работы А. Лакруа, который обобщив материалы многих исследователей, дал детальную, пятитомную (*Mineralogie de la France et de ses colonies*, 1893—1913) минералогическую характеристику этой страны и ее колоний.

В Испании и Португалии С. Кальдероном в 1910 г. был опубликован двухтомник «Минералогия Испании».

В Италии детальные минералогические исследования были сконцентрированы в отдельных регионах (работы Борха, Г. Гиули, Ф. Замбонини и др.), однако крупных обобщений создано не было. То же можно сказать и о Германии, в отдельных районах которой (Саксонии, Силезии, Гарце и др.) были проведены серьезные топоминералогические исследования, но общий уровень был существенно ниже, чем в Скандинавских странах.

В первой половине XIX в. стали появляться сведения по топографической минералогии Исландии, Гренландии, Швейцарии. С существенным запозданием по сравнению с другими европейскими странами начинают публиковаться работы Р. Джемсона, А. Тука и др. по топоминералогии Великобритании. В то же время минералоги знакомятся по публикациям Т. Трэйлла с первыми данными по топоминералогии Антарктиды. Интенсивно исследуются другие, европейские страны, особенно Австрия. Все эти данные обобщаются в капитальном труде В. Цефаровича «Минералогический лексикон» (1859—1894).

К этому времени относится проведение серьезных топоминералогических работ в странах Азии, Африки, Океании, особенно во французе: их колониях. Наилучшей топоминералогической изученностью отличались Индия благодаря работам Дж. Малле и Япония благодаря исследованиям Вада.

Широкое топоминералогическое изучение Северной и Южной Америки на основе европейского методического опыта, начинается в конце XIX в.

В целом топоминералогическая литература XVIII—XIX вв. весьма обширна. Детальный обзор топоминералогических работ этого («доферсманского») периода с достаточно полными библиографическими списками (более 1200 названий) имеется в «Опыте описательной минералогии» В. И. Вернадского [5].

Поэтому, не останавливаясь более детально на ранней истории топоминералогической изученности разных стран, напомним лишь заключение А. Е. Ферсмана о зарубежной топоминералогической литературе, что «... сколь разнообразными могут быть такие сводки и насколько в них отсутствует какая-либо одна объединяющая идея» [55, с.11].

## ТОПОМИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В РОССИИ

Зарождение русской топоминералогии связано с именем М. В. Ломоносова, составившего довольно отчетливое представление о минералогии России еще из работы над «Минеральным каталогом» Кунсткамеры Академии Наук [25]. Важной особенностью каталога является введение в него сведений о русских местонахождениях минералов.

М. В. Ломоносов начал работать над созданием российской минералогии [25]. В «Известии о сочинении Российской минералогии» (1763 г.) М. В. Ломоносов приводит достаточно четкий план, включающий следующие разделы: «1) вступление о натуральной истории вообще и особливо о минералогии, причем реестр иностранных писателей минералогии с примечаниями; 2) потом следовать имеет сама система, или расположение минеральных тел российских, в сравнении с иностранными обще и особливо; 3) физические изъяснения минералов; 4) признаки руд и рудных мест в России; 5) придается реестр по алфавиту описанных минералов; 6) а для лучшего изображения руд и минералов, кон особливого примечания достойны, представятся они на грьдарованных листах и будут против природы раскрашены» [25, с.636—638].

К созданию минералогии М. В. Ломоносов небезуспешно пытался привлечь широкую общественность, главным образом владельцев рудных заводов со всей России. Более 120 казенных и частных горных заводов прислали М. В. Ломоносову образцы горных пород и руд, но работа над ними была прервана смертью М. В. Ломоносова.

Большой материал для топоминералогического описания России предоставили экспедиционные исследования целой плеяды натуралистов второй половины XVIII в: И. Лемана, Э. Лаксмана, С. П. Крашенинникова, П. Рычкова, И. Гмелина, С. Гмелина, П. Палласа, И. Георги, И. И. Лепехина и др. Развитие минералогии в этот период глубоко проанализировано Л. В. Немиловой в ее труде «Русская минералогия от Ломоносова до Севергина» (Ленинград, 1946). Хранитель геологической части Кунсткамеры академик Иоганн Готтлиб Георги пытался обобщить топоминералогические данные в 1798 г. в сводке «*Physikalische Beschreibung des Russischen Reiches*», содержащей перечень географических пунктов и названий минералов и далекой от задуманной М. В. Ломоносовым.

Идею М. В. Ломоносова осуществил В. М. Севергин, известный революционными достижениями во всех областях русской минералогии. В 1809 г. он издал двухтомный «Опыт минералогического землеописания Государства Российского» [46]. В. М. Севергин ставил задачу обобщить все известные данные по минералогии России, «..привести их в такой систематический порядок, по коему бы, так сказать, единым взглядом обозреть можно было все то, что доселе в разных странах империи Российской открыто было» [46, с.III]. В книге рассматриваются некоторые принципы топоминералогии, или минералогического землеописания (в терминологии В. М. Севергина), а также приводится первое минералогическое районирование территории России.

Предмет топоминералогии В. М. Севергиным определяется строго и четко: «Минералогическое землеописание есть часть общей минералогии, которая показывает месторождение минералов с сопровождающими их обстоятельствами» [47, с. 3]. Важно подчеркнуть ту особенность труда В. М. Севергина, что он «. . . не малой частью основывается на собственных наблюдениях, либо на месте, либо по доставляемым штуфам» [46, с.IV] придает многим содержащимся в нем топоминералогическим сведениям определенную надежность, которой отличаются далеко не все научные труды того времени. Выход в свет этой работы особенно подчеркнул значительные успехи русской минералогии на рубеже XVIII—XIX вв. Подобными топоминералогическими обобщениями не обладали в то время даже многие высокоразвитые страны.

Следующим крупным событием отечественной минералогии было создание в 1852—1891 гг. 11-томного труда Н. И. Кокшарова «Материалы для минералогии России».

В них содержится колоссальный материал: характеристика 320 минералов, в числе которых впервые открытые в России минералы, новые разновидности, новые минеральные виды. В указателях к «Материалам...» перечисляется более 400 минералов. Этот труд Н. И. Кокшарова поражает не столько фундаментальностью и широтой охвата, сколько детальностью и высокой точностью приводимых в нем кристаллографических и минералогических данных. Благодаря этому труду, широко распространившемуся по разным странам, российская минералогия получила мировую известность.

К этому же времени относится подготовка топоминералогической сводки Д. Планера, законченной в 1868 г., но оставшейся, к сожалению, в рукописи. Сводка эта содержит данные о каждом минерале с краткой характеристикой свойств и детальным перечислением всех его месторождений в России, подробной библиографией. А. Е. Ферсман давал высокую оценку этой работе и использовал ее при составлении своей «Геохимии России»: «Должен сказать, что эта добросовестная и кропотли-

вая работа и поныне сохранила свое значение и в значительной степени помогла мне при справках в настоящей работе» [55, с. 14].

Работы Н. И. Кокшарова, а затем П. В. Еремеева, развивших идеи М. В. Ломоносова и В. М. Севергина, положили начало русской описательной кристаллографо-минералогической школе, объединившейся вокруг учрежденного в 1817 г. Минералогического общества и обеспечившей глубокое минералогическое изучение России. Одна за одной выходили в свет работы, раскрывающие минералогию отдельных регионов России, подобные трудам А. Иванова по минералогии Подмоскovie или П. Пилипенко — по минералогии Алтая и др.

Все, что было известно по минералогии Россия к началу XX в., пытался обобщить В. И. Вернадский в «Опыте описательной минералогии» [5]. По широте охвата материалов это, пожалуй, наиболее фундаментальная топоминералогическая работа доферсмановского периода, к сожалению не доведенная до конца. Приводимые в ней данные о распространении в России самородных элементов и сульфидов представляют серьезный интерес и сегодня.

Таким образом, топоминералогические исследования в России непрерывно и весьма интенсивно развивались с первой половины XVIII в., и русская минералогия занимала в этом направлении передовые позиции, не уступая высокоразвитым европейским странам.

## **СТАНОВЛЕНИЕ НАУЧНОЙ ТОПОМИНЕРАЛОГИИ**

Научные основы топоминералогии создавались с момента ее зарождения. В приводимых выше высказываниях В. М. Севергина, Н. И. Кокшарова и других минералогов отражаются поиски строгих принципов топоминералогических исследований. Однако наиболее серьезные попытки создания теоретических основ топоминералогии начинаются с 20-х годов XX в.

Публикацией уже неоднократно упоминавшейся «Геохимии России» А. Е. Ферсмана был начат новый период топоминералогических исследований не только в отечественной, но и в мировой минералогии. Объясняя общий недостаток предшествовавших топоминералогических трудов тем, что «... в них отсутствует какая-либо одна объединяющая идея» [55, с.11], А. Е. Ферсман видит смысл современной топоминералогии в гармоническом изучении триады минерал — процесс — элемент «... на фоне общих геологических судеб Земли» [55, с. 16]. Основное значение придает А. Е. Ферсман химическому элементу, который выступает «... как наиболее постоянная, неизменяемая единица химических превращений», а «... минерал занял лишь временное место в тех постоянных перемещениях химических элементов в земной коре, которые идут вокруг нас»

[55, с. 16]. Исходя из этого А. Е. Ферсман определяет три главные задачи топоминералогии: 1) описание минералов и их свойств; 2) изучение происхождения и образования минералов; 3) выяснение распространения и роли отдельных химических элементов. При этом определяющими являются вторая и третья задачи.

«Минерал перестали рассматривать как самостоятельное тело Земли, он сделался лишь частью космоса, тесными нитями связанной со всею жизнью Земли, ее геологической и космической историей» [55, с. 15]. Вряд ли это положение А. Е. Ферсмана справедливо, так как минерал тем и характерен, что представляет собой естественное тело с особой пространственно регулярной структурой. Он является элементарной системой относительно автономного структурного уровня организации материи — минеральной, специфику которого составляет кристаллическое состояние вещества [60]. Именно оно определяет свойства, законы функционирования и методы исследования минеральных систем.

Сам минерал должен быть главным объектом любого минералогического исследования, это очевидно. Подход, намеченный А. Е. Ферсманом в 1922 г., относится скорее к специальной (химической) минералогии, чем к минералогии в целом, да и сам А. Е. Ферсман это подчеркивает, говоря: «Я считаю правильным такого рода описания называть х и м и к о - г е о г р а ф и ч е с к и м и, вкладывая в это понятие ту новую постановку идеи минералогических исследований, о которых я выше говорил» [55, с. 19]. Следовательно, все рассмотренные выше методические изыскания А. Е. Ферсмана относятся не ко всей топоминералогии, а лишь к одному ее геохимическому направлению. Впрочем А. Е. Ферсман в полной мере использовал этот геохимический принцип только в "Геохимии России", являющейся, строго говоря, топогеохимической работой, а не топоминералогической. А уже в выходящих под его редакцией томах «Минералы СССР» [35], основным объектом описания является минерал. То же относится и к более узкорегionalным исследованиям [34, 42]. Для создания научных основ топоминералогии исключительно большое значение имело интенсивное развитие региональной металлогении, цель которой состоит в выявлении закономерностей пространственного размещения рудоносных площадей и рудных месторождений и в установлении времени формирования рудной минерализации в пределах отдельных регионов [39]. Если задачу металлогении выразить словами ее основоположника Делоне, высказанными в знаменитом «Трактате о металлогении» в 1913 г., «почему руда там, где она есть?», то задача топоминералогии может быть определена так: «какие минералы (независимо рудные или нерудные) встречаются в данном регионе, какие закономерности определяют их распределение в пространстве, какие причины лежат в основе

этих закономерностей?». Следовательно, металлогеническая задача лишь частный случай задачи топоминералогической. Поэтому топоминералогия успешно заимствует методический аппарат региональной металлогении.

В Советском Союзе металлогенические исследования начали развиваться с 20-х годов, быстро завоевали популярность, охватили огромные и разнообразные регионы. Советская школа металлогенистов быстро заняла ведущее положение. Наиболее крупный вклад в теорию и практику металлогении внесли Е. С. Федоров, В. А. Обручев, К. И. Богданович, А. Е. Ферсман, А. Н. Заварицкий, М. А. Усов, С. С. Смирнов, А. К. Болдырев, П. Ф. Григорьев, Ю. А. Билибин, А. Г. Бетехтин, Д. И. Щербаков, Е. Т. Шаталов, П. М. Татаринев, В. И. Смирнов, А. Д. Щеглов, Д. В. Рундквист и многие другие выдающиеся исследователи.

Наиболее важное, что внесла металлогения в топоминералогию, — это замена географической основы топоминералогических исследований основой геологической и введение дополнительно к пространственным временной координаты. Это не только расширило познавательную роль топоминералогии, но и придало ей новые прогнозные функции. Из металлогении заимствованы общие принципы топоминералогического районирования, методические основы минералогического картирования, методы анализа минералоконтролирующих факторов и др. Это взаимозаимствование не прекращается и сейчас, когда методические аппараты топоминералогии и металлогении более или менее определились. Топоминералогия «овеществляет» металлогению, металлогения «геологизирует» топоминералогию. Очевидно, что потенциальные возможности этого симбиоза реализованы еще далеко не полностью и использование всего методического аппарата металлогении — одна из конструктивных задач топоминералогии.

Исторический анализ топоминералогических работ показывает, что к настоящему времени намечаются основные научные принципы топоминералогии, проверенные исследованиями во многих регионах, но создание общей теории топоминералогии не только не завершено, но находится в самой начальной стадии.

#### МИНЕРАЛОГИЧЕСКАЯ ИЗУЧЕННОСТЬ СССР

Общий объем топоминералогических исследований, проведенных в СССР, очень велик, намного превосходит все другие страны. В то же время минералогическую изученность нашей страны нельзя признать удовлетворительной. Наряду с детально исследованными районами, минералогия которых изучалась и в мелком, и в среднем, и в крупном масштабе, по которым существуют серьезные топоминералогические обобщения в виде

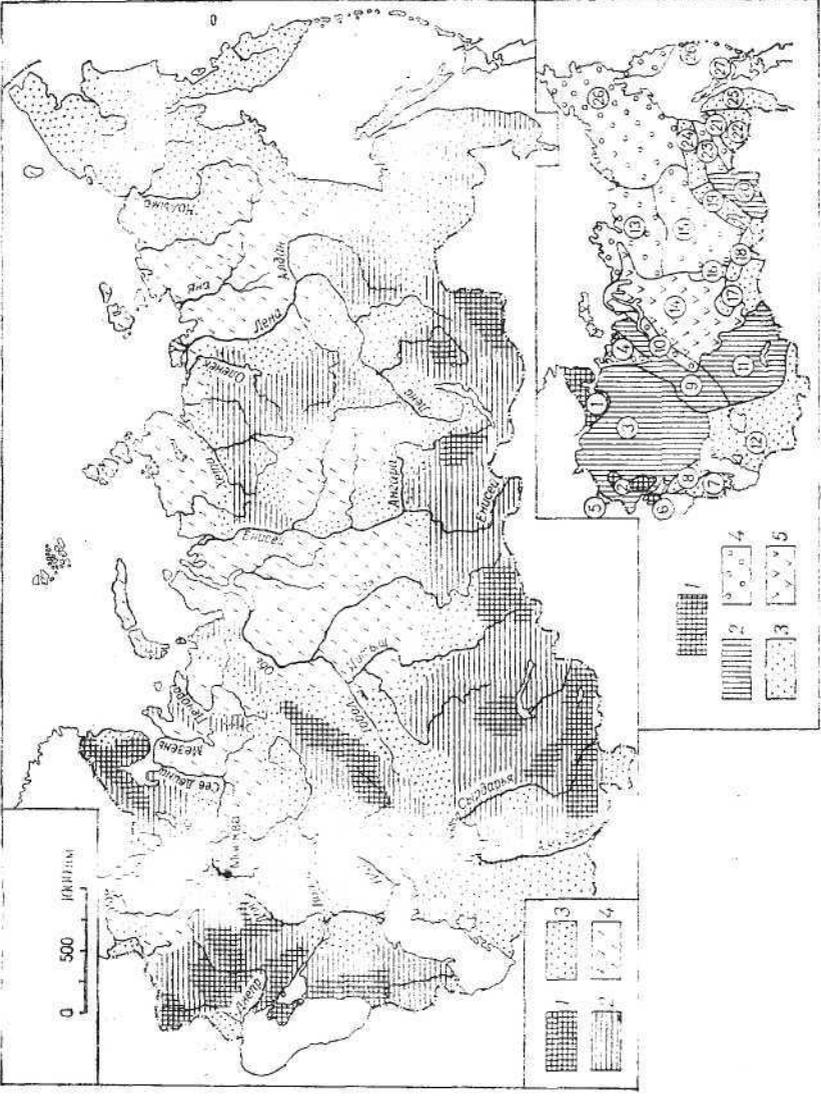
фундаментальных монографий, существуют районы, представляющие в минералогическом отношении сплошные «белые пятна».

Современное состояние минералогической изученности СССР в обобщенном виде показано на рис. 1. На нем представлены две карты изученности. Основная из них составлена на основе экспертных оценок по четырехбалльной шкале, проведенных рядом ведущих минералогов страны; данные отдельных экспертных оценок обобщались и корректировались на основе анализа топоминералогической литературы. Вторая схема, приведенная в виде врезки, характеризует, по данным А. А. Евсевеева (МГРИ), степень минералогической изученности как отражение ряда объективных количественных показателей (число публикаций по минералогии, количество минералогических образцов в фондах и экспозициях музеев, общая геологическая изученность), отнесенных к определенным геологическим регионам, границы которых показаны на карте. Оба подхода дают близкие результаты. Остановимся кратко на минералогической изученности некоторых регионов Советского Союза.

Украинский щит, Карпаты, Донбасс, Крым, т. е. вся территория Украины являются наиболее детально изученным в минералогическом отношении районом страны. Все наиболее интересные объекты, все главнейшие минеральные комплексы изучены с достаточно высокой степенью детальности, по ним опубликованы многочисленные специальные монографии. Топоминералогические данные по отдельным геологическим регионам Украины обобщены в серии весьма обстоятельных сводных трудов, выпускавшихся регулярно под руководством Е. К. Лазаренко. Такие сводки подготовлены и сданы по Закарпатья, Прикарпатья, Волини, Подолии, Донецкому бассейну, Криворожскому бассейну [23. 24. 28. 29. 30]. По детальности они соответствуют мелкомасштабной, а в некоторых случаях среднемасштабной (Донбасс) и даже крупномасштабной (Волинь) топоминералогии. В них весьма детально характеризуются минералы, но, к сожалению, мало внимания уделяется топоминералогическим закономерностям, отсутствуют даже элементы минералогического картирования.

Другой вполне удовлетворительно исследованный район Советского Союза — Алтай, особенно Рудный Алтай. Первой крупной топоминералогической сводкой по этому району является широко известная монография П. П. Пилипенко, более поздней — трехтомник под редакцией Б. И. Вейц [34].

Балтийский щит изучен минералогически относительно плохо, а щелочные массивы, такие как Хибинский, Ловозерский и другие — даже весьма детально. Каждому из них посвящена не одна монография [18, 33, 47 и др.]. Довольно много известно о минералогии пегматитов. Минералогия же гидротермальных



образований, магматических и метаморфических комплексов изучена слабо.

Урал отличается весьма неравномерной минералогической изученностью. Если Средний и Южный Урал можно считать изученными удовлетворительно, то Северный, Приполярный и Полярный Урал исследованы очень слабо. Лучше изучена Пай-хойско-Южноновоземельская минералогическая провинция [61]. Попытки обобщить все достаточно многочисленные данные по минералогии Урала оказывались пока безуспешными.

Удовлетворительно изученным можно считать и Кавказ с Закавказьем, хотя здесь так же, как и на Урале, обобщения отсутствуют.

В Средней Азии уровнем изученности выгодно отличается Узбекистан, благодаря изданию фундаментального четырехтомного труда «Минералы Узбекистана» под редакцией С. Г. Бадалова [36]. Другие среднеазиатские республики и Казахстан изучены также удовлетворительно, хотя здесь нет крупных обобщений.

На Сибирской платформе относительно неплохо известна минералогия траппов, рудных месторождений, некоторых осадочных комплексов.

• Удовлетворительна минералогическая изученность Прибайкалья и Забайкалья, а также южных районов Приморья (Дальний Восток).

Все остальные районы исследованы неудовлетворительно, а арктические острова, прибрежные районы Арктики, Западная Сибирь — весьма неудовлетворительно. Следует отметить, однако, что в настоящее время топоминералогические исследования в этих районах, особенно в Сибири, развертываются довольно широко.

Для топоминералогических исследований в нашей стране все еще сохраняется, очень много неизученных и слабоизученных территорий. Множество интереснейших рудных узлов и месторождений требуют детального минералогического изучения.

---

Рис. 1. Карта геологической изученности СССР. Степень изученности по экспертным оценкам:

/ — вполне удовлетворительная; 2 — удовлетворительная; 3 — неудовлетворительная; 4 — весьма неудовлетворительная

На врезке. Степень минералогической изученности по суммарному показателю, учитывающему число публикаций по минералогии регионов, количество минералогических образцов в экспозициях музеев, уровень общей геологической изученности и другие факторы: / — наилучшая; 2 — хорошая; 3 — средняя; 4 — плохая; 5 — очень плохая. Цифрами в кружках обозначены геолого-географические регионы: 1 — Балтийский щит; 2 — Украинский кристаллический массив; 3 — Русская платформа; 4 — Печорская синеклиза; 5 — **Карпаты**; 6 — Крым; 7 — Кавказ; 8 — Скифская плита; 9 — **Урал**, Тиман, Тургай; 10 — Северное и Среднее Зауралье; 11 — Казахстан и Рудный Алтай; 12 — Средняя Азия; 13 — северная часть Сибирской платформы; 14 — Западно-Сибирская плита; 15 — южная часть Сибирской платформы; 16 — Енисейский кряж; 17 — Алтае-Саянская область; 18 — Восточный Саян и Хамар-Дабан; 19 — Байкальская область; 20 — Забайкалье; 21 — Монголо-Охотская область; 22 — Буреинский массив; 23 — Становая область; 24 — Алданский щит; 25 — Сихотэ-Алинь; 26 — Северо-Восток, Камчатка, Курилы; 27 — Сахалин

Особенно большая работа предстоит по обобщению имеющихся минералогических данных. По СССР нет ни одной минералогической сводки. Начатое А. Е. Ферсманом издание «Минералы СССР» [35] остановилось на первом томе. Нет минералогических обобщений для всемирно известных минералогических провинций, таких как Урал, Сихотэ-Алинь, Памир и др. Повышение уровня минералогической изученности СССР является одной из неотложных задач школы советских минералогов.

#### ТОПОМИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗА РУБЕЖОМ

Топоминералогические исследования с той или иной степенью детальности ведутся в настоящее время почти во всех странах мира. Полный обзор этих работ привести невозможно, поэтому ограничимся примером трех стран — СРР, ЧССР, НРБ.

Минералогическое изучение территории Румынии началось с середины XIX в. Вначале исследования проводились немецкими минералогами, а затем сформировалась достаточно сильная школа румынских минералогов. В 1966 г. вышло крупное обобщение «Топографическая минералогия Румынии» [68]. В этом труде в алфавитном порядке расположены справки о всех минералах, известных в Румынии. В справках даются ссылки на литературу и перечисляются места находок минералов с очень краткой характеристикой их типоморфных особенностей. В конце книги приведен географический указатель со списками минералов, встречающихся в тех или иных географических пунктах; дана обширная библиография. Следовательно, «Топографическая минералогия Румынии» является тщательно выполненной работой кадастрового типа, достаточно полно отражающей минералогическую изученность Румынии по состоянию на 1966 г.

Минералогия территории Чехословакии изучается с очень давних пор, сведения о ней содержатся еще в трудах Г. Агриколы (1494—1555), а минералогическая литература по этой стране весьма обширна. По степени минералогической изученности Чехословакия находится на одном из первых мест в мире. В первую очередь это определяется тем, что за многовековую историю над минералогией Чехословакии работала огромная армия минералогов, причем не только чехословацких, но и немецких, австрийских, французских, русских. Например, одной из лучших книг по специальной топоминералогии Рудных гор является работа Ю. М. Дымкова [12].

По топоминералогии Чехословакии выполнено в разное время большое количество крупных обобщающих работ, получивших мировую известность. Это работы Ф. Реусса (1795—1797 гг.) Ф. Коленати (1854 г.), И. Клвана (1882 г.), Е. Буркарта (1953 г.), И. Кратохвила (1957—1964 гг.), Я. Бернарда и др. (1969 г.) и т. д. Особенно важны две последние работы.

Семитомная «Топографическая минералогия Чехии» [65] — это весьма крупная работа кадастрового типа объемом 2906 с. По своему содержанию она аналогична топоминералогии Д. Радулеску и Р. Дмитреску [68]. В сводке собран весь минералогический материал по Чехии, распределенный по географическому принципу.

Совершенно иной по структуре и содержанию является «Минералогия Чехословакии» [66], написанная коллективом самых известных чехословацких минералогов: Я. Бернард, Ф. Чех, А. Дудек, Д. Ховорка, Р. Кеттнер, М. Кодера, Л. Копецкий, Д. Немец, Й. Секанина, Е. Сланский, Й. Станек и др. В этой книге топоминералогия Чехословакии рассматривается на строгой геологической основе. Классификационной единицей являются крупные, генетически различные минеральные комплексы: магматические, пегматитовые, гидротермальные, метаморфогенные и др. Топоминералогическая конкретность достигается точной географической привязкой комплексов. Основное внимание уделяется минеральным ассоциациям, динамике ч условиям их формирования, типоморфным особенностям минералов. Главнейшие топоминералогические закономерности иллюстрируются десятками специальных минералогических карт и сводной «Минералогической картой Чехословакии» масштаба 1:2500 000. Отличительной особенностью этой работы является максимальная концентрация весьма обширного материала.

Минералогия Болгарии изучена не менее детально, чем минералогия Чехословакии. Однако в отличие от Чехословакии эти успехи достигнуты главным образом в современный период благодаря целеустремленному труду школы болгарских минералогов, созданной и руководимой И. Костовым. Старые работы по минералогии Болгарии были обобщены в 1882 г. Г. Н. Златарским в книге «Руды Болгарии», где содержится характеристика 45 минералов. Г. Бончев в 1922—1923 гг. создал новое топоминералогическое обобщение, приведя данные о 107 минералах. В 1964 г. коллективом минералогов под руководством И. Костова была издана крупная монография «Минералы Болгарии» [67], в которой детально охарактеризовано уже около 350 минералов.

Монография «Минералы Болгарии» состоит из двух частей. В первой части приведена общая топоминералогическая характеристика Болгарии. Дана схема ее минералогического районирования, включающая четыре крупные области (Северно-Болгарская, Старопланинская, Среднегорская, Родопская) с минералогическими районами в каждой из них. Топоминералогические особенности каждого района охарактеризованы довольно детально с приложением средне- и крупномасштабных карт и схем, эволюционных диаграмм минералообразования. Специальная

часть, составляющая основной объем монографии, содержит детальные, хорошо иллюстрированные описания минералов.

После публикации этой книги прошло 15 лет. В минералогической литературе, особенно в журналах Болгарской академии наук «Геология, минералогия и петрология», «Рудообразовательни процеси и минерални находища», «Geologica Balcanica» и др., появился новый огромный материал по минералогии Болгарии, созданный главным образом трудами ученых И. Костова (В. Арнаудов, В. Атанасов, И. Бонев, В. Вергилов, Г. Ескенази, М. Желязкова-Панайотова, И. Иванов, Г. Киров, Б. Кольковский, М. Малеев, И. Минчева-Стефанова, С. Петрусенко, С. Стойнов и многие другие). Сейчас возникла необходимость в новом топоминералогическом обобщении.

Аналогичные топоминералогические исследования ведутся и в других странах. Оценивая топоминералогическую изученность зарубежных стран, нужно включать в число топоминералогических работ и работы металлогенические.

Металлогенические карты во многих странах составляются так, что они являются картами топоминералогическими, например металлогеническая карта ЧССР. Другим примером можно назвать «Металлогеническую карту Вогез и Шварцвальда» масштаба 1:400 000, изданную во Франции и ФРГ в 1975 г. [62]. Основным элементом картирования являются типы минеральных ассоциаций (минеральные формации), причем на карте отражаются морфогенетические типы минеральных тел, представленных этими формациями, и характер вмещающих их минеральных комплексов. Крупномасштабные врезки детализируют топоминералогическую картину наиболее интересных рудных узлов. Принципы составления подобных металлогенических карт необходимо использовать при разработке методов минералогического картирования.

## **СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ТОПОМИНЕРАЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Анализируя современную топоминералогическую литературу с методической точки зрения (в первую очередь отечественную, поскольку именно в ней наиболее резко выражены разнообразие методических подходов и глубина методических поисков); можно выделить несколько установившихся типов топоминералогических исследований, осуществляемых разными школами.

1. *Минералого-геохимические исследования.* Это топоминералогическое направление особенно энергично развивается московской школой, главным образом минералогами Института минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов (ИМГРЭ), являющимися авторами серии капитальных монографий по минералогии и геохимии наиболее интересных регионов Союза. Среди них книги К. А. Власова, М. В. Кузьменко,

Е. М. Еськовой о Ловозерском щелочном массиве, К. А. Владова и Е. И. Кутуковой — об Изумрудных Копях, Е. М. Еськовой, А. Г. Жабина, Г. Н. Мухитдинова — о Вишневых Горах и др. Минералогии Ленинградского государственного университета под руководством А. А. Кухаренко выпустили такой же труд о каледонском комплексе ультраосновных, щелочных пород и карбонатитов Кольского полуострова [7, 14, 18 и др.].

Все такие работы основаны на ферсмановской триаде: минерал—элемент—процесс и построены по четырехчленной схеме: геология региона—минералогия—геохимия—генезис (причем генезис объектов рассматривается почти исключительно в геохимическом аспекте). Собственно минералогическим является описание минералов, дающееся с различной степенью детальности; в целом же подобные исследования имеют геохимическую направленность. Они мало отличаются по своим результатам от специализированных топогеохимических работ.

2. *Специализированные* минералогические исследования. Развиваются наиболее интенсивно львовско-киевской минералогической школой, которая проводит систематическое порайонное изучение Украины.

Такие работы [23, 24, 28, 29, 30, 33, 47 и др.] построены примерно по той же общей схеме, что и минералого-геохимические (только в них отсутствует геохимическая часть), но их главный методический стержень — исследование минералов и минеральных ассоциаций, выявление топоминералогических и минералогических закономерностей. Последние работы украинских минералогов [28, 29, 30] являются наиболее совершенными в методическом отношении, но в них, как уже мы отмечали, к сожалению, упускается исключительно важный компонент—установление топоминералогических закономерностей и топоминералогическое прогнозирование.

В работах этого типа детальному монографическому описанию минералов предшествует обширная геологическая часть с минералогическим районированием, с характеристикой представленных в регионе минеральных комплексов, отличающихся структурной, пространственной и временной обособленностью. Минеральные комплексы рассматриваются и в неразрывном единстве с общей геологической структурой региона. Завершаются работы генетической частью, в которой определяется природа минеральных комплексов на совокупной основе геологических данных и генетической информации, получаемой при исследовании минералов. В лучших работах делается попытка установления топоминералогических закономерностей.

3. *Кадастрово-описательное топоминералогическое направление*, проводящееся с целью дать максимально полный минералогический кадастр региона и максимально детальное описание всех встречающихся в нем минералов [32, 35, 36, 64, 65, 68, 69].

Топоминералогические работы кадастрово-описательного направления по своему содержанию подразделяются на два основных подтипа. В первом из них главный акцент делается на топоминералогическую инвентаризацию всех находок и месторождений различных минералов и их разновидностей [65], во втором — на максимальную детальность описания минералов [32, 35, 67].

Топоминералогическими работами этого типа можно считать и многие опубликованные каталоги минералогических коллекций, которые дают определенные представления о региональной минералогии тех или иных областей. Серьезную роль в познании минералогии России сыграли, например, минеральный каталог Кунсткамеры, переработанный М. В. Ломоносовым [25], каталог музея Горного института и др. Кадастрово-описательные работы — это не только обширные сводки, охватывающие целые страны или крупные регионы. Большую ценность представляют работы такого типа по отдельным рудным полям, узлам и месторождениям.

4. *Парагенетическое направление*, разрабатываемое В. С. Соболевым, базируется на установлении парагенетических типов минералов, характерных для тех или иных минеральных комплексов. Как начальный этап этой рассчитанной на перспективу работы выполнено выделение генетических типов целого ряда минералов: гранатов, хлоритов, эпидотов, пироксенов и др. [19].

5. *Методическое направление*, открывающее новые, наиболее эффективные пути топоминералогических исследований. В этом направлении довольно успешно работает свердловская школа Г. Н. Вертушкова, разрабатывающая и опробующая различные методы минералогического картирования как основы любых региональных минералогических работ. На Урале работы такого типа были начаты Н. В. Петровской [40]; Г. Н. Вертушковым [6] намечены теоретические основы минералогического картирования. Метод успешно применяется при региональных исследованиях кварцевой минерализации [16] и очень полно, творчески и продуктивно применен Б. В. Чесноковым [58] в Березовском рудном районе. Нужно полностью согласиться с пропагандистами этого метода, что без минералогического картирования нет топоминералогии. Разные методы минералогического картирования разрабатываются и другими исследователями [13, 47, 49, 52, 54, 61].

Группа московских минералогов (Б. В. Бродин, Ю. М. Дымков и др.) работает над комплексной методикой крупномасштабных топоминералогических исследований, в основе которых лежит региональный парагенетический анализ. Разрабатываемый методический подход, основы которого опубликованы [4], использован при изучении крупного и сложного Чешского (Богемского) массива. С формированием этого массива связана

комплексная полигенная постмагматическая минерализация, в которой без глубокого минералогического исследования разобраться трудно. Продуктивность парагенетического подхода иллюстрируется, например, очень удачной книгой Ю. М. Дымкова [12].

Кроме рассмотренных выше общих направлений топоминералогических исследований проводятся самые разнообразные специализированные топоминералогические исследования. Они направлены на решение каких-то конкретных минералогических, геологических или экономических задач. К ним относятся, например, разделы металлогении, опирающиеся на данные о минеральном веществе. Большой объем имеют работы, направленные на выявление источников коллекционных минералов. Сюда же включаются путеводители минералогических экскурсий; примером является один из последних путеводителей по Прибайкалью, составленный к XI съезду Международной минералогической ассоциации [32].

Таким образом, проведенный обзор современного состояния топоминералогических исследований свидетельствует о больших объемах проводимых работ, которые отличаются значительным целевым и методическим разнообразием. В этой связи исследователи видят главную задачу в систематизации и упорядочении методического аппарата топоминералогии.

## ГЛАВА II

### ГЛАВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ТОПОМИНЕРАЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Поля охвата современной топоминералогии значительно шире, чем минералогические описания отдельных областей земной поверхности в понятиях В. М. Севергина, А. Е. Ферсмана и многих других минералогов.

*Топоминералогия* в соответствии с буквальным смыслом этого термина (τοπος [топос] — место; *minera* — руда, минерал; λογος [логос] — учение) изучает закономерности формирования и распределения минералов и минеральных ассоциаций в геологических системах различных масштабов и разных структурных уровней. Объектами топоминералогии являются, следовательно, минералы и включающие их топоминералогические системы разных масштабов в их органическом единстве. В качестве топоминералогических объектов могут рассматриваться не только более или менее крупные участки земной поверхности (геологические регионы, административные районы, страны, континенты), но и объемные участки земной коры (минеральные тела, тела горных пород, геологические структуры), земная

кора и другие планетарные оболочки в целом, планеты, планетные системы, другие космические объекты и т. п.

Таким образом, топоминералогия является крупным разделом минералогии, одним из трех (систематика, синминералогия, топоминералогия), изучающих различные аспекты взаимосвязей в естественных множествах минеральных индивидов [60]. Для методического упорядочения топоминералогических исследований и для ориентировки в широком разнообразии топоминералогических объектов необходимо разработать их строгую классификацию, на что до сих пор, к сожалению, обращалось мало внимания.

Рациональная типизация топоминералогических исследований может быть построена на основе объектов исследования. При переходе от наиболее крупных, глобальных объектов к локальным выделяются шесть классов топоминералогических исследований: 1) минералогия космических систем, 2) минералогия планет (Земли), 3) минералогия планетосфер (геосфер), 4) региональная минералогия, 5) минералогия горных пород и минеральных месторождений; 6) специальные топоминералогические исследования.

Краткий обзор современных данных о минералогии всей этой иерархии систем необходим для того, чтобы определить их минералогические особенности и показать специфику методических подходов к их исследованию.

## **МИНЕРАЛОГИЯ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ (КОСМИЧЕСКАЯ МИНЕРАЛОГИЯ)**

Основные положения космической минералогии были наиболее четко и определенно сформулированы Д. П. Григорьевым в 1962 г.

К сожалению, о минералогии космических систем мы знаем пока настолько мало, что можем более или менее предметно говорить только о некоторых из них. Д. П. Григорьев выделяет следующие разделы учения о минералогии космических систем: минералогия планет и астероидов, минералогия метеоритов, минералогия комет, минералогия космической пыли. Это те объекты, о которых можно получать какие-то сведения прямыми минералогическими методами; о минералогии же других объектов и о космической минералогии в целом современные представления формируются лишь на основании косвенных данных.

Средний химический состав космического вещества по одному из последних расчетов (Льюис, 1972 г.), выраженный в числе атомов определенного элемента, приходится на один атом кремния, следующей: H  $2,8 \cdot 10^4$ ; He  $1,8 \cdot 10^3$ ; O 16,6; C 10,0; N 2,4;

Ne 2,1, Mg 0,85; Si 1,00; Fe 0,80; S 0,46; Ar 0,15; Al 0,07; Ca 0,06; Na 0,043; Ni 0,05.

Условия для организации этого вещества в минеральные (кристаллические) формы могут создаваться, например, в протопланетном облаке после его остывания. В этих условиях (температура не выше 150 К, давление 1— $10^{-4}$  Па) существуют три группы космохимических соединений:

1) Г-компонента (газовая компонента) —  $H_2$ , He, Ne (т. е. наиболее летучие вещества);

2) Л-компонента (ледяная компонента) —  $CH_4$ ,  $NH_3$ ,  $H_2O$  (т. е. вещества средней летучести);

3) ТК-компонента (тяжелая компонента) —  $SiO_2$ , MgO, FeO, FeS, Fe, Ni и др. (т. е. нелетучие вещества).

Пылевая составляющая протопланетного облака формируется веществами Л- и ТК-компонент, так что конденсат можно называть ТКЛ-компонентой. Главными минеральными формами в ней являются гидриды и окислы, вероятны силикаты.

В менее холодном состоянии (температура более 150 К) возможен ряд вариантов состава конденсата (по Л- и Г-компонентам), LI —  $CH_4 + NH_3 + H_2O$ ; LII —  $NH_3 + H_2O$ ; LIII —  $H_2O$ ; GI —  $H_2 + He + Ne$ ; GII —  $GI + CH_4$ ; GIII —  $GII + NH_3$ .

Если конденсат представлен только ТК-компонентой, то GIV —  $GIII + H_2O$ .

Минералогическую эволюцию космического вещества в процессе дифференциаций протопланетного облака на систему планет мы рассмотрим ниже. Сейчас же обратим внимание на минералогию того внепланетного космического материала, который удастся исследовать прямыми минералогическими методами. Это космическая пыль и метеориты, поступающие на нашу планету из космического пространства или улавливаемые непосредственно в космосе исследовательскими комплексами.

Минералогия космической пыли. Космическая пыль является обязательным компонентом среды, в которой движутся планеты Солнечной системы и, очевидно, других систем. Концентрация частиц более или менее постоянна и составляет  $10^{22}$  г/см<sup>3</sup>, или одна частица на 10 км<sup>3</sup>, и лишь вблизи метеоритных потоков, являющихся продуктами распада комет, она повышается почти на пять порядков. Предполагается, по данным спектроскопических исследований, что частицы космической пыли имеют ортопироксеновый и оливиновый состав. Обнаружены углеводородные частицы, но минеральные фазы не определены; предполагаются графит, алмаз, кристаллические ароматические углеводороды.

Значительные объемы космической пыли захватываются полем земного тяготения и оседают на Землю. В атмосфере Земли

постоянно присутствует 1—2 млн. т космической пыли, на Землю оседает  $1,27 \cdot 10^7$  т в год (по Э. В. Собоновичу)\*.

Предполагается, что поступающая на Землю космическая пыль представляет собой главным образом остатки протопланетного облака и комет и частично — продукты дробления астероидов.

Удобными объектами для извлечения космической пыли являются донные океанические осадки (особенно красные глины, накапливающиеся с исключительно малой скоростью, около 1 мм за 1000 лет, и поэтому отличающиеся высокой концентрацией космической пыли) и ледники. Интересную информацию дает в последнее время изучение влияния космической пыли на поверхность Луны. Наиболее распространенной формой космического материала на Земле являются шарики размером от долей микрон до миллиметра и даже более. Шарики имеют круглую или удлинненную форму. По составу шарики разделяются на стеклянные, силикатные, металлические, магнетитовые. Часто они имеют сложное строение: магнетитовые шарики включены в стеклянную массу; металлические — кобальт-никель-железные окружены металлической же оболочкой, но с высоким содержанием кремния. В космогенных шариках обнаружены кроме стекла и силикатов магнетит, иоцит, камасит, шрейберзит, треворит, гематит.

Минералогия комет. О минеральном составе комет можно судить по спектроскопическим данным и по составу космической пыли, поступающей на Землю. Ядра комет, в которых значительная часть вещества находится в кристаллическом состоянии, состоят в основном из обычного льда и закристаллизовавшихся (замерзших) летучих соединений, цементирующих силикатные частицы.

Минералогия метеоритов. Метеориты являются одним из наиболее хорошо изученных космических объектов. Им посвящена обширнейшая литература, включающая региональные и международные периодические издания, крупные монографии. Данные о минералогии метеоритов наиболее глубоко проанализированы и полно обсуждены в работах Б. Мэйсона и Е. К. Лазаренко и А. А. Ясинской. К настоящему времени в метеоритах известно около 70 минералов.

Минеральный состав главных типов метеоритов, соотношение которых иллюстрирует диаграмма на рис. 2, а, приведен в табл. 1.

Соотношение минералов в типичном хондрите показано на рис. 2, б.

Наиболее распространенными в метеоритах минералами, составляющими основную их массу, являются оливин (чаще всего

---

\* По другим оценкам (например, по Б. Ю. Левину, А. Н. Симоненко) —  $4 \cdot 10^4$  т в год.

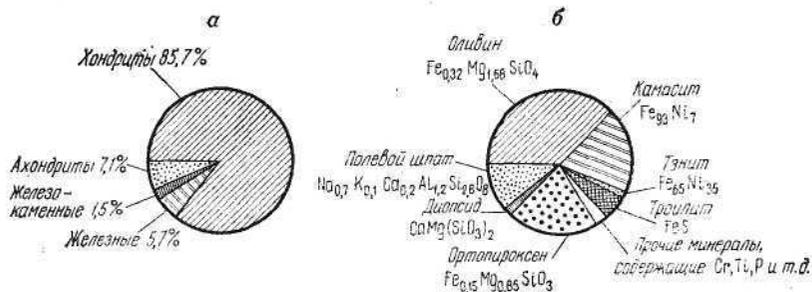


Рис. 2. Соотношение главных типов метеоритов. По данным Дж. Вуда:  
 а — соотношение метеоритов; б — соотношение минералов в типичном хондрите

Таблица 1

Минеральный состав главнейших типов метеоритов.  
 По Б. Мэйсону с уточнениями Е. К. Лазаренко и А. А. Ясинской

Группа метеоритов	Класс метеоритов	Число метеоритов	Главные минералы
Каменные (хондриты)	Энстатитовые	11	Энстатит, никелистое железо
	Оливин-бронзитовые	900	Оливин, бронзит, никелистое железо
	Оливин-гиперстеновые		Оливин, гиперстен, никелистое железо
	Оливин-пижонитовые	12	Оливин, пижонит
	Углистые	31	Серпентин-хлорит, оливин
Каменные (ахондриты)	Обриты	9	Энстатит
	Диогениты	8	Гиперстен
	Шассиньиты	1	Оливин
	Уреилиты	5	Оливин, пижонит, никелистое железо
	Ангриты	1	Авгит
Железокаменные	Наклиты	2	Диопсид, оливин
	Эвклиты и говардиты	39	Пироксен, плагноклаз
	Палласиты	40	Оливин, никелистое железо
	Сидерофиры	1	Ортопироксен, никелистое железо
Железные	Ладраниты	1	Ортопироксен, оливин, никелистое железо
	Мезосидериты	22	Пироксен, плагноклаз, никелистое железо
	Гексаэдриты	55	Камасит
	Октаэдриты	487	Камасит, мэнит
	Атакситы	36	Тэнит

содержащий 10—30% фаялитового компонента), пироксены (энстатит, бронзит, гиперстен, моноклинные пироксены), плагиоклазы (альбит-олигоклаз, битовнит-анортит), серпентин-хлорит. К редким и акцессорным относятся сера, клифтонит, лонсдэлит, когенит, кубанит, валлернит, кристобалит, меррилит, шпинель, гранат, амфибол и др.

Специфической особенностью минерального состава метеоритов является широкая распространенность никелистого железа, весьма редкого на Земле, и очень низкое содержание кварца, доминирующего в земных условиях. Ряд минералов известен лишь в метеоритах и на Земле пока не найден: перрит  $(\text{Ni}, \text{Fe})_5(\text{Si}, \text{P})_2$ , нинингерит  $(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Mn})\text{S}$ , осборнит  $\text{TiN}$ , синойт  $\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$ , юриит  $\text{NaCr}(\text{Si}_2\text{Oe})$  и др. Все метеоритные минералы характеризуются ярко выраженными типоморфными особенностями.

Метеориты представляют собой наиболее примитивные, почти не измененные остатки протопланетного вещества. Слагающие их минералы на миллиарды лет древнее, чем в земных породах. Следовательно, данные о минералогии метеоритов представляют особый интерес для развития космогенетических представлений.

## МИНЕРАЛОГИЯ ПЛАНЕТ И АСТЕРОИДОВ

Минералогии располагают каменным материалом только с планеты Земли и ее спутника Луны, поэтому сравнительная минералогия планет рисуется пока по косвенным данным в самых общих чертах. Отметим самые специфические минералогические особенности ряда планет, сравнивая их по внешним оболочкам.

Земля во внешних ее частях (земная кора) является окисно-силикатной планетой. Силикаты (75%) вместе с окислами (17%) составляют 92 % земной коры по весу. Минералы других классов по степени уменьшения их содержания образуют следующий ряд: хроматы (3,35%), карбонаты (1,70%), сульфиды (1,15%), фосфаты (0,70%), сульфаты (0,50%), фториды и тому подобные соединения (0,50%), самородные элементы (0,50%). Последовательность по числу минералов иная: силикаты, фосфаты, сульфиды, окислы и гидроокислы, сульфаты, фториды и органические соединения, карбонаты, самородные элементы, бораты, вольфраматы и молибдаты, нитраты, хроматы.

Луна. Лунное вещество, доставленное на Землю советскими автоматическими станциями и американскими астронавтами, характеризует минералогии девяти различных геологических регионов и дает довольно хорошее представление о минералогии Луны в целом. К настоящему времени уже накопился очень обширный материал по лунной минералогии, неоднократно обоб-

щавшийся [2]. Лунную минералогию, по имеющимся сейчас данным, представляют около 50 минералов, что по сравнению с земной корой очень мало.

Основную массу лунных пород составляют силикаты, подобно земным ультраосновным и основным породам и метеоритам. Оливины представлены полным рядом. Среди пироксенов не обнаружены щелочные разновидности и составы с  $Fe^{3+}$ ; все разновидности с  $Fe^{2+}$ , Mg, Ca представлены широко; они характеризуются следующими максимальными содержаниями (в %):  $Al_2O_3$  до 9,  $TiO_2$  до 6,  $CrO_3$  до 1,5. Ортопироксены образуют составы от энстатита до гиперстена, встречаются феррогиперстен и зулит, а также алюмоэнстатит.

Второстепенные минералы присутствуют в количестве 5—20 %: ильменит, шпинели, кристобалит, тридимит. Ильменит содержит до 12 % Mg; среди шпинелей преобладают составы  $MgAl_2O_4$ , ряд ульвошпинели представлен полностью. Кристобалит и тридимит представлены как тетрагональной и ромбической, так и кубической и гексагональной модификации.

Акцессорные минералы (камасит, тэнит, троилит, когенит, рутил, апатит и др.) составляют около 5 %.

Очень характерно для лунного вещества стеклообразное состояние.

Основным процессом минералообразования на Луне является кристаллизация расплавов. Твердофазные процессы ограничены. В целом лунная минералогия — пример минералогии планет с примитивным типом эволюции, без участия воды, летучих компонентов, свободного кислорода и живого вещества. Однако существует минералогическая аналогия между лунными породами и земными ультраосновного — основного состава.

Меркурий, судя по спектроскопическим данным, сходен с Луной. Он имеет такую же кору базальтового типа, сформированную в результате интенсивного вулканизма.

Марс, имеющий атмосферу из  $CO_2$ , ледники из кристаллической  $H_2O$  или  $CO_2$  или их смеси и области вечной мерзлоты, характеризуется энергичным действием экзогенных факторов. Это накладывает на его минералогический облик специфический отпечаток. Минералогия Марса, очевидно, ближе к земной, чем к лунной. На поверхности Марса значительным развитием пользуются наряду с силикатами и кремнеземом минералы типа гётита и гематита.

Венера по геолого-минералогическим особенностям относится к планетам земного типа и имеет в общем тот же состав, что и Земля. Однако благодаря мощной и тяжелой атмосфере из  $CO_2$  (97 %),  $NH_3$ ,  $H_2O$ ,  $O_2$ ,  $N_2$ , F,  $SO_2$  на ней можно ожидать специфические комплексы гипергенных минералов.

Юпитер и другие планеты-гиганты существенно отличаются от планет земного типа. Юпитер, например, имеет атмосферу из водорода (82 %) и гелия (17 %) и других летучих

веществ. Под облачным слоем на глубине 1100 км фиксируется слой жидкого водорода, который на глубине 28 000 км при температуре 11000°С и давлении 300 ГПа превращается в металлический. Спутники Юпитера — Ио и Европа сложены силикатным материалом, а Ганимед и Каллисто — каким-то веществом низкой плотности. Внешняя оболочка Сатурна состоит преимущественно из ледяных частиц, а в атмосфере Урана установлен кристаллический аммиак в виде аэрозоля. .

Астероиды — это отдельные глыбы, не захваченные при формировании планет и движущиеся самостоятельно вокруг Солнца в основном между орбитами Марса и Юпитера. Они состоят чаще всего из силикатов (астероид Веста, например, имеет пироксеновый, пижонитовый состав), реже являются железно-никелевыми или силикатно-железо-никелевыми.

Важнейшей задачей космоминералогических исследований является получение надежных данных о минеральном составе различных космических объектов. Сейчас этот процесс находится в самом зачаточном состоянии, и современные данные не дают возможности для глубокого сравнительного анализа. Даже проблемы минералогии Земли как космического тела разработаны очень слабо. По существу, все минералогические исследования, привязанные к геологической среде, направлены на создание общей минералогии Земли. В последние годы начали разрабатываться фрагменты минералогии Луны. Однако и в земной и в лунной минералогии идет главным образом накопление «минералогического инвентаря» (раскрытие минерального состава Земли и описание минералов) и установление лишь частных закономерностей минералообразования и минералораспределения; общие закономерности, особенно эволюционные, остаются пока неясными.

Только сравнительные минералогические исследования космических объектов дадут надежную основу для космогенетических построений. Они откроют новые возможности и для познания закономерностей земного минералообразования и минералораспределения. В космоминералогических исследованиях особенно важно раскрытие типоморфных особенностей и индикаторных признаков минералов, так как сами минералы в этих условиях являются единственными источниками минералогенетической информации.

## **МИНЕРАЛОГИЯ ПЛАНЕТОСФЕР**

Процесс длительного развития планет — это процесс гравитационной дифференциации вещества. Степень дифференцированности определяется длительностью существования той или иной планеты, особенностями планетарной истории, особенностями первичного планетного материала. Следствие дифференциации планетного вещества — концентрически-слоистое

строение планет, состоящих из ряда более или менее контрастных планетосфер. Одной из интересных и наиболее трудных топоминералогических проблем является изучение минералогии планетосфер, особенно геосфер. (в приложении к общей минералогии Земли).

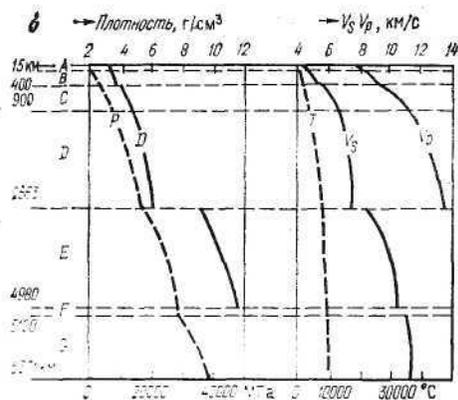
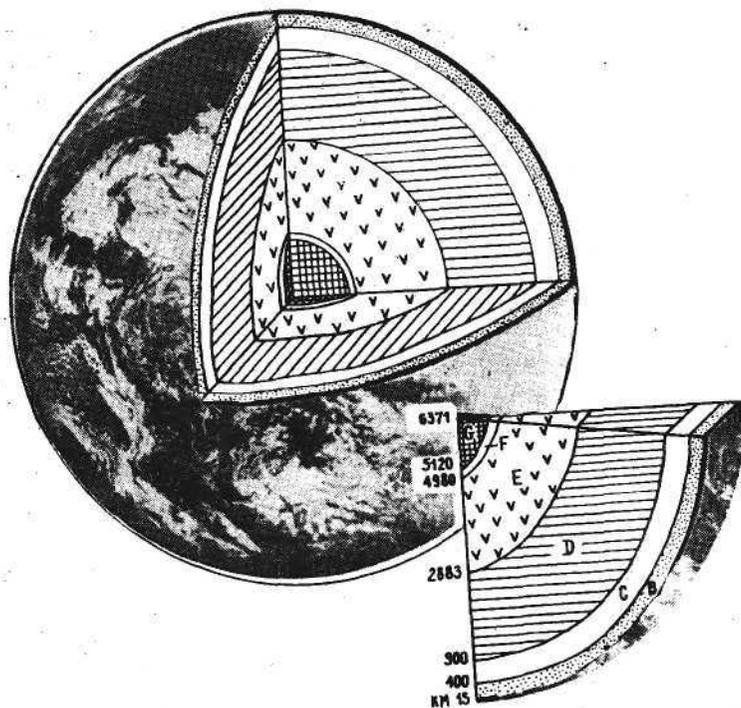
Земля состоит из твердого земного шара, гидросферы и атмосферы. По современным геофизическим данным, твердая Земля отчетливо разделяется на ряд геосфер (рис. 3): земную кору (слой *A* в индексации Буллена), мантию — верхнюю (слой *B*), среднюю (слой *C*), нижнюю (слой *D*), ядро (слои *E*, *F*, *G*). Попытаемся дать самую краткую минералогическую характеристику этих геосфер.

*Минералогия атмосферы* изучена пока еще слабо, хотя представляет большой научный и прикладной интерес. Минералы в атмосфере находятся в тонкодисперсном состоянии и образуют аэрозоль. Концентрация и состав атмосферного аэрозоля неодинаковы как по высоте, так и по площади атмосферной оболочки; кроме того, они динамичны во времени. Главным минералом атмосферы является лед.

В состав атмосферного аэрозоля входят кварц, полевые шпаты, кальцит, хлорит, биотит, мусковит, гидробиотит, гидромусковит, каолинит, монтмориллонит, мельчайшие зерна циркона, апатита, обломки и шарики стекла, железные, железомарганцевые, железо-никелевые шарики и др. Размер частиц от долей микрометра до 1—2 мм. Форма их неправильная, кристаллическая, шарообразная. Над океаном максимальная концентрация минеральных частиц отмечается в главном потоке на высоте 3—4 км. Можно выделить четыре главных источника минеральных частиц в атмосфере: космический, экзогенный (главным образом эоловое выветривание), вулканогенный, техногенный. В современный период резко повышается вклад последнего.

Минеральные частицы, содержащиеся в атмосфере, рассеивают солнечную радиацию, уменьшая интенсивность влияния прямой ее компоненты на земную поверхность, но увеличивая поступление рассеянной. При этом происходит поглощение части солнечной радиации, но переизлучение инфракрасной, что увеличивает парниковый эффект. Минеральные частицы являются центрами конденсации влаги, центрами кристаллизации льда. Действие этих и других эффектов во времени непостоянно вследствие неравномерного поступления минерального вещества и динамичности его концентрации в каждом определенном участке атмосферы. Кроме того, благодаря взаимодействию с веществом атмосферы и другими термодинамически активными примесями, а также в результате действия других факторов сами минеральные частицы могут меняться.

Основными задачами учения о минералогии атмосферы являются: изучение минерального состава атмосферного аэрозоля,



**Рис. 3. Планетосферы Земли:**

*a* — разрез Земли. *A, B, C, D, E, F, G* — планетосферы Земли; *b* — изменение физических свойств земного вещества с глубиной  $V_s, V_p$  — скорости поперечных и продольных сейсмических волн,  $T$  — температура,  $D$  — плотность,  $P$  — давление

изучение типоморфизма минералов, установление закономерностей изменения минерального состава аэрозоля в объеме атмосферы и во времени, установление генетических источников минерального вещества, прогнозирование изменений минерального состава атмосферы и ее свойств.

*Минералогия гидросферы* в общих чертах подобна минералогии атмосферы: минералы в ней находятся во взвешенном состоянии в виде взвесей, суспензий, гидрозолей, гелей или в составе живых организмов, обитающих в водных бассейнах. Источники поступления те же. Состав минеральной компоненты гидросферы соответствует составу приповерхностных частей земной коры.

При изучении минералогии гидросферы решаются те же задачи, что и при изучении минералогии атмосферы, но кроме того исключительно важное значение приобретает, во-первых, исследование взаимодействия минеральных частиц с веществом гидросферы, во-вторых исследование взаимодействия минерального вещества земной коры и гидросферы.

*Минералогия земной коры* (слой *A*), т. е. самой верхней твердой оболочки средней мощностью 33 км, отделенной от нижележащих слоев поверхностью Мохоровичича, изучена наиболее глубоко. Почти все современные минералогические данные относятся к земной коре, спецификой которой, в свою очередь, и является минеральная форма организации вещества [60]. Не останавливаясь, поэтому подробно на минералогии земной коры, мы дадим лишь самую общую ее характеристику, приведя две диаграммы на рис. 4, *a* и *б*, одна из которых характеризует относительное число минералов разных классов в земной коре, а вторая — их содержание. На этих диаграммах отражается главная специфическая черта земной коры — ее окисно-силикатный состав.

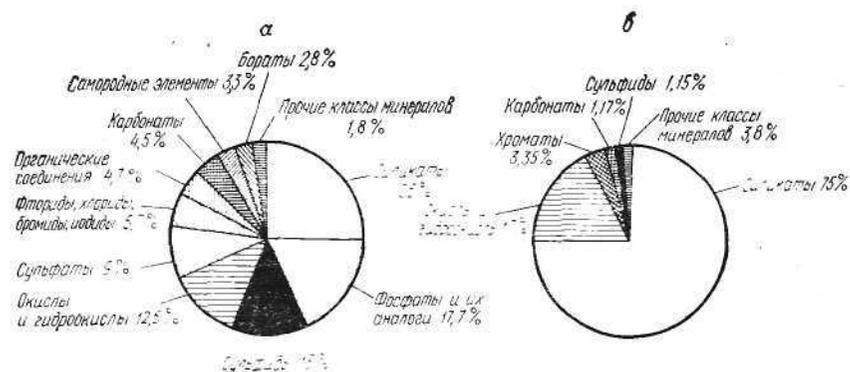


Рис. 4. Соотношение между минералами разных пластов в земной коре:

*a* — по числу минералов; *б* — весовые соотношения

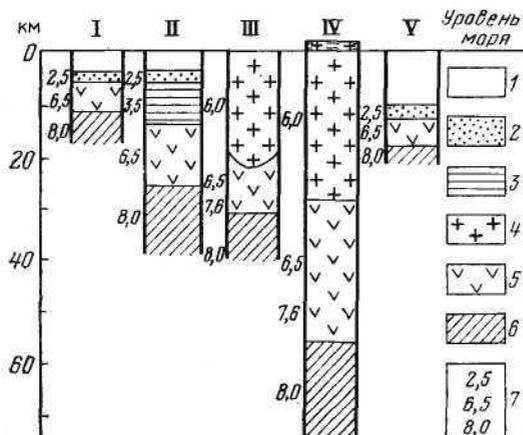


Рис. 5. Минералогический разрез земной коры: I — океаническое дно; II — прогиб; III — платформа; IV — горная область; V — глубоководные впадины

1 — вода; 2, 3 — окисно-карбонатно-силикатная зона (2 — ил; 3 — консолидированные осадки); 4 — кварц-хлорит-слюда и полевшпатовая зоны (кислые породы), 5 — плагиоклазовая, плагиоклаз-пироксеновая и пироксен-оливиновая зоны (основные породы); 6 — оливиновая зона (подкоровые горизонты — ультраосновные породы); 7 — скорости продольных волн, км/с

Земная кора неоднородна по минеральному составу. Общая направленность изменения состава с глубиной иллюстрируется табл. 2 и рис. 5, где дана обобщающая модель вертикальной минералогической зональности земной коры. Тангенциальная неоднородность коры отражается различными типами минералогических колонок для главнейших геоструктурных элементов. В последнее время получены данные о значительной горизонтальной неоднородности коры даже в пределах отдельных мегаструктур и об ее блоковом характере, однако минералогические следствия этой неоднородности пока неясны.

К числу важнейших задач минералогических исследований земной коры наряду с продолжающимся изучением ее минерального состава относится установление наиболее общих про-

странственных минералогических закономерностей.

Минералогия мантии (слои B, C, D) представляется пока по косвенным данным (главным образом по данным физических свойств, рис. 6), а также на основе изучения минералогии мантийных ксенолитов, встречающихся в некоторых

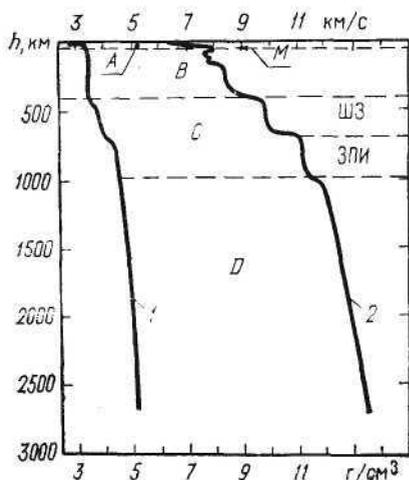


Рис. 6. Геофизический разрез верхней мантии (глубина  $h$ ):

1 — плотность; 2 — скорость продольных сейсмических волн. А — земная кора; М — поверхность Мохоровичича; В — верхняя мантия (оливиновая зона); С — переходная зона (ШЗ — шпинелевая зона; ЗПИ — зона перовскита и ильменита); D — нижняя мантия (перовскитовая зона)

Модель вертикальной минералогической зональности земной коры

Глубина, км	Слой земной коры	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Скорость продольных волн, км/с	Петрографический состав	Минеральный состав (ведущие минералы)	Минеральная зона
3	Осадочный	2,5	2,5—5	Осадочные породы	Кварц, кальцит, доломит, ангидрит, галит, силикаты (преимущественно кластогенные)	Окисно-карбонатно-силикатная
5	То же	2,8	—	Типа зеленых сланцев	Кварц, хлорит, слюды	Кварц-хлорит-сланцевая
10	Гранитный (или гранито-гнейсовый)	2,7	5,5—6,5	Гнейсы (50 %) Граниты (50 %)	Щелочные полевые шпаты, плагиоклазы, кварц, слюды	Полевощпатовая
15	То же	2,8		Граниты (50 %) Породы гранулитового типа (50 %)	Щелочные полевые шпаты, плагиоклаз, кварц, гранат, биотит	Плагиоклазовая
20	"	2,9	6,4—7,3	Породы гранулитового типа и габбро	Плагиоклазы, пироксен, кварц, гранат	Плагиоклаз-пироксеновая
30	Базальтовый (или гранулитно-базальтовый)	3,3	7,4—8,0	Эклогиты и гранулиты	Пироксен, плагиоклазы, оливин	Пироксен-оливиновая
35	Верхняя мантия	3,3	7,8—8,5	Перидотиты	Оливин, пироксены	Оливиновая

глубинных породах, например кимберлитах. В последнее время появляется довольно значительное число работ по минералогии мантии.

Мантия сложена тугоплавкими силикатами, преимущественно магниевыми. А. Рингвудом разработана пиролитовая модель мантии. Пиролит — это гипотетический состав, соответствующий комбинации трех частей альпийского перидотита (80 % оливина и 20 % пироксена) и одной части гавайского базальта. С глубиной в соответствии с изменением давления и температуры определенным образом изменяется фазовый состав пиролита. Химический состав всей толщи мантии по одним моделям считается постоянным, по другим — в нижней части увеличивается отношение Fe: Mg.

Обобщающая модель вертикальной минералогической зональности мантии приведена в табл. 3.

Таблица 3

Модель вертикальной минералогической зональности мантии Земли

Глубина, км	Зона мантии	Минеральные зоны	Главные минералы		
70	Верхняя мантия (зона B)	Оливиновая	Оливин	Пироксен+ +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + +гранат	Гранат
420	Переходная зона (зона C)	Шпинелевая	β-фаза Шпинель	Гранат	
670		Зона перовскита и ильменита	Перовскит+ +(Mg, Fe)O	Ильменит, перовскит	Ильменит?, перовскит?
1000	Нижняя мантия (зона D)	Перовскитовая	Перовскит+ +(Mg, Fe)O	Перовскит	Перовскит
2800					

Предполагается, что в слое B вещество, расплавленное со взвешенными в расплаве кристаллическими частицами, в слоях C и D — кристаллическое.

Минеральный состав верхней мантии по двум моделям представляется следующим (в вес. %):

*Модель Рингвуда*

Оливин (Forst<sub>89</sub>) (Mg, Fe)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> 57

Ортопироксен (Mg, Fe)SiO<sub>3</sub> 17

Клинопироксен (омфацит) (Ca, Mg, Fe)<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>6</sub>—NaAlSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub> 12

Гранат (с высоким содержанием пиропового компонента) (Mg, Fe, Ca)<sub>3</sub>(Al, Cr)<sub>2</sub>Si<sub>3</sub>O<sub>12</sub>

*Модель Мак-Гетгена*

Оливин (Forst<sub>80-92</sub>) 14

Ортопироксен (Enst<sub>88-91</sub>) 70

Клинопироксен (алюмодиопсид) 20

Гранат (Py<sub>65</sub>Alm<sub>25</sub>Gross<sub>12</sub>) 5

Различия, как видно, не очень существенны, если учесть скудость данных по минералогии мантии.

До глубины 70 км пироксеновая компонента модельного состава кристаллизуется главным образом в виде ортопироксенов, сосуществующих ниже 70 км с гранатами. Гранат представляет собой твердый раствор пироба ( $Mg_3Al_2Si_3O_{12}$ ) и  $Mg_3(MgSi)Si_3O_{12}$ ; плотность его выше плотности пироксеновой компоненты на 10 %. Содержание граната с глубиной увеличивается, и с глубины 500 км ортопироксен полностью замещается гранатом, структура которого устойчива до 640 км. На глубинах 640—740 км структура граната трансформируется в структуру ильменита, а с глубин 760 км — в структуру перовскита.

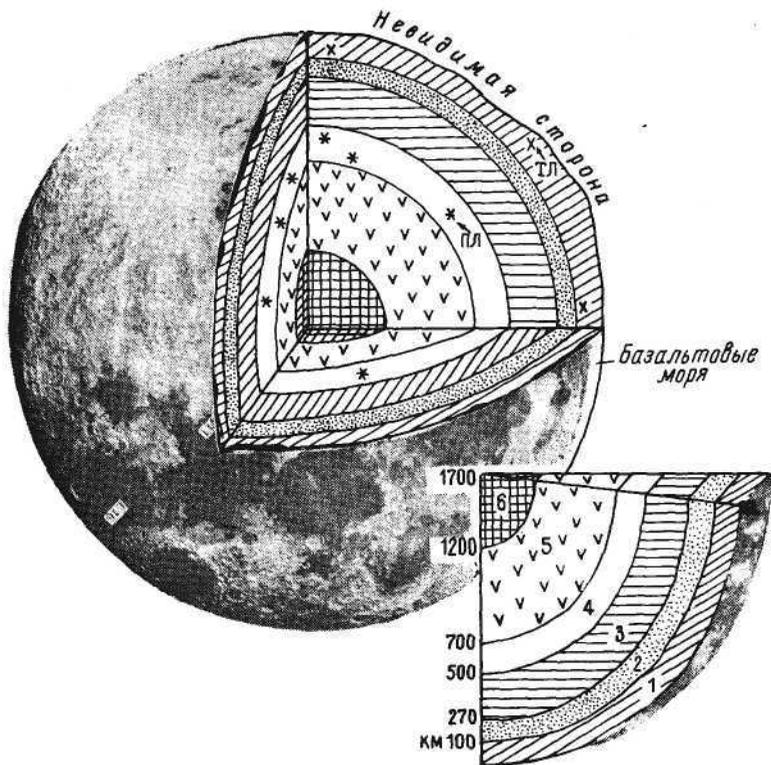
Оливин, преобладающий в пиrolитовом составе мантии (~60 %), на глубине 420 км претерпевает  $\alpha \rightarrow \beta$  или  $\alpha \rightarrow \gamma$ -переход в более плотно (на 7—10 %) упакованную модифицированную шпинель, отражающийся аномальным увеличением сейсмической скорости. Шпинелевая зона прослеживается до глубины 650—670 км. Глубже все минералы находятся в постшпинелевых модификациях, генерируемых по схеме  $\gamma Mg_2SiO_4 \rightarrow MgSiO_3$  (структура перовскита) + MgO.

На глубинах 650—700 км кристаллическая структура кварца переходит в более плотно упакованную структуру стишовита.

В минералогии мантии кроме уточнения ее минерального состава важной проблемой является установление тангенциальных минералогических закономерностей.

О минералогии более глубоких геосфер можно судить лишь приблизительно. Внешнее ядро (слой E) на глубинах 2900—5000 км сложено веществом того же состава, что и нижняя мантия, но находящимся в жидком состоянии. Минералов в нем, очевидно, нет. Промежуточный слой F (5000—5150 км) сложен твердым веществом, в состоянии близком к плавлению. Внутреннее ядро (слой G), слагающее центральную часть Земли, состоит из довольно твердого вещества высокой плотности, находящегося в металлизированном состоянии. Вероятный состав — сплав железа с никелем, по другим моделям  $Fe_2O$ .

Луна имеет сходное с Землей внутреннее строение. На основе проведенных на ней сейсмических экспериментов можно предугадать общий минералогический облик отдельных луносфер (рис. 7). Поверхность Луны покрыта обломочным материалом (реголитом) мощностью около 10 м. Под ним находятся базальтовые покровы мощностью до сотен метров, по составу неоднородные. Ниже находится километровый слой более однородного базальта, а под ним габбро-анортозитовый слой. Мощность коры около 60 км, на невидимой стороне кора более мощная (более 100 км). Кора неоднородна и в тангенциальном направлении. Верхняя мантия имеет мощность 250 км. Вероятный ее состав пироксен-оливиновый. Состав средней мантии (300—800 км) не ясен. В нижней мантии вещество находится в состоя-



**Рис. 7. Планетосферы Луны:**

1 — кора; 2 — верхняя мантия; 3 — средняя мантия; 4 — переходная зона; 5 — астеносфера; 6 — ядро; ПЛ — центры приливных лунотрясений; ТЛ — центры тектонических лунотрясений

нии частичного плавления. Ядро с радиусом несколько сот километров состоит из раствора Fe—FeS в расплавленном или полурасплавленном состоянии.

О планетосферах других планет данные весьма скудны. Планеты земной группы — Меркурий, Венера, Марс имеют много общего с Землей, но в их строении есть и свои особенности.

Меркурий состоит из железного ядра и силикатной оболочки. Ядро, вероятно, расплавлено. Силикатная оболочка состоит из магнезиального оливина, условий для перехода оливина в другие фазы нет.

Венера характеризуется в отличие от Меркурия трехслойным строением: корой мощностью 16 км, силикатной оболочкой до глубины 3324 км, железным ядром. Минеральный состав силикатной оболочки близок к составу мантии Земли.

Марс имеет мощную кору до 100 км, более богатую минералами железа, чем кора Земли, силикатную сферу мощностью

2426 км и железное ядро. В силикатной сфере имеются как оливиновая, так и шпинелевая и перовскитовая зоны.

Другие планеты отличаются от Земли более существенно. Юпитер и Сатурн, как предполагается, например, В. Н. Жарковым и др., имеют двухслойное строение. Ядра, масса которых у Юпитера 3—4 %, у Сатурна 16—28 %, состоят из ТКЛ-вещества. Оболочки состоят только из газовой компоненты Г1 (или ГII, ГIII).

Уран и Нептун так же двухслойные. Состав ядра ТКЛ1 ( $\text{CH}_4 + \text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{TK}$ ), оболочки — Г1 (водородно-гелиевая). Для Плутона из-за ограниченности данных пока невозможно построить даже весьма схематическую модель.

Таким образом минеральная (кристаллическая) форма организации вещества характерна для внешних планетосфер. В этом главная особенность планет Солнечной системы и, очевидно, других систем. В глубинных оболочках представлены либо сверхплотные минеральные модификации, либо вещество находится в особом состоянии, предугадываемом кристаллохимически, но экспериментально пока не воспроизводимом.

Минералогические аспекты слоистого строения планет только намечаются и требуют серьезной проработки. Одной из важнейших задач является изучение минералогических закономерностей во внешних оболочках планет и сравнительный анализ минералогии наружных планетосфер планет Солнечной системы.

Следует отметить, что некоторые эволюционные закономерности выявляются в результате сравнительного минералогического анализа различных космических объектов.

В соответствии с современными представлениями Земля имеет метеоритное происхождение и ее минеральный состав сформировался в результате эволюции вещества хондритов по одной гипотезе или ахондритов — по другой. Можно выстроить такой эволюционный ряд: хондриты (или метеориты в целом) → Луна → Земля. Посмотрим, как изменяются в этом ряду некоторые минералогические показатели.

Минеральные виды в различных космических объектах распределяются по сингониям следующим образом.

Хондриты К—Р—М—Г, ТР—ТЕТ—ТРИК  
Метеориты К—М—Р—Г—ТР, ТРИК—ТЕТ  
Луна М—К—ТЕТ—Р—Г, ТР—ТРИК  
Земля М—Р—К—ТР—ТЕТ—Г—ТРИК

В этих рядах названия сингоний (К — кубическая, Г — гексагональная, ТЕТ — тетрагональная, ТР — тригональная, Р — ромбическая, М — моноклинная, ТРИК — триклинная) выписаны в порядке уменьшения числа входящих в них минеральных видов. Как показывают приведенные данные, минеральный мир в процессе его эволюции на планетарной стадии постепенно

изменяется с наиболее высокосимметричного кубического на наименее симметричный моноклинный; параллельно с этим возникает и гексагональная сингония.

В этом же ряду закономерно повышается кристаллохимическая энтропия  $H$ , т. е. энтропия распределения минералов по классам кристаллохимической классификации ( $H_{КХ}$ ) и энтропия распределения минералов по видам симметрии  $H_{в.с.}$ , в то время как энтропия распределения по сингониям  $H_c$  остается постоянной.

Космические объекты	$H_{КХ}$ (бит)	$H_{в.с.}$ (бит)	$H_c$ (бит)
Хондриты	2,38	3,28	2,6
Метеориты	2,52	3,46	2,6
Луна	2,63	3,42	2,6
Земля	3,45	3,68	2,6

Минеральный мир, следовательно, закономерно усложняет свою структуру, становится более разнообразным.

Строго направленно изменяется в эволюционном ряду средневзвешенная плотность размещения атомов  $P_A$  в минералах, по Фекличеву слагающих космические системы, определяемая по уравнению

$$P_A = \frac{(K_A V_A + K_B V_B + \dots) z}{V_{з.я}}$$

где  $V_{з.я}$  — объем элементарной ячейки;  $z$  — число формульных единиц;  $K_A, K_B$  — количества атомов  $A, B \dots$  в формуле;  $V_A, V_B \dots$  — объем атома в неонизированном состоянии. Плотность размещения атома косвенным образом отражает затраты энергии, необходимой для организации атомов в кристаллическую структуру. В результате расчетов получаем следующую схему изменения  $P_A$ : хондриты 0,4987 → луна 0,4312 → земная кора 0,4037 → верхняя мантия (0,4593 — модель Рингвуда; 0,4537 — модель Мак-Гетгена).

Различные типы горных пород распределяются по показателю  $P_A$  следующим образом: магматические породы 0,4100 (дуниты 0,4761, базальты 0,4416, граниты 0,3955) → метаморфические породы 0,3982 (эклогиты 0,4639; гранулиты 0,4243; гнейсы 0,3941; кристаллические сланцы 0,333) → седиментогенные породы 0,3364. От древних этапов космогенного минералообразования к молодым  $P_A$ , следовательно, закономерно уменьшается: метеоритный 0,50 → базальтовый 0,44 → коровый 0,40. Здесь отражается направленное снижение энергетических затрат на преобразование структуры минерального мира.

Кроме рассмотренных выше, существуют другие космоэволюционные закономерности минералообразования.

Другая, глобальная задача — получение надежных данных о минералогии глубинных планетосфер, о плотнейших и сверхплотных модификациях минералов. И, наконец, следующая задача — выявление минералогического взаимодействия планетосфер, в первую очередь влияния неоднородностей мантии на минералогическую неоднородность земной коры.

Минералогические исследования планетосфер могут быть основаны на минералогической интерпретации геофизических данных, модельном эксперименте, сравнительном анализе и анализе следствий глубинных процессов, проявляющихся в поверхностных планетосферах.

## **РЕГИОНАЛЬНАЯ МИНЕРАЛОГИЯ**

Этот вид топоминералогических исследований наиболее популярен. Более того, многими исследователями сам термин «топоминералогия» понимается в узком смысле как синоним термина «региональная минералогия». В последующих главах именно этому виду исследований будет уделено главное внимание, поэтому здесь, не касаясь их методических особенностей, лишь попытаемся определить основные типы исследований.

В зависимости от целей регионально-минералогических исследований и принципов порайонного расчленения земной поверхности можно выделить несколько типов региональных минералогических исследований: георегиональные, ландшафтно-региональные, географо-региональные, политико- и административно-региональные, экономико-региональные, спецрегиональные и т. п. Однако не для всех перечисленных типов можно подобрать удачные примеры из минералогической практики, хотя с той или иной эффективностью все эти подходы используются.

Георегиональная минералогия. Цель исследования — установление минералогических закономерностей в истории геологического развития и современном состоянии определенных геологических регионов. Регионы могут быть разной величины, различной сложности, неодинаковой структуры, но во всех случаях в основу выделения региона кладется геологический принцип. Минералогическое районирование осуществляется по границам геологических структур, район исследования должен быть районом геологическим. Выше уже упоминались работы георегионального класса: это работы Е. К. Лазаренко и его коллектива по минералогии Криворожского и Донецкого бассейнов, работы К. А. Власова и др., Е. И. Семёнова по минералогии Ловозерского щелочного массива, работы Е. Е. Костылевой-Лабунцовой по Хибинскому массиву и мно-

гие другие. Представляет большой интерес, в том числе и методический, работа В. В. Бродина по минералогии Чешского массива [4]. В подобного рода исследованиях ставятся задачи детального описания и сравнительного анализа всех минеральных комплексов региона; составляется полный минералогический кадастр, устанавливаются закономерности распределения минералов в структуре региона и взаимосвязи минералообразования с историей геологического развития структуры.

Одним из актуальных направлений георегиональных минералогических исследований является изучение минералогии дна морей и океанов. Такие исследования, требующие специального технического вооружения (в первую очередь средств для подводного опробования), были начаты не более полувека назад. Уже сейчас они дают достаточный материал для минералогической характеристики подводных площадей земной коры. Более того, в результате проведения подводных минералогических исследований открыт целый ряд очень интересных минеральных месторождений: поля развития железо-марганцевых конкреций, области современного гидротермального минералообразования, подводные россыпи тяжелых минералов. Важнейшей задачей подводных топоминералогических исследований является расширение их на весь Мировой океан, сгущение пунктов минералогического опробования с увеличением высоты опробуемых колонок и переход к сплошным площадным наблюдениям в наиболее интересных местах.

**Минералогия ландшафтов.** Этот тип топоминералогических исследований — промежуточный между георегиональным и географо-региональным. Изучение минералогии ландшафтов приобретает особенно важное значение для установления закономерностей развития структуры ландшафтов, так как минералогические факторы выступают как ведущие в ландшафтообразовании. С другой стороны, ландшафтные особенности в значительной мере определяют характер развития процессов гипергенного минералообразования. В минералогических исследованиях ландшафтов особое внимание должно уделяться сравнительному анализу различных минеральных комплексов, особенно новообразованных, и другим проблемам, решение которых может способствовать прогнозированию динамики ландшафтов. К настоящему времени наиболее интересные исследования выполнены в пустынных ландшафтах, а также в ландшафтах, отличающихся высокой сельскохозяйственной продуктивностью (в последних как компонент почвоведческих исследований).

**Минералогия географических регионов.** Цель и методические основы топоминералогических исследований этого класса те же, что и георегиональных. Разница лишь в принципах выделения регионов: в данном случае они не выделяются по признакам единства геологической струк-

туры, а берутся в границах тех или иных географических районов (остров, полуостров, горная страна и т. п.). В частных случаях границы географических регионов могут совпадать с границами геологических структур, и топоминералогические исследования в таких регионах трудно отнести к тому или иному классу (например, «Минералогия Урала»). К классу географо-региональных топоминералогических работ относятся и исследования в пределах отдельных листов топографических или геологических карт.

Минералогия политико-административных регионов. Объектами топоминералогических исследований этого класса являются отдельные страны или группы стран, а также их части, выделяемые по административным признакам. В США, например, каждый штат имеет минералогическую сводку той или иной степени детальности (примеры топоминералогических исследований отдельных стран мы разбирали в предыдущей главе).

Минералогия экономических регионов. Топоминералогические исследования в регионах с определенной экономической структурой имеют резко выраженный прикладной характер и направлены на выявление минерально-сырьевых ресурсов. Наиболее детально изучаются закономерности распределения и концентрации минералов, имеющих или могущих иметь утилитарную ценность. Это, например, те минералы, от обеспечения ресурсов которых зависит нормальное функционирование уже установившейся экономической структуры. Особое значение в такого рода исследованиях уделяется количественным характеристикам концентрации минералов и прогнозированию новых минеральных месторождений. Эти исследования особенно большое значение приобретают при создании территориально-производственных комплексов.

Топоминералогия коллекционных минералов. Цель исследований — установление месторождений минералов, представляющих коллекционный интерес. Этот тип исследований близок к предыдущему, но критерии определения ценности минералов здесь несколько иные: редкость или уникальность минералов, их необычные свойства, эффектность индивидов и агрегатов, эстетичность их восприятия, доступность месторождений.

## **МИНЕРАЛОГИЯ ГОРНЫХ ПОРОД**

Тела горных пород, являющиеся элементарными составляющими земной коры, представляют собой топоминералогические объекты более низкого ранга, чем геосферы. Изучение минералогии горных пород составляет одно из важнейших топоминералогических направлений, так как горные породы —

наиболее устойчивые закономерные формы организации минералов.

Индивиды минералов являются элементами горных пород, связанными друг с другом силами гравитационного взаимодействия и распределенными по законам структурообразования. Поэтому главными задачами минералогии горных пород являются исследования самих породообразующих минералов и взаимоотношений между минеральными индивидами.

Существует довольно много различных классификаций породообразующих минералов, как общих, так и частных, стремящихся отразить специфику различных типов пород. Наиболее общая классификация дифференцирует минералы, входящие в состав горных пород по степени распространенности, на следующие группы: 1) главные (породообразующие), 2) второстепенные, 3) акцессорные, а по генетическим соотношениям на минералы: 1) первичные, 2) вторичные, 3) реликтовые, 4) ксеногенные и др.

*Главные минералы* составляют основной объем породы. Обычно считается, что к главным следует относить минералы, содержание которых превышает 5 % (по другим рекомендациям, 3% или 1%), однако эти границы в общем-то условные и имеют операциональное значение. В каждом конкретном случае допускаются вариации и главный критерий отнесения содержащегося в относительно небольших количествах (5—1%) минерала к главным — это устойчивое его присутствие в различных образцах одной и той же породы с относительно незначительными колебаниями.

Главными минералами магматических и метаморфических пород обычно являются силикаты и окислы, осадочных — карбонаты, сульфаты, галогениды, окислы, силикаты.

Ниже, по Т. Барту, приведен средний минеральный состав магматических горных пород.

Минерал	Среднее содержание, %	Минерал	Среднее содержание, %
Кварц	12,4	Мусковит	1,4
Щелочные полевые шпаты (ортоклаз, альбит)	31,0	Магнетит, гематит, ильменит	4,1
Плагноклаз	29,2	Нефелин	0,3
Оливин	2,6	Апатит	0,6
Пироксен	12,0	Титанит	0,3
Роговая обманка	1,7	Хлорит и серпентин	0,6
Биотит	3,8	Сумма	100

Отсюда видно, что самыми распространенными минералами являются полевые шпаты (60%), кварц (12%) и пироксены (12%). Соотношения между этими минералами лежат в основе современных классификаций магматических пород.

Средний минеральный состав осадочных пород, по Твенхофелу, существенно отличается от состава магматических, хотя в химическом отношении эти две группы практически тождественны. Минеральный состав отражает генетические различия, различия в условиях и процессах формирования пород, тогда как химический состав свидетельствует о единой природе первичного вещества.

Минерал	Среднее содержание, %	Минерал	Среднее содержание, %
Кварц	34,80	Гипс, ангидрит	0,97
Мусковит, гидрослюды	15,11	Органическое вещество	0,73
Глинистые минералы	14,51	Фосфаты	0,35
Щелочные полевые шпаты (ортоклаз, альбит)	15,57	Титанит, ильменит	0,02
Доломит	9,07	Магнетит	0,07
Кальцит	4,25	Прочие минералы	0,55
Оксиды железа	4,00		
		Сумма	100

Для диагностических классификационных и петрогенетических целей широко практикуется разделение главных минералов магматических пород на цветные и светлые. Цветные (мафические, фемические) минералы отличаются высоким содержанием железа и магния: оливины, пироксены, амфиболы, биотит и др. Светлые (фельсические, салические) характеризуются высоким содержанием кремния и алюминия: плагиоклазы, К—Na-полевые шпаты, кварц, фельдшпатоиды, мелилит и др.

*Акцессорные минералы* составляют незначительную (менее 5—1 %) часть пород. В минералогической литературе существует целый ряд «строгих» определений понятия «акцессорный минерал» [26], в которых точно устанавливается верхний предел их содержания в породе, подчеркивается качественная определенность ассоциаций, определяются взаимоотношения порообразующих и акцессорных минералов. Однако строгая конкретизация здесь вряд ли необходима, так как разделение минералов на главные и акцессорные формально, и во многих случаях критерии разделения определяются целями каждого конкретного исследования. Например, магнетит в гранитоидах различных типов может содержаться от единичных зерен до 10 % и более. Сравнивая эти различия по акцессорным минералам, необходимо рассматривать в одной классификационной группе магнетит, содержащийся и в ничтожных количествах, и в высоких концентрациях.

Акцессорные минералы принято подразделять на типичные (или характерные), входящие в состав только определенных типов пород, и «сквозные» (или нехарактерные), присутствующие в породах разного состава. К последним в магматических породах относятся циркон, апатит, титанит, магнетит и др.

Группа второстепенных минералов занимает по распространенности промежуточное положение между главными и акцессорными.

Генетические типы породообразующих минералов устанавливаются на основе анализа взаимоотношений между ними и группировки по относительным возрастным признакам.

*Первичные минералы* — это минералы, выкристаллизовавшиеся в процессе формирования породы. Поскольку типизация пород проводится по минеральному или функционально связанному с ним химическому составу, то очевидно, что первичными являются все или почти все главные минералы. Первичные минералы нельзя считать строго одновозрастными, так как процесс формирования породы может быть достаточно длительным, складывающимся из закономерностей последовательности минералообразующих процессов, протекающих при различных условиях. Так, первичный минеральный состав магматических пород формируется в результате последовательной кристаллизации многокомпонентного магматического расплава с реакционными взаимоотношениями между формирующимися минералами, в результате эпимагматической перекристаллизации и кристаллизации из высокотемпературных остаточных постмагматических растворов. Минералы, образующиеся после кристаллизации расплава, иногда называют эпимагматическими, а замещающие магматические минералы (мусковит по биотиту, канкринит по нефелину) — викарирующими. Некоторыми исследователями эпимагматические минералы относятся к вторичным. Первичные минералы осадочных пород являются продуктами длительных и сложных процессов седиментогенеза и диагенеза. В метаморфических породах первичными являются минералы, равновесные в термодинамических условиях метаморфизма.

*Вторичные минералы* образуются за счет первичных или в результате привноса вещества в процессе изменения горных пород, т. е. после кристаллизации первичных минералов. Их происхождение обязано процессам, не связанным прямо с процессами кристаллизации первичных минералов: термодинамическому метаморфизму, наложенным гидротермальным и экзогенным процессам. В качестве обычных вторичных минералов магматических пород можно назвать серпентин, тальк, хлорит, тремолит-актинолит, цоизит, эпидот, мусковит, каолинит, пренит, цеолиты и др. Значительное (до полного) замещение первичных минералов вторичными означает переход одной породы в другую.

*Реликтовые минералы* имеют более древний, чем породообразующие минералы, возраст и тем или иным образом захватываются породой в процессе ее формирования. Сами минералы при этом не изменяются или почти не изменяются и не оказывают заметного влияния на новообразованные минералы.

Особенно они характерны для метаморфических пород и метасоматических образований. В магматических породах реликтовые минералы появляются в результате ассимиляции магмой блоков вмещающих пород. При расплавлении таких блоков ряд тугоплавких минералов, например циркон, апатит и др., сохраняются в кристаллическом состоянии и захватываются новообразованными минералами при кристаллизации магматического расплава. Иногда они регенерируются (широко известные цирконы с округлыми ядрами в гранитоидах). Переплавленный материал захваченных магмой обломков может локально изменить состав магмы и послужить причиной кристаллизации чуждых для данной породы ксеногенных минералов (кристаллизация силлиманита и корунда вследствие обогащения гранитоидной магмы глиноземом, волластонита за счет обогащения кальцием и т. п.).

В осадочных породах целесообразно разделить минералов на аутигенные, т. е. образовавшиеся на месте, в самой породе, путем кристаллизации из растворов или перекристаллизации, и аллотигенные, т. е. минералы, привнесенные механически, обломочные или терригенные.

В метаморфических породах принято выделять три группы минералов: 1) образовавшиеся при перекристаллизации минералов субстрата без изменения состава; 2) неоминералы, возникшие за счет неустойчивых в данных условиях минералов субстрата; 3) реликтовые минералы, устойчивые в конкретных условиях метаморфизма.

В минералогии горных пород особо важное значение имеет изучение пороодообразующих и акцессорных минералов, как индикаторов петрогенезиса. Индикаторное значение имеет сам минерал, присутствие которого указывает на определенные условия формирования породы\* или определенные свойства минералов (типоморфные, индикаторные).

Индикаторное значение минералов детально анализировалось в ряде наших работ [60, 61], на них мы специально остановимся в одной из последующих глав, поэтому здесь ограничимся примерами. Так, присутствие нефелина в породе свидетельствует о недостатке в магме кремнезема, тогда как кварца, наоборот, о его избытке. Лейцит является индикатором низких давлений при кристаллизации магмы, биотит — высоких.

Важнейшей задачей минералогии горных пород является установление их кристаллизационной истории на основе данных о последовательности кристаллизации минералов. Общий методический подход к этой проблеме и критерии установления возрастных взаимоотношений минералов будут разобраны в гл. VI. Здесь же следует отметить, что только на основе анализа взаи-

---

\* Такие минералы А. Лакруа называл симптоматическими; этот термин некоторыми исследователями используется и в наши дни.

моотношений минералов можно установить историю формирования породы, а с помощью минералов-индикаторов восстановить физико-химический режим породообразования [60].

Результаты минералогических исследований горных пород позволяют решить целый ряд весьма важных петро(лито) генетических проблем:

- определение природы и источников вещества, в результате эволюции которого формировалась порода (тип и состав магмы для магматических пород, источники сноса для осадочных, первичный субстрат для метаморфогенных и т. п.);
- восстановление истории формирования, изменения и разрушения породы;
- расшифровку геологических и физико-химических условий формирования породы и эволюции этих условий;
- определение формационного типа породы;
- прогнозирование металлогенической специализации и др.

## **МИНЕРАЛОГИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

Минеральными месторождениями являются тела горных пород, сложенные экономически ценными минералами, или аномальные участки пород с высоким содержанием полезных минералов. Такие аномалии или тела таких пород называются рудными телами, а их выполнение — рудами. Конституционной разницы между породами и рудами нет, основной критерий их различия — экономический.

Структурно-вещественное подобие горных пород и руд определяет единый методический подход к изучению их минералогии. Те задачи, которые решаются при изучении пород, встают и при минералогических исследованиях минеральных месторождений.

Однако то обстоятельство, что рудное тело, как точно выразился В. А. Попов «... формально нельзя относить к «геологическим телам», так как оно ограничено не «геологической границей», а «экономическим контуром» [42, с. 16] и, добавим мы, сложено минеральным веществом вполне определенной утилитарной ценности, придает определенную специфику этому классу исследований.

Экономическую ценность может представлять как все минеральное тело в целом, так и отдельные из слагающих его минералов, что ставит при минералогических исследованиях месторождений ряд специальных задач.

Минералогические исследования должны, во-первых, дать материал для определения вещественной и генетической природы оруденения, для выяснения закономерностей пространственных вариаций продуктивности минеральных тел, для установления геолого-минералогического типа месторождения. Во-вторых, они должны удовлетворить запросы разведки в вы-

боре оптимального варианта изучения минерального тела и в определении методики опробования, методики подсчета запасов. В-третьих, исследования должны дать исчерпывающую минералого-технологическую характеристику и типизацию руд с целью выработки рациональных схем их переработки. И, в-четвертых, перед минералогическими исследованиями ставятся различного рода прогнозные задачи и задачи по выработке минералогических критериев поисков и оценки аналогичных месторождений.

Работы, в которых решается весь этот комплекс задач или отдельные задачи, весьма многочисленны и у нас, и за рубежом, и минералогия минеральных месторождений является одним из наиболее разработанных направлений топоминералогии.

В минералогии месторождений полезных ископаемых используются те же рабочие классификации минералов, что и в минералогии горных пород. Иногда в них вносятся некоторые коррективы, например более дробное деление по степени распространенности на главные, второстепенные, редкие и акцессорные минералы. Однако в связи с акцентом на экономическую ценность руд вводится ряд специальных классификаций, главная из которых дифференцирует минералы на представляющие практическую ценность (рудные или продуктивные) и не представляющие ценности (нерудные или непродуктивные), хотя разделение это в какой-то степени условно, так как само понятие «руда» изменяется в результате технического прогресса и изменения экономической конъюнктуры.

К *рудным (продуктивным) минералам* относятся минералы, используемые в хозяйственной деятельности и представляющие объект поисков, разведки или добычи. В диагностической практике рудными нередко считаются только непрозрачные минералы, обычно сульфиды и окислы, но в рудничной минералогии в понятие «рудный минерал» вкладывается утилитарный смысл. Поэтому к рудным минералам относятся и прозрачные, такие как сера, алмаз, флюорит, апатит, сода, слюда и многие Другие.

Рудные минералы по способу их использования делятся на три группы:

а) минералы, представляющие практический интерес как концентраты ценных химических элементов и подвергающиеся при извлечении последних полному разрушению (галенит, сфалерит, халькопирит, апатит и т. п.);

б) минералы, представляющие ценность как физическое тело и используемые в промышленности без разрушения кристаллической структуры в виде природных индивидов или их частей (алмаз, слюды, пьезокварц, исландский шпат, ювелирные и коллекционные минералы, асбест и т. п.);

в) минералы, представляющие ценность как физическое тело или для получения физических тел, но требующие технологического передела с разрушением структуры (флюорит как шихта для выращивания из расплава искусственных оптических кристаллов фтористого кальция, кварц как сырье для получения оптических стекол, кальцит как сырье для получения монокристаллов исландского шпата методом перекристаллизации, янтарная крошка для переплавки и т. п.).

Минералы каждой из этих групп требуют специфических подходов к их изучению: при исследовании минералов группы а основное внимание обращается на химию минералов, группы б — на морфологию и физические свойства, группы в — как на химию, так и на физику минералов.

К *нерудным (непродуктивным) минералам* относятся минералы, встречающиеся вместе с рудными, но не представляющие в настоящее время утилитарной ценности и идущие в отвалы рудников и «хвосты» горно-обогатительных предприятий. Обычно это кварц, полевые шпаты, карбонаты, пироксены и многие другие минералы. Нужно, однако, отметить, что минералов, не имеющих никакого промышленного значения, нет и в настоящее время одной из важнейших задач минералогов и технологов является разработка безотходных технологических схем. В месторождениях, представленных жильными телами, главные из нерудных минералов называются жильными.

Разделение минералов на рудные и нерудные имеет операциональный характер. Одни и те же минералы, особенно такие, как барит, флюорит, слюды, в определенных месторождениях могут считаться нерудными, если их мало, а в других, где концентрации высокие и запасы достаточно большие — рудными. Кроме того, с изменением экономической конъюнктуры или с модернизацией добычи и технологического передела ценностные критерии могут изменяться и нерудные минералы переходить в группу рудных. Поэтому одной из важнейших задач минералогии является расширение круга полезных минералов, а среди уже используемых промышленностью — открытие новых полезных качеств.

Как справедливо подчеркнул А. И. Гинзбург [8], народнохозяйственный эффект от вовлечения в экономику одного нового минерала сравним с открытием нового крупного месторождения. Примером является использование в качестве источников бериллия фенакита и бертрандита; в общем же в последние годы промышленностью стали использоваться десятки новых минералов, особенно для извлечения редких и редкоземельных элементов.

Новые полезные качества минералов могут проявляться с открытием новых элементов-примесей, с открытием новых

свойств минерала и с установлением новых областей применения. Так, в качестве новых источников цезия стали рассматриваться после тщательных кристаллохимических исследований цезийсодержащие биотиты из зон биотитизации вокруг сподуменовых пегматитов и цезиевые астрофиллиты из зон фенитизации в щелочных массивах. Открытие эффекта возникновения цитриновой окраски у некоторых разновидностей бесцветного кварца в результате гамма-облучения позволило В. В. Буканову предложить для ювелирной промышленности новый вид сырья из материала, ухидившего ранее в отвалы. Весьма значительный технический и экономический эффект приносит использование флюорита ряда месторождений как исходного сырья для получения монокристаллов с уникальными оптическими свойствами [61]; стоимость этого флюорита после перевода его (на основе данных наших исследований) из категории технологического в категорию оптического увеличилась в тысячу раз. Минералогические исследования минеральных месторождений должны быть направлены на решение важнейшей народнохозяйственной проблемы — комплексного использования минерального сырья.

#### **СПЕЦИАЛЬНЫЕ ТОПОМИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

К категории специальных мы относим топоминералогические исследования, направленные на решение каких-то конкретных научных или прикладных задач. Эти исследования могут ставиться самостоятельно или включаться в комплекс исследований любого из рассмотренных выше классов. Их общность в выяснении пространственных минералогических закономерностей, кроме того, они имеют дело с минералами в тех или иных конкретных геологических системах — топосах. К специальным топоминералогическим исследованиям относятся, например, изучение акцессорных минералов, метаморфических пород того или иного региона с целью их корреляции, изучение минералов региона как возможных поделочных и коллекционных камней с утилитарными целями, исследование минералов россыпей в процессе шлихового опробования геологических площадей и т. п.

В качестве примера топоминералогического исследования на рис. 8 представлена топоминералогическая карта Андрее-Юльевского района на Урале, отражающая в обобщенном виде результаты кварцметрической съемки, проведенной А. Г. Баранниковым и И. М. Мингуловым. Съемка выявила поля распространения различных типов жильного кварца и позволила

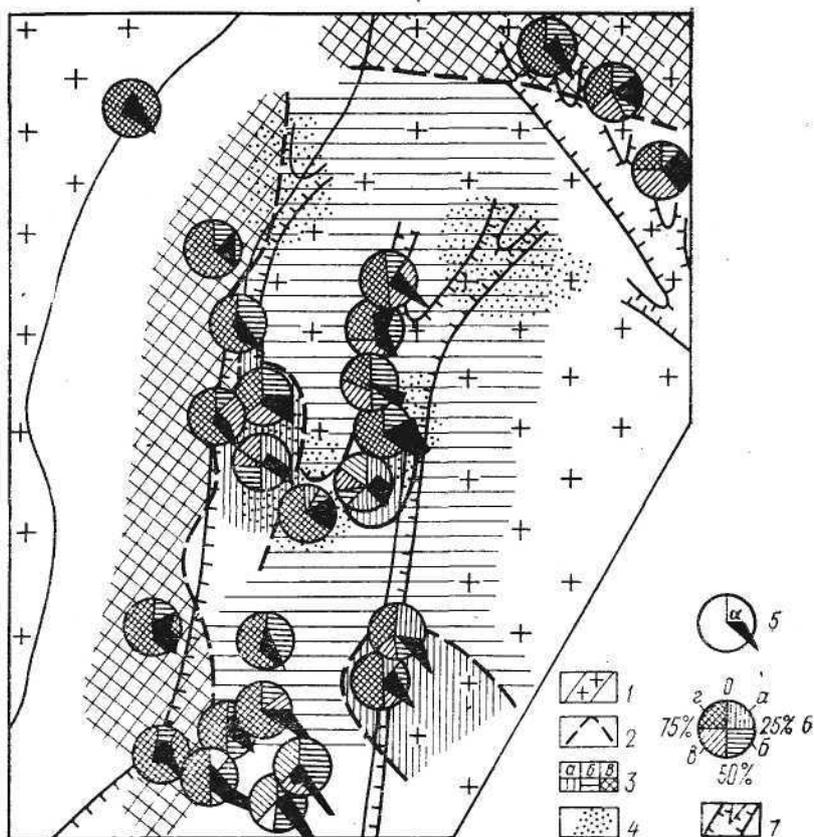


Рис. 8. Схематическая кварцеметрическая карта Андрее-Юльевского района. По А. Г. Баранникову и И. М. Мингулову.

1 — контуры гранитоидных массивов; 2 — поля преобладающего развития жильного кварца (различных типов); 3 — типы жильного кварца: а — гигантозернистый, б — крупно-среднезернистый, в — гранулированный; 4 — аномальные участки предполагаемого распространения золотоносного кварца по его типоморфным особенностям; 5 — вектор переноса кварцевой гальки (дальность транспортировки в километрах пропорциональна углу наклона вектора  $\alpha$ ); 6 — количественное соотношение в пробе гальки кварца: а — гигантозернистого, б — крупнозернистого, в — среднезернистого, г — гранулированного; 7 — контуры потоков олигоценового возраста

прогнозировать площади для поисков собственно кварцевых и других месторождений. На карте показаны направления и интенсивность переноса кварцевых обломков. Эти примеры дают общее представление о сущности и содержании топоминералогических исследований.

К этой же группе топоминералогических работ относится и «вещественная» часть металлогении, которую мы в дальнейшем рассмотрим специально.

## ЗАДАЧИ И СТРУКТУРА ТОПОМИНЕРАЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Каждое из рассмотренных в предыдущей главе направлений топоминералогических исследований имеет конкретные цели, определяемые особенностями изучаемых объектов и требованиями к информации, получаемой в результате их проведения. Однако главную методическую основу составляет комплекс общих для всех направлений задач, вытекающих из самой сущности топоминералогии как учения о пространственно-временных минералогических закономерностях, из современной минералогической теории и практики. Этот комплекс определяет структуру топоминералогических исследований. Исходя из этих задач планируются и проводятся исследования, осуществляется обработка материалов. В структуре топоминералогических сводок и монографий эти задачи также находят отчетливое отражение, входя даже в рубрикации и оглавления.

Попытаемся сформулировать и кратко обсудить эти главные задачи, составляющие смысл любого топоминералогического исследования.

Они сводятся к следующему.

Комплексное изучение минералогии геологических объектов. Смысл этой задачи прежде всего в получении максимально полного представления о минеральном составе изучаемых минералогических объектов и их структурных компонентов (например, геологических регионов с дифференциацией на слагающие минеральные комплексы). Главная цель — создать полный минералогический кадастр объекта, включающего все минеральные виды, разновидности и разновидности с данными об их распространенности. Основной методический прием решения этой задачи — это своего рода «охота за минералами».

Исследование пространственных и временных взаимосвязей между минералами. Эта задача сводится к выделению пространственных и пространственно-временных ассоциаций минералов на основе глубокого изучения взаимоотношений между ними и восстановления полной кристаллизационной истории минеральных тел. Главными методами на этом этапе исследований являются корреляционный, формационный, парагенетический и онтогенетический анализы.

Региональный анализ минеральных сообществ проводится в строгой увязке с геологической структурой района; главным

результатирующим документом должна быть карта минеральных ассоциаций, отражающая их структуру, пространственные и временные соотношения.

Исследование структуры, состава и свойств минералов. Изучение конституции и свойств минералов не является самоцелью. Оно направлено на решение трех задач: а) использование минералов как источников генетической информации и индикаторов условий минералообразования; б) установление полезных свойств минералов как потенциальных полезных ископаемых; в) использование минералов как индикаторов рудоносности изучаемых регионов. Особенно важное значение придается изучению типоморфизма минералов. Методические подходы к расшифровке генетической информации, содержащейся в минералах, заключаются в комплексном применении энтропийно-информационного, типоморфического и генетико-информационного анализов.

Установление эволюции процессов минералообразования в связи с геологической эволюцией изучаемых регионов. Общая схема решения этой многоплановой проблемы складывается из нескольких последовательных звеньев:

а) восстановления результатов минералогических процессов в их естественной последовательности с увязкой истории отдельных индивидов с историей агрегатов, месторождений, групп месторождений и т. д. до получения полной картины по региону;

б) восстановления самих процессов в последовательности составляющих их явлений (историко-генетическая реконструкция изучаемых объектов);

в) восстановления общей минералогической картины изученных объектов, увязанных с геологическими объектами;

г) установления общих эволюционных закономерностей минералообразования в изученном регионе.

Топоминералогическое прогнозирование. На основе вскрытых в процессе топоминералогического исследования закономерностей образования и пространственного распределения минералов открывается возможность минералогического прогнозирования по слабоизученным площадям и месторождениям: предсказания новых областей и зон развития той или иной минерализации, новых парагенезисов, возможности открытия новых минералов и т. п. Вот эта прогнозная функция топоминералогии и составляет ее эвристическую сущность, оправдывает постановку работ и затраты на них.

Разработка строгих минералогических критериев прогноза, поисков и оценки минеральных месторождений. Минералогическая информация определяет решение многих рудно-сырьевых проблем,

поскольку сами минералы являются и полезным ископаемым. Глубокое изучение структуры, состава, свойств, условий нахождения минералов раскрывает наиболее рациональные пути их использования. В частности, одной из важнейших и наиболее актуальных задач современной минералогии является разработка эффективного минералогического метода поисков месторождений полезных ископаемых.

Детальному методологическому анализу каждой из этих задач, определяющих общую структуру топоминералогии, будут посвящены специальные главы. Следует лишь отметить ряд общих требований, предъявляемых к топоминералогическим исследованиям, но, к сожалению, не всегда выполняющихся.

1. Топоминералогические исследования должны быть строго специализированы, проводиться специальными минералогическими методами, направленными на получение именно минералогической информации. Они должны не подменять петрографические, литологические, геохимические исследования, а иметь свою целевую направленность. Нередко топоминералогические исследования планируются и проводятся как вспомогательные, попутно с другими видами геологических работ, причем ведутся не специалистами-минералогами. Естественно, эффективность таких работ невелика.

2. Топоминералогические исследования должны опираться на геологические данные, и основу любой топоминералогии должна составлять строгая и точная геологическая карта соответствующего масштаба (как минимум на ступень крупнее масштаба топоминералогического исследования). При глубинных минералогических исследованиях необходимы соответствующие геологические разрезы, планы глубинных съемок, геофизические материалы и т. п. Сами топоминералогические исследования также проводятся при ведущем значении методов минералогического картирования.

3. Поиски путей максимально лаконичной информации, получаемой в процессе топоминералогического исследования с тем, чтобы можно было оперировать ею и при составлении минералогических карт, и в топоминералогическом описании. Непропорциональная объемность (например, 60—100 печатных листов для среднего региона), композиционная рыхлость, перегруженность необработанным описательным и измерительным материалом с очень незначительной степенью его генетической и особенно пространственно-генетической интерпретации отличают современные топоминералогические работы. В таком виде они трудны для использования и малоэффективны.

## МИНЕРАЛОГИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ

Основной объем топоминералогических исследований относится к регионально-минералогическому направлению, точнее, к его типу, который мы назвали георегионально-минералогическим. Полигонами таких исследований являются минералогические регионы различного ранга в зависимости от цели, объема и детальности работ. В связи с этим встает вопрос о минералогическом районировании изучаемых территорий, который мы и намерены обсудить в этой главе.

Однако прежде, чем говорить о минералогическом районировании, необходимо определить общие принципы районирования и условиться о ранжировке минералогических регионов.

### ПРИНЦИПЫ МИНЕРАЛОГИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ

В основу минералогического районирования, очевидно, могут быть положены различные критерии: географические, экономические, собственно минералогические, петрографо-литологические и т. п. Эти критерии широко используются при проведении специализированных региональных исследований, однако принять их в качестве общих нельзя, так как они не определяют минералогическую специфику регионов. Генеральными факторами, определяющими видовой состав и пространственное распределение минералов, являются факторы структурно-геологические. Геологические регионы, характеризующиеся близкой геологической историей и, следовательно, сходной геологической структурой, будут иметь одинаковый минералогический облик и наоборот. Следовательно, минералогическое районирование наиболее целесообразно проводить на структурно-геологической основе.

Структурно-геологический принцип, как известно, лежит в основе и металлогенического районирования [17, 39]. Принимая его в топоминералогии, мы, во-первых, получаем возможность полностью использовать хорошо разработанный аппарат металлогенического районирования и, во-вторых, достигаем максимально полного объектного соответствия топоминералогии и металлогении, столь необходимого для эффективного решения прогнозных задач на основе «овеществления» металлогении.

### ПОНЯТИЕ О МИНЕРАЛОГИЧЕСКОЙ ПРОВИНЦИИ

Элементарным регионально-минералогическим таксоном является минералогическая провинция. Существует два подхода к определению понятия «минералогическая провинция» — «широкий» и «узкий». В предыдущих работах мы вкладывали

в это понятие широкий смысл, выделяя минералогические провинции в границах целых геосинклинальных поясов, а на платформах — в границах крупных геоструктурных элементов (весьма крупных антеклиз и синеклиз, областей перикратонных опусканий или склонов платформ и т. п.). Именно в таких границах выделяются и металлогенические провинции [17].

Однако опыт многолетних топоминералогических исследований вскрыл серьезные недостатки выделения сверхкрупных провинций. Дело в первую очередь в том, что при таком широком подходе теряется, «размывается» минералогическая специфика отдельных регионов. Геосинклинальные пояса, например Уральский, сложенные несколькими структурно-магматическими комплексами и характеризующиеся наличием целого ряда структурно-фациальных зон, отличаются высокой регионально-минералогической гетерогенностью. В их пределах можно выделить регионы с самыми различными рядами минеральных формаций, имеющими различную генетическую природу — седиментационную, метаморфическую, гранитоидную, базитовую, ультрабазитовую, щелочную и т. п.

Такой гетерогенный регион нельзя рассматривать как элементарную топоминералогическую единицу, поскольку сам он состоит из целого ряда минералогически специфичных структурных компонентов — крупных антиклинорий и синклинорий. Эти структуры формировались в условиях различного тектонического режима и характеризуются существенными различиями осадконакопления, магматизма и метаморфизма. Они сложены вещественно и генетически различными минеральными комплексами. В качестве примера можно сравнить, скажем, такие структурные элементы Уральского геосинклинального пояса, как Пайхойско-Южноновоземельский мегантиклинорий (с его седиментогенными минеральными комплексами, а также с комплексами, связанными с базальтоидным магматизмом и широко развитой телетермальней минерализацией), Тагило-Магнитогорский мегасинклинорий (с преимущественным развитием минеральных комплексов базитовой, ультрабазитовой и метаморфогенной природы), Вишневогорско-Ильменогорский антиклинорий (со специфическими минеральными комплексами щелочных пород и связанных с ними поздне- и постмагматических образований). Именно такие минералогически определенные регионы и целесообразно выделять в ранг минералогических провинций.

*Минералогическая провинция — это участок земной коры, характеризующийся относительно однородным геологическим строением и развитием одних и тех же минеральных комплексов.*

Приведенное определение не выглядит, конечно, строгим, так как в нем отсутствуют четкие минералогические критерии

для выделения минералогических провинций. Предложить их *a priori* мы не можем, поскольку для провинций разных типов они различны. Несмотря на это, дифференциация земной коры на минералогические провинции не вызывает серьезных затруднений, так как в основе ее лежит структурный принцип, отражающий органическую взаимосвязь геологического развития структуры и формирования слагающих ее минеральных комплексов. Именно этот принцип единства истории развития, геологического строения и минерализации и лежит в основе предлагаемого определения. Границы минералогических провинций, как правило, совпадают с границами крупных или средних структурных элементов: мегантиклинориев и мегасинклинориев, простых антиклинориев и синклинориев, антеклиз и синеклиз, краевых зон складчатых поясов и т. п. Минералогическое районирование затрудняется лишь в условиях сложно построенных структур и в слабоизученных регионах.

Минералогические провинции в предлагаемой трактовке пространственно совпадают с металлогеническими субпровинциями или с рудными поясами [39]. Можно было бы, конечно, добиться полного соответствия, «повысив» ранг минералогической провинции до границ провинции металлогенической (как, кстати, мы делали это раньше). Однако, как уже указывалось, такая топоминералогическая единица не будет элементарной, хотя она элементарна с позиций металлогении, вычлняющей лишь те минеральные комплексы, которые представляют утилитарную ценность. Здесь сказывается специфика задач топоминералогии и металлогении, однако это несоответствие лишь кажущееся.

Итак, элементарным топоминералогическим регионом является минералогическая провинция. Размеры провинций обычно колеблются от 10 тыс. до 100 тыс. км<sup>2</sup>, т. е. они оптимальны для среднемасштабного исследования, проведенного одним типовым минералогическим коллективом в разумно короткий период времени (3—5 лет).

## **ИЕРАРХИЯ МИНЕРАЛОГИЧЕСКИХ РЕГИОНОВ**

По тем или иным признакам общности или взаимосвязи геологического строения и развития и минералогическим особенностям провинции могут объединяться в более крупные топоминералогические регионы: минералогические области (или пояса) в случае их резко удлиненной формы, кольца — при линейно замкнутом распространении. Минералогические области (пояса) выделяются в границах простых геосинклинальных об-

ластей (поясов), в границах платформ или крупных платформенных элементов. Серия родственных минералогических провинций может объединяться в суперпровинцию, составляющую часть минералогической области (пояса).

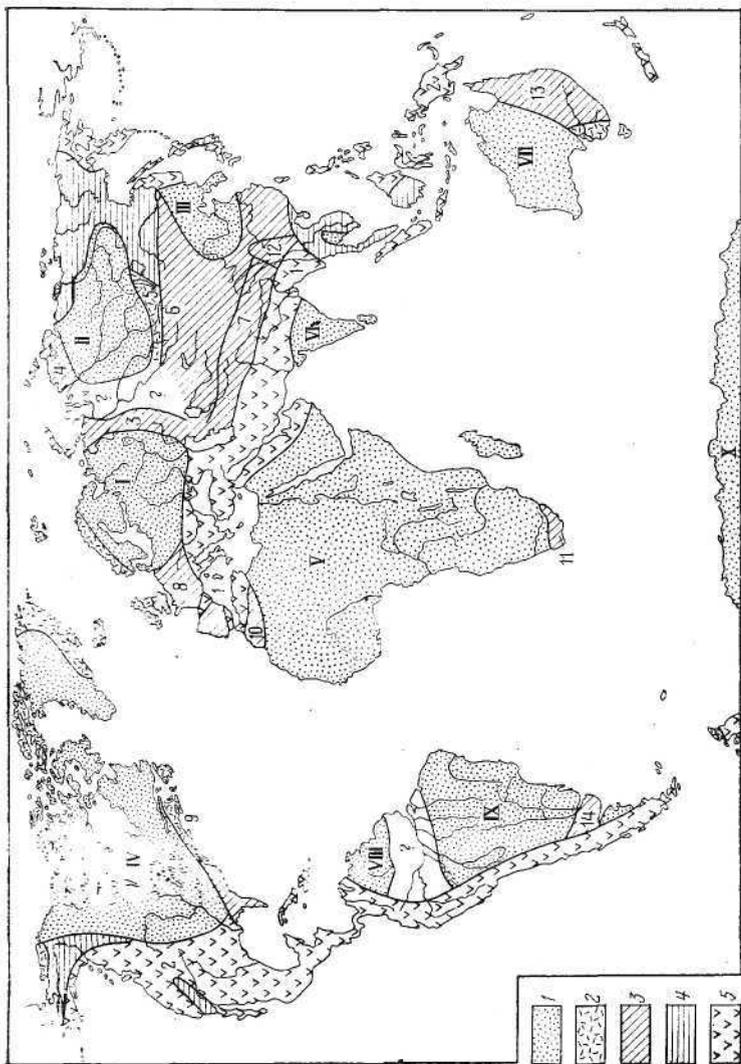
Минералогические области (пояса) объединяются в планетарные минералогические регионы, пространственно совпадающие со щитами и их платформами и планетарными складчатыми поясами (рис. 9). Выделение столь крупных минералогических регионов мало что дает для установления топоминералогических закономерностей; это важно главным образом для систематизации.

Сами минералогические провинции могут подразделяться на субпровинции (в границах простых региональных структур, например в границах отдельных антиклинориев, входящих в состав мегантиклинория-провинции; например Вайгач-Южноновоземельская и Пайхойская субпровинции, входящие в Пайхойско-Южноновоземельскую минералогическую провинцию и т. п.), а также на минералогические районы (территории с однотипными минеральными комплексами). Для еще более дробного деления минералогических регионов можно использовать термины площади, участки, поля и т. п.

В минералогическом районировании, особенно при выделении мелких топоминералогических элементов, допускается операциональность, определяемая задачами каждого конкретного исследования. Так, иногда целесообразно ограничить тот или иной регион пределами распространения определенных минеральных парагенезисов. Таким образом, выделяются следующие главные ранги минералогических регионов, перечисляемые в их суперпозиционной последовательности:

- планетарные минералогические регионы;
- минералогические области (пояса);
- (минералогические суперпровинции);
- минералогические провинции;
- (минералогические субпровинции);
- минералогические районы;
- минеральные месторождения;
- минеральные тела.

В минералогическом районировании нередко используется термин «минералогическая зона». Использовать этот термин для обозначения минералогического региона того или иного ранга не следует. Минералогическая зональность характерна для топотаксонов любого ранга, и мы можем рассматривать зональность на уровне минерального тела, минералогической провинции, области и т. д. Целесообразно поэтому использовать термин «зона» в его прямом смысле как термин широкого пользования.



**Рис. 9. Планетарные минералогические регионы Земли (в основе схема металлогенического районирования). По И. Г. Магакьяну.**

*1 — минералогические области платформ: I — Русской, II — Сибирской, III — Китайско-Корейской, IV — Северо-Американской, V — Африкано-Аравийской, VI — Индийской, VII — Австралийской, VIII — Гвианской, IX — Бразильской, X — Антарктической; минералогические пояса складчатых областей: 2 — каледонского, 3 — герцинского, 4 — киммерийского, 5 — альпийского возраста. Цифры на карте: 1 — Средиземноморская, 2 — Тихоокеанская, 3 — Уральская, 4 — Таймырская, 5 — Алтае-Саянская, 6 — Казахстанская, 7 — Среднеазиатская, 8 — Западно-Европейская, 9 — Норвежско-Аппалачская, 10 — Атласская, 11 — Капская, 12 — Кам-Юньаньская, 13 — Восточно-Австралийская, 14 — Аргентинская*

## МИНЕРАЛОГИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ СССР

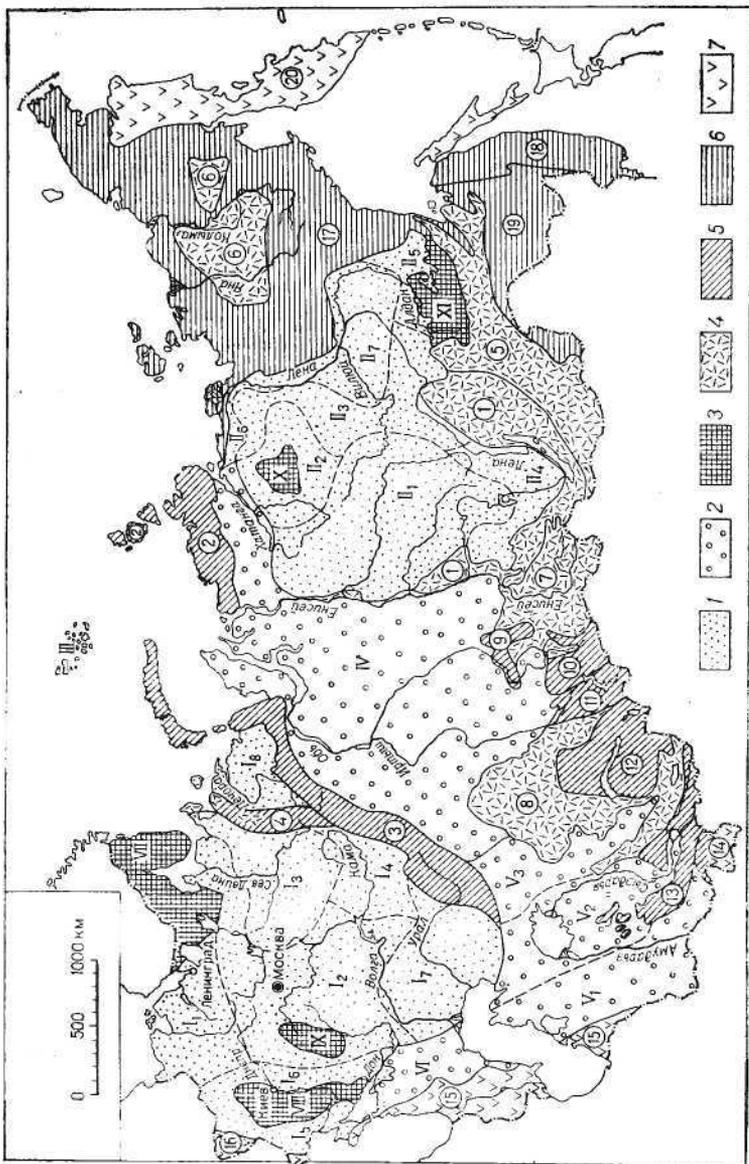
На рис. 10 нами дана общая схема минералогического районирования СССР. На ней выделены минералогические области (пояса), а также наиболее крупные в их пределах минералогические провинции. Схема эта строго отражает особенности геологического строения нашей страны и не требует особых пояснений. Минералогические области и пояса совпадают с контурами древних и эпипалеозойских платформ, докембрийских, палеозойских и более молодых складчатых областей, главнейших срединных массивов.

Приведенная схема минералогического районирования СССР не претендует на абсолютную строгость. Она представляет собой предварительный макет, требующий уточнения в процессе регионально-минералогического анализа. Осуществление регионально-минералогического анализа территории СССР представляет собой одну из весьма актуальных задач, решение которой дает надежную основу как для определения частей земной коры, так и для районирования. Проведение такого анализа затруднено сейчас неравномерной, а для многих регионов неудовлетворительной минералогической изученностью.

## ГЛАВА V

### КОМПЛЕКСНОЕ ИЗУЧЕНИЕ МИНЕРАЛОГИИ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ. МИНЕРАЛЬНЫЙ КАДАСТР ОБЪЕКТА

С позиций минералогии любая геологическая (или космическая) система, являющаяся объектом минералогического исследования, строго и полностью определяется двумя компонентами: а) элементами, «кирпичиками», слагающими систему, т. е. минералами и б) совокупностью законов, по которым эти элементы распределяются в объеме системы, т. е. структурой. Следовательно, намечаются две стержневые методические линии топоминералогии, одна из которых направлена на изу-



**Рис. 10. Минералогическое районирование СССР.**

*Минералогические области платформ и щитов: 1 — древних платформ, 2 — эппалеозойских платформ, 3 — щитов; I — Русской платформы (в скобках минералогические провинции: I<sub>1</sub> — Прибалтийская, I<sub>2</sub> — Московская, I<sub>3</sub> — Северо-Двинская, I<sub>4</sub> — Камская, I<sub>5</sub> — Украинская, I<sub>6</sub> — Донецкая, I<sub>7</sub> — Прикаспийская, I<sub>8</sub> — Печорская); II — Сибирской платформы (II<sub>1</sub> — Тунгусская, II<sub>2</sub> — Оленёкская, II<sub>3</sub> — Вилюйская, II<sub>4</sub> — Ангарская, II<sub>5</sub> — Северо-Алданская, II<sub>6</sub> — Хатангинско-Ленская, II<sub>7</sub> — Вилюйско-Ленская); III — Баренцево-Карской эппалеозойской платформы; IV — Западно-Сибирской эппалеозойской платформы; V — Турано-Тургайской платформы (V<sub>1</sub> — Южно-Туранская, V<sub>2</sub> — Северо-Туранская, V<sub>3</sub> — Тургайская); VI — Скифской платформы; VII — Балтийского щита; VIII — Украинского кристаллического массива; IX — Воронежского кристаллического массива; X — Анабарского щита; XI — Алданского щита. Минералогические области и пояса складчатых регионов; 4 — каледониды, 5 — герциниды, 6 — мезозониды; 7 — альпиды. Цифры в кружках: 1 — Байкало-Енисейский пояс, 2 — Северотаймырско-Североземельская область, 3 — Уральский пояс, 4 — Тиманский пояс, 5 — Забайкальско-Амурская область, 6 — Колымская область, 7 — Алтае-Саянская область, 8 — Казахстанская область, 9 — Кузнецко-Салаирская область, 10 — Горно-Алтайская область, 11 — Иртышско-Зайсанская область, 12 — Джунгаро-Балхашская область, 13 — Тянь-Шаньская область, 14 — Памирская область, 15 — Крымско-Кавказская область, 16 — Карпатская область, 17 — Верхоянско-Чукотская область, 18 — Сихотэ-Алинская провинция, 19 — Монголо-Охотская область, 20 — Камчатско-Курильский пояс*

чение самих минералов, а другая — на изучение пространственно-временных взаимоотношений между ними. Здесь будут рассмотрены методические проблемы, относящиеся к изучению минерального состава объектов.

Основной целью топоминералогических исследований этого направления будет создание полного минералогического кадастра (или каталога) изучаемого объекта с перечнем всех входящих в его состав минеральных видов и разновидностей с данными об их распространенности. На основе минерального кадастра и будет получено представление о вещественной стороне объекта.

Кадастровая работа является основной при любом топоминералогическом исследовании, и в любой сводке обязательно в том или ином виде находятся пообъектные минеральные кадастры. Однако мы сильно недооцениваем информацию, содержащуюся в кадастрах, ограничиваясь, как правило, их инвентарной ролью. Очень мало можно назвать работ, в которых делались бы попытки вывода тех или иных глобальных или локальных минералогических закономерностей на основе кадастровых данных.

## **ЦЕЛИ, ПРИНЦИПЫ И МЕТОДЫ СОСТАВЛЕНИЯ МИНЕРАЛЬНОГО КАДАСТРА**

Общий методический подход к получению данных о минеральном составе топоминералогических объектов не требует специальных пояснений: это всем широко известный количественный минералогический анализ, в котором тщательный и скрупулезный количественный подсчет минеральных индивидов, слагающих объект, сочетается с настоящей «охотой» за редкими и аксессуарными минералами. Конечным итогом анализа

должна быть исчерпывающая характеристика количественного минералогического состава объекта.

Объекты топоминералогических исследований — это обычно весьма сложные минеральные системы, построенные из систем нескольких мелких порядков. В строении минералогической провинции, например, принимают участие различные типы горных пород, представленные конкретными породными телами. В последних могут выделяться отдельные разности, отличающиеся ассоциациями слагающих их минералов; ассоциации расчленяются на парагенезисы и т. д. Отсюда очевидно, что общий минеральный кадастр всего такого сложного объекта должен слагаться из составляющих его кадастров элементарных систем. Поэтому в процессе кадастровоставительского исследования весьма важными представляются *задача расчленения сложного объекта* на более мелкие системы, вплоть до элементарных, и отдельное изучение системы. Это тем более необходимо, что, как правило, элементарные системы имеют разную природу (осадочные, магматические, метаморфические горные породы, рудные тела и т. д.) и требуют различных методических подходов.

Расчленение объекта на отдельные минеральные системы, очевидно, не должно вызывать особых трудностей. Оно проводится по естественным геологическим границам, поскольку элементарными минеральными системами являются геологические тела того или иного масштаба, сложенные строго определенными минералами. Такие минеральные системы мы назвали локатипами [60]. Локатипами различных рангов являются минералы одного зарождения, одной генерации, одной минерализационной полости, жилы, месторождения, группы однотипных месторождений и т. п. Полиминеральные системы представлены локатипами нескольких минеральных видов. В англоязычной литературе в том же смысле, что и локатип, используется термин «топотип», введенный позднее.

Второй, столь же важной и ответственной задачей кадастровоставительской работы является *задача диагностики минералов*, слагающих топос и его элементарные системы.

Минерал может считаться строго диагностированным, если определена его конституция (т. е. известны химический состав и кристаллическая структура) и осуществлена его идентификация с каким-либо уже известным минералом или доказана новизна минерала. Все свойства минерала (физические и химические) — выражение его конституции и жестко взаимосвязаны как друг с другом, так и с конституционными характеристиками минерала. В связи с этим все методы диагностики минералов можно разделить на две группы:

1) прямые, дающие непосредственную информацию о кристаллической структуре и химическом составе минералов (рентгеноструктурный анализ, химический анализ);

## Классификация операций по диагностике минералов

Тип	Простой вариант	Сложный вариант
<i>1. Диагностика по готовым константам</i>		
Визуальный	Признаки (главным образом качественные, внешние), хранимые в памяти минералога	Признаки (главным образом количественные), хранимые в таблично-графических определителях
Полуавтоматический	Перфокарты с краевой перфорацией	Просветные перфокарты
Автоматический	Специализированные электрохимические и электронные диагностические автоматы	Универсальные вычислительные машины
<i>2. Автоматическая диагностика, сопряженная с автоматическим измерением свойств</i>		
Автоматический	Измерения+диагностика	Измерения+опознание+подсчет или отборка

2) косвенные, дающие информацию о конституции минералов по их свойствам (оптическим, механическим, электромагнитным, химическим и т. п.).

В последнее время опубликовано немало работ по диагностике минералов, среди которых наиболее значительны труды В. Г. Фекличева [53], разрабатывающего на современном научном уровне теорию и практику минеральной диагностики. Поэтому, рекомендуя эти монографии для детального изучения, ограничимся лишь отдельными сведениями, на которые следует обратить внимание.

В табл. 4 приведены генерализованная схема диагностических операций [53], отражающая современные состояния методических разработок в этом направлении.

В определительской работе минералога всегда важное значение имеет выбор диагностических средств, которые обуславливаются как особенностями диагностируемых объектов, так и информативностью диагностических средств.

В. Г. Фекличев информативность диагностических средств оценивает с помощью показателя информативности  $P_{и}$ :

$$P_{и} = \frac{D}{I_{ср} + 2|\Delta|},$$

где  $D$  — диапазон сосредоточения величин свойств всех минералов;  $I_{ср}$  — средняя величина интервала, в котором изменяются свойства отдельных минералов из-за непостоянства состава;  $2|\Delta|$  — удвоенная точность измерения свойства.

Таблица 5

## Показатели средней информативности и цена измерения физических свойств минералов

Свойства, константа	Точность, условия	Показатель информативности $P_{И}$	Цена С
Плотность	$\pm 0,005$ , гидростатическим методом	500	0,7
То же	$\pm 0,1$ , микрометодом	25	0,21
Твердость	$\pm 0,5$ , по Моосу	5	0,02
Микротвердость	$\pm 9,8 \cdot 10^7$ Па	50	0,7
Отражательная способность	$\pm 1$ %, средняя	25	0,2
Дисперсия отражательной способности	$\pm 1$ %, в видимой области	250	2
Показатели преломления	$\pm 0,002$ , изотропный минерал	250	0,35
То же	$\pm 0,002$ , анизотропный минерал	750	1,75
Количественный спектральный анализ	Навеска $> 100$ кг	60	2,0
То же	.. $< 10$ мг	6	2,0
Дебаеграмма	.. $> 30$ мг	2500	3,5
То же	.. $< 1$ мг	100	3,5
Параметры элементарной ячейки	$\pm 0,001$ нм, изотропный минерал	500	14
То же	$\pm 0,001$ нм, анизотропный минерал	1500	30

Кроме информативности на выбор средств, естественно, влияют их стоимость. В табл. 5, цитируемой, по В. Г. Фекличеву [53], приведены данные по этим показателям для наиболее популярных диагностических свойств. На их основе может осуществляться планирование диагностических операций при топоминералогических исследованиях.

Развитие топоминералогических исследований, переход с уровня тематических разработок на уровень планомерных работ геолого-производственной направленности как компонента геологических съемок и поисково-разведочных работ требует решения ряда весьма актуальных проблем диагностики минералов.

Первая проблема — резкое повышение экспрессности существующих лабораторных методов без снижения их точности и информативности. Особенно это касается определения струк-

туры и химического состава минералов и наиболее информативных свойств. В процессе детального изучения топоминералогических объектов приходится проводить площадное минералогическое опробование и объем отбираемых за полевой сезон проб исчисляется тысячами, десятками и даже сотнями тысяч. Для установления пространственных топоминералогических закономерностей необходимо опираться на количественные характеристики тех или иных свойств, т. е. необходимо проанализировать минералы из всех проб. Если учесть, что одна лаборатория связана с несколькими коллективами, ведущими топоминералогические исследования, то становится очевидной необходимость весьма высокой производительности методов. С другой стороны, к ним предъявляется требование минимального материала для анализа, связанное с трудоемкостью выделения монофракций. Этим требованиям отвечают пока немногие методы (спектральный анализ, ИК-спектроскопия и некоторые другие).

Вторая проблема — автоматизация диагностики на всех этапах, начиная от выделения минералов, измерения их свойств и кончая сравнением с эталонами. В настоящее время создается немало различных полуавтоматических и автоматических информационно-диагностических систем [53]. Конечная задача заключается в создании общесоюзной единой автоматической минералогической информационно-диагностической системы (ЕАМИДС), на которую замыкались бы все ведомственные системы и имели бы прямой выход все минералоги, имеющие дело с диагностикой.

Третья проблема — создание методов полевой диагностики минералов. Сложность и неоперативность существующих диагностических систем не позволяют получать диагностическую информацию в процессе полевых работ, необходимую для корректировки их методики и уточнения направлений. Полевых же методов диагностики, кроме визуального, сейчас практически нет. Популярным в прошлом методом паяльной трубки, обеспечивавшим «минералогическую культуру» полевых геологических работ, сейчас не только геологи, но и минералоги не умеют пользоваться, да этот метод и не отвечает современным требованиям. Поэтому в последнее время резко участились случаи минералогических ошибок, в том числе и очень серьезных, вызывающих отрицательные технологические и геолого-экономические последствия. Из-за плохой диагностики минералов было пропущено не одно крупное месторождение. Необходимость создания современных полевых минералогодиагностических приборов и лабораторий стала настолько актуальной, что решать ее надо немедленно.

Разработку методов и средств полевой диагностики минералов, по нашему мнению, необходимо вести в двух, ни в коем случае не исключаящих друг друга направлениях:

1) разработать специальные полевые диагностические методы, отличающиеся экспрессностью, простотой, универсальностью, компактностью и позволяющие надежно диагностировать любые минералы в отдельных зернах (т. е. нужно создать современный вариант метода паяльной трубки и микрохимических реакций, модернизированный на основе последних достижений минералогической диагностики);

2) разработать полевые варианты основных приборов, которыми оснащаются стационарные лаборатории, в частности дифрактометров, спектрографов и т. п., с целью укомплектования ими полевых передвижных лабораторий.

Цель разработок первого направления — избежать ошибки в диагностике минералов, а второго — оперативное массовое получение количественных диагностических констант, по точности измерения сопоставимых с константами получаемыми в стационарных лабораториях. Последнее требование определяется необходимостью формирования единых массивов из цифр, полученных в полевых и в стационарных лабораториях, для их математической обработки.

Диагностике минералов в топоминералогических исследованиях нужно уделять самое серьезное внимание. Сейчас важность ее явно недооценивается, так как при повторных исследованиях отдельных объектов только за счет исправления старых диагностических ошибок (не считая открытия новых минералов) минералогический кадастр увеличивается на 10—20%.

С задачей диагностики минералов непосредственно связана еще одна исключительно важная задача кадастросоставительской работы — *задача количественного определения содержания минералов* в изучаемых объектах.

Методическая сторона решения этой задачи хорошо разработана на примере оценки рудных объектов и не вызывает особых затруднений. Основные трудности связаны с неравномерной изученностью отдельных объектов, входящих в изучаемый объект. Например, могут быть с разной степенью детальности изучены породы и минеральные тела, слагающие тот или иной регион: для одних минеральный состав охарактеризован точными количественными показателями, для других лишь качественно, третьи вообще не исследованы. Кроме того, выделение элементарных объектов не всегда может быть выполнено строго, возникают также затруднения в определении объемного вклада каждого элементарного объекта в сложный объект. Поэтому, несмотря на очень тщательное количественное минералогическое изучение отдельных объектов, мы иногда не можем получить даже приближенное количественное представление о содержании минералов в объекте.

Необходимым уровнем изученности является такой, когда все элементарные объекты исследованы с достаточной для дан-

ного масштаба степенью детальности и проведена количественная оценка их минерального состава. Тогда содержание отдельных минералов в сложном объекте можно будет определить методом среднего взвешенного:

$$C = \frac{\sum c_i a_i}{\sum a_i},$$

где  $C$  — содержание минерала в сложном объекте;  $c_i$  — содержание минералов в элементарных объектах, слагающих сложный объект;  $a_i$  — объемы (площади, веса) элементарных объектов.

Элементарные объекты, имеющие различную геологическую природу, требуют определенных методических особенностей при их изучении. Эти особенности определены в специальной методической литературе, поэтому здесь рассмотрены лишь самые основные.

В областях развития осадочных пород необходим существенно различный подход к изучению карбонатных, сульфатных и терригенных пород. Главные минералы карбонатных и сульфатных пород легко определяются и подсчитываются в прозрачных шлифах, но их изучение недостаточно. Существенную информацию дают акцессорные аутигенные и аллотигенные минералы, определяемые в нерастворимых осадках. При изучении терригенных пород целесообразно выделять зернистые и глинистые фракции, изучение которых требует специальных методик. Большое значение имеет изучение тяжелых минералов, выделенных сепарацией в тяжелых жидкостях, так как на их основе решаются вопросы об областях сноса.

Для изучения минералогии магматических и метаморфических пород традиционно ведущими являются оптические методы — изучение в прозрачных шлифах. Для изучения акцессорных минералов используется метод искусственных шлихов (или метод протолочек). Для корректировки данных о количественном минеральном составе широко применяется пересчет химических анализов на минеральный состав. Эта операция позволяет исправить диагностические ошибки и ошибки в определении содержаний отдельных минералов.

Гидротермальные образования исследуются в основном теми же методами, что и магматические породы, но также некоторыми другими. Так, относительная крупнокристалличность образования определяет высокую эффективность изучения шлифов и полировок, а широкое распространение в них сульфидов и других, непрозрачных минералов требует постановки исследования полированных шлифов в отраженном свете.

Коры выветривания характеризуются тонкой дисперсностью слагающих их минералов, поэтому оптические методы оказываются, как правило, малоэффективными для изучения их

минерального состава. В качестве основных используются более информативные для таких объектов методы электронной микроскопии, дифрактометрия, ИК-спектроскопия, термический анализ и др.

При разработке методических подходов к изучению минерального состава тех или иных топоминералогических объектов нужно исходить, так же как и при диагностике, из информативности, надежности, производительности и стоимости методов, аналитически и экспериментально подбирая наиболее оптимальные варианты.

## **ФОРМА МИНЕРАЛЬНЫХ КАДАСТРОВ**

Рассмотрев общие методические принципы сбора материалов для составления минералогического кадастра, обсудим вопрос о способах представления кадастрового материала, о форме кадастра.

Минеральные кадастры топосов представляются сейчас в самых различных формах, от простых списков минералов до целых томов с подробным перечислением и характеристикой всех находок минералов (подобно разбиравшимся в главах I и II кадастрам Кратохвила [65] по Чехословакии и кадастрам Радулеску и Димитреску [68] по Румынии). Такое разнообразие оправдывается, очевидно, различными целями исследований.

В настоящее время наиболее обычная форма минерального кадастра, которая используется в подавляющем большинстве топоминералогических работ, табличная. Основу кадастровой таблицы составляет полный список в данном топосе минералов, представленный в соответствии с современной кристаллохимической классификацией. В других графах таблицы содержатся данные о распространенности каждого минерала в элементарных системах топоса и во всем сложном топосе. В зависимости от уровня изученности эти данные могут быть выражены точными цифрами в процентах, полуколичественными показателями в 3-, 5- и 10-балльной шкалах, качественными показателями («есть», «нет» или «+», «—»). Типом шрифта или специальными значками выделяются минералы, впервые открытые в районе или, наоборот, дискредитированные, недостаточно точно диагностированные, сомнительные и другие минералы, представляющие практический интерес. Могут включаться и другие сведения, не перегружающие, однако, кадастр.

Общим требованием к минеральным кадастрам является требование максимума минералогической информации при минимуме объема и удобства работы с кадастром.

Многолетний опыт топоминералогических исследований автора привел нас к наиболее рациональной форме — двойному кадастру. Своеобразное введение к кадастру составляет сжатый каталог-перечень минералов, представленный в виде

только что разобранной таблицы. За ним следует собственно кадастр в виде предельно сжатых (реферативных) характеристик минералов, содержащих данные об их распространенности, составе, свойствах, типоморфных особенностях, взаимоотношениях с другими минералами. Они сопровождаются ссылками на основные литературные источники. Оптимальный объем кадастровых характеристик минералов от 0,25 до 1 машинописной страницы. При их составлении максимально должны использоваться общепринятая символика и стандартные сокращения. Оперативные кадастры можно вести на карточках или перфокартах. Такой минеральный кадастр типичного топо-минералогического объекта вместе с каталогом должен иметь общий объем около 1—2 печ. л., представляя всю необходимую информацию о минералах данного объекта.

### **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МИНЕРАЛЬНЫХ КАДАСТРОВ**

Цель минерального кадастра — представление предельно лаконичной информации о минералогических особенностях того или иного объекта. К сожалению, в минералогической и геологической практике минеральные кадастры объектов используются пока ограниченно, в основном для облегчения ориентировки в их сложном минеральном инвентаре. Информация же, содержащаяся в кадастрах, весьма обширна. Ее анализ позволяет решать важные минералогические проблемы. Минеральные кадастры, в частности, содержат весь необходимый материал для сравнительного анализа минералогических провинций. На этой проблеме мы остановимся несколько подробнее.

Сравнение минералогических провинций можно проводить по целому ряду показателей, выводимых из кадастровых данных: по числу минеральных видов, содержанию минералов, соотношению конституционных (кристаллохимических) типов, по их симметрии, химизму и т. д. Рассмотрим возможности сравнительного анализа кадастровых данных на примере ряда относительно хорошо изученных минералогических провинций, характеризующихся различным геологическим строением и различной минералогической спецификой: Донецкого бассейна [28], Криворожского бассейна [30], Пайхойско-Южноновоземельской провинции [61]. Рудного Алтая [34]. Ловозерского щелочного массива [47]. Хибинского щелочного массива [33], щелочных массивов Карелии и Кольского полуострова [18], щелочного комплекса Вишневых гор [14], пегматитов Вольны [29], гранитных пегматитов Кольского полуострова, пегматитов Изумрудных Копей [7]. Кроме того, для сравнений использовались кадастровые данные по крупным регионам: Узбекской ССР [36], Румынии [68], Болгарии [67], а также средние данные по земной коре. Нетрудно заметить, что эти провинции группируются в четыре типа: а) с преобладанием

седиментогенных, гидротермальных и телетермальных минеральных комплексов («рудный» тип); б) с преобладанием щелочных магматогенных комплексов; в) с преобладанием пегматитовых комплексов; г) сложные регионы с гетерогенными минеральными комплексами.

Сравнение минералогических провинций *по числу минеральных видов* отчетливо показывает различие выделенных выше типов провинций по этому признаку. Так, видовой показатель «рудных» провинций типа (а)—около 180—200 видов, щелочных типа (б)—около 200—300 видов, пегматитовых типа (в)—около 100—150 видов. Для стран со сложным геологическим строением видовой показатель превышает 600. Следовательно, сравнивая реальные показатели изучаемых объектов с типовыми показателями, можно оценить их изученность. Очевидно, что Пайхойско-Южновоземельская провинция, где описано около 160 минералов, имеет значительный резерв для пополнения кадастра, поскольку близкая к ней по минералогическому облику провинция Донецкого бассейна характеризуется 184 минералами, а провинция Рудного Алтая—196 (табл. 6). Выяснилось также, что уровень минералогической изученности Болгарии по состоянию на 1964 г. вдвое ниже, чем уровень изученности Узбекистана в 1975 г. (видовые показатели 259 и 667 соответственно). Этот вывод, вытекающий из сравнения кадастров, подтверждается открытием в Болгарии в два последние десятилетия нескольких сот новых для этой страны минералов. Таким образом, видовой показатель минерального кадастра объекта является не только типоморфным показателем, характеризующим его генетический тип, но и показателем уровня его изученности.

Сравнение топоминералогических объектов *по количественному минеральному составу* наиболее эффективно для объектов низких порядков: отдельных минеральных тел, отдельных месторождений, типов пород, интрузивных массивов и т. п. При переходе к более сложным индивидуальность их по минеральному составу все более сглаживается и мы имеем вначале состав среднего типа преобладающих в регионе пород (осадочных или магматических, см. таблицу в гл. II), а затем средний минеральный состав земной коры (см. рис. 4). Происходит то же явление, что и при выводе кларков в геохимии. Однако получение средних количественных минералогических показателей по целым провинциям весьма интересно и полезно, так как в результате столь широкого усреднения сохраняются наиболее специфические черты, которые могут быть положены в основу типизации провинций. К сожалению, при современном уровне изученности мы не можем вывести этот показатель для провинций, выбранных нами в качестве примера.

Сравнение объектов *по конституционным показателям* проводится на основе распределений минералов, входящих в со-

Число минеральных видов и энтропии их распределения в ряде минералогических регионов

Минералогический регион	Число минералов $n$	Энтропия распределения, бит		
		по кристаллохимическим классам $N_{кх}$	по сингониям $N_c$	по видам симметрии $N_{в.с}$
Донецкий бассейн	184	3,18	2,60	3,75
Криворожский бассейн	163	2,69	2,56	3,58
Пайхойско-Южновоземельская провинция	160	2,90	2,70	3,83
Рудный Алтай	196	3,01	2,49	3,57
Ловозерский щелочной массив	276	1,82	2,61	3,54
Хибинский щелочной массив	194	2,26	2,66	3,92
Щелочные массивы Карелии и Кольского полуострова	204	2,17	2,60	3,89
Щелочной комплекс Вишневых гор	126	2,45	2,55	3,74
Пегматиты Волыни	91	2,55	2,64	3,54
Пегматиты гранитные Кольского полуострова	159	2,50	2,57	3,44
Пегматиты Изумрудных Копей	79	2,16	2,58	3,29
Узбекская ССР	667	3,16	2,55	3,47
Румыния	365	2,74	2,51	3,57
Болгария	295	2,78	2,52	3,51
Земная кора	1950	3,46	2,56	3,69

став сравниваемых объектов, по рангам общепринятой кристаллохимической классификации (обычно по классам). Выводимые из кадастров рассматриваемых нами провинций соответствующие конституционные показатели приведены в табл. 7. По ним довольно отчетливо выступает специфика различных типов провинций.

«Рудные» провинции (тип «а») характеризуются наиболее высоким сульфидным показателем (16,5—23,8) и соответственно низкими окисным (13,7—15,0) и силикатным (26,4—44,2) показателями. Для них характерна наиболее высокая доля сульфатов и простых веществ. По всем показателям «рудные» провинции очень близки к сложным регионам — странам (сульфиды 14,1—28,9; окислы 12,7—14,5; силикаты 28,6—36,9; сульфаты 5,9—9,9) и ближе других провинций подходят к средним показателям земной коры (сульфиды 11,76; окислы 13,4;

Распределение минеральных видов в минералогических регионах по классам

Минералогический регион	Простые вещества	Карбиды, нитриды и фосфида	Арсениды, антимониды, висмутиды	Теллуриды	Сульфиды и селениды	Оксиды	Гидроксиды и оксигидраты	Силикаты	Бораты	Ванадаты
Донецкий бассейн	7,14	—	—	—	19,23	10,92	2,75	26,37	3,30	—
Криворожский бассейн	4,91	0,61	—	—	16,56	8,59	5,52	44,17	—	—
Пайхойско-Южноновоземельская провинция	4,38	0,62	—	—	23,75	12,5	2,50	33,12	—	0,62
Рудный Алтай	4,61	—	0,51	1,54	22,05	10,26	3,59	31,80	—	—
Ловозерский щелочный массив	—	—	0,72	—	4,71	13,04	3,99	64,49	—	—
Хибинский щелочной массив	2,59	—	1,04	—	8,81	13,47	3,11	56,48	—	—
Щелочные массивы Карелии и Кольского полуострова	—	—	—	—	5,88	10,29	—	54,41	—	—
Щелочные комплексы Вишневых гор	—	—	—	0,79	10,32	19,84	7,94	45,24	—	—
Пегматиты Волыни	—	—	—	—	9,89	14,29	3,30	46,15	1,10	—
Пегматиты гранитные Кольского полуострова	—	—	—	—	7,60	17,72	6,33	45,57	—	—
Пегматиты Изумрудных Копей	3,90	—	—	—	14,29	15,58	2,60	50,65	—	—
Узбекская ССР	3,90	0,30	1,05	2,10	14,09	9,14	4,35	34,93	1,65	1,80
Румыния	3,58	—	0,28	0,83	28,93	10,47	2,20	28,65	0,83	—
Болгария	4,48	—	—	1,03	20,00	11,03	3,45	36,90	0,34	—
Земная кора	1,71	0,47	1,83	1,42	11,76	9,28	4,08	24,17	5,08	2,36

## кристаллохимической классификации

Арсенаты	Фосфаты	Теллуриды и селениды	Вольфраматы и молибдаты	Хроматы и селенаты	Сульфаты	Карбонаты	Иодаты	Нитраты	Хлориды, бромиды, иодаты	Оксихлориды и оксифториды	Фториды
—	3,85	—	—	—	15,39	6,59	—	0,55	3,30	—	0,55
0,61	1,84	—	0,61	—	7,98	7,98	—	—	—	—	0,61
0,62	3,12	—	1,25	—	8,75	7,5	—	—	0,62	—	0,62
1,03	3,59	—	1,03	—	8,72	9,23	—	—	1,54	—	0,51
—	5,80	—	0,36	—	1,45	3,62	—	—	0,36	—	1,45
—	3,63	—	—	—	1,04	7,77	—	—	0,52	—	1,55
—	5,39	—	—	—	2,94	9,80	—	—	—	—	0,49
—	4,76	—	0,79	—	3,97	6,35	—	—	—	—	0,79
—	6,59	—	1,10	—	4,40	6,59	—	—	2,20	—	4,40
0,63	13,92	—	—	—	0,63	0,80	—	—	0,63	—	0,63
—	1,30	—	1,30	—	—	9,10	—	—	—	—	1,30
2,85	3,75	0,60	1,05	0,45	8,25	7,35	—	—	1,95	—	0,45
2,20	5,23	—	0,28	—	9,92	4,96	—	0,28	1,10	—	0,28
2,41	6,55	—	1,38	—	5,86	6,90	—	0,34	0,69	—	0,34
5,67	9,75	0,65	0,83	0,65	9,16	4,73	0,29	0,53	1,83	2,36	1,36

силикаты 24,2; сульфаты 9,1), что указывает на их минералогически полигенный характер.

Щелочные (тип «б») и пегматитовые (тип «в») провинции близки между собой и отличаются от «рудных» высокими окисными (16,5—27,8 и 17,6—24,1 соответственно) и силикатными (45,2—64,5 и 45,6—50,6) показателями. Сульфидный показатель щелочных провинций (4,7—10,3) несколько ниже, чем пегматитовых (7,6—14,3). Для тех и других нехарактерны простые вещества и большее разнообразие фосфатов и фторидов. По всем этим показателям можно сделать вывод о преобладании одного минералообразующего процесса в формировании облика этих провинций.

Сравнение топоминералогических объектов *по типам кристаллических структур* слагающих минералов можно проводить на основе анализа распределений минералов по 32 видам симметрии или в более обобщенном виде по сингониям.

И. И. Шафрановский [59] детально разрабатывал эту проблему для земной коры в целом и установил ряд очень важных закономерностей в распределении минеральных видов по сингониям и видам симметрии, которые отражают эволюцию структуры минерального вещества. Не проводя из-за громоздкости аналитических данных детальный анализ распределения по видам симметрии, отметим, что данные по всем провинциям подтверждают установленные И. И. Шафрановским [59] закономерности резкого преобладания в каждой сингонии минералов, относящихся к планаксиальным видам симметрии. За ними по числу видов следуют центральные и планальные виды.

Специфика отдельных провинций при столь дробном расчленении минерального кадастра проявляется не очень отчетливо (рис. 11).

Отчетливые особенности провинций устанавливаются в результате анализа на более общем уровне распределения минеральных видов по сингониям (табл. 8). Важно отметить, что нашими данными полностью подтверждается установленный И. И. Шафрановским [59] для земной коры ряд:

М - Р - К - Т Р - ТЕТ — Г — ТРИК,

в котором сингонии перечисляются в порядке уменьшения числа входящих в них минеральных видов. Точно такими же рядами, даже с довольно близкими цифрами процентных соотношений, характеризуются геологически и минералогически гетерогенные регионы, выделяемые по административному

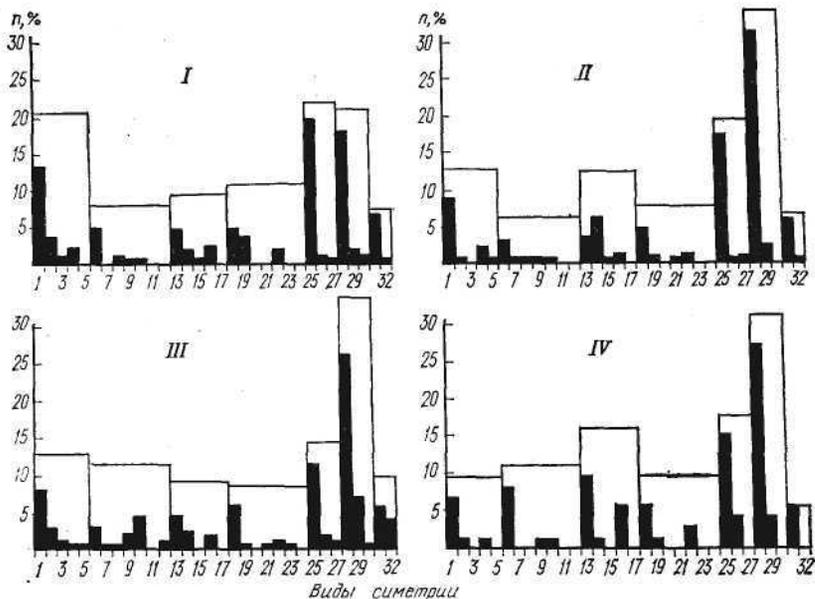


Рис. 11. Распределение минеральных видов по видам симметрии и сингониям для различных типов минералогических провинций:

I — Пайхойско-Южновоземельская провинция; II — Криворожский бассейн; III — Ловозерский щелочной массив; IV — Изумрудные Копи. Сингонии и виды симметрии. Кубическая:

1 —  $O_h - m3m$ ; 2 —  $T_d - 43m$ ; 3 —  $O - 432$ ; 4 —  $T_h - m^3$ ; 5 —  $T - 23$ . Гексагональная: 6 —  $D_{6h} - 6/mmm$ ; 7 —  $D_{3h} - 62$ ; 8 —  $C_{6v} - 6mm$ ; 9 —  $D_6 - 622$ ; 10 —  $C_{6h} - 6/m$ ; 11 —  $C_{3h} - 6$ ; 12 —  $C_6 - 6$ . Тригональная: 13 —  $D_{3d} - \bar{3}m$ ; 14 —  $C_{3v} - 3m$ ; 15 —  $D_3 - 32$ ; 16 —  $C_{3i} - \bar{3}$ ; 17 —  $C_3 - 3$ . Тетрагональная: 18 —  $D_{4h} - 4/mmm$ ; 19 —  $D_{2d} - 42m$ ; 20 —  $C_{4v} - 4mm$ ; 21 —  $D_4 - 422$ ; 22 —  $C_{4h} - 4/m$ ; 23 —  $S_4 - 4$ ; 24 —  $C - 4$ . Ромбическая: 25 —  $D_{2h} - mmm$ ; 26 —  $C_{2v} - mm2$ ; 27 —  $D_2 - 222$ . Моноклиная: 28 —  $C_{2h} - 2m$ ; 29 —  $C_s - m$ ; 30 —  $C_2 - 2$ . Триклинная: 31 —  $C_1 - \bar{1}$ ; 32 —  $C_1 - 1$

принципу (страны). Для главных типов минералогических провинций характерны следующие ряды:

Р — М — К — ТР, ТЕТ, Г — ТРИК „рудные“ провинции (а’);

М — Р — К — ТР — ТЕТ — Г — ТРИК — (а’);

М — Р — К — Г — ТЕТ — ТР — ТРИК — „щелочные“ провинции (б);

М — Р — К — ТЕТ — ТР — Г — ТРИК — пегматитовые провинции (в).

Почти все эти ряды характеризуются одинаковой последовательностью первых трех членов, и различия провинций определяются средними членами рядов: в «рудных» тригональные минералы преобладают над тетрагональными и гексагональными, в щелочных, наоборот, — гексагональные, в пегматитовых —

Распределение минералов в минералогических регионах по сингониям

Минералогические регионы	Кубическая К <sub>3</sub>	Гексагональная Г	Тригональная ТР	Тетрагональная ТЕТ	Ромбическая Р	Моноклиновая М	Триклинная ТРИК
Донецкий бассейн	21,47	6,78	11,86	6,78	24,29	23,16	5,65
Криворожский бассейн	13,16	5,92	12,50	7,89	19,74	34,21	6,58
Пайхойско-Южноновоземельская провинция	20,64	7,74	9,68	10,97	21,94	21,29	7,74
Рудный Алтай	13,22	5,75	12,64	8,62	24,14	32,18	3,45
Ловозерский щелочной массив	13,06	11,71	9,01	8,56	14,41	33,78	9,46
Хибинский щелочной массив	14,71	10,00	10,00	8,24	15,82	30,00	11,18
Щелочные массивы Карелии и Кольского полуострова	12,78	7,78	12,22	10,00	15,56	35,00	6,67
Щелочные комплексы Вишневых гор	15,13	10,92	9,24	10,08	20,17	31,93	2,52
Пегматиты Волыни	12,94	9,41	10,58	11,76	21,18	28,24	5,88
Гранитные пегматиты Кольского полуострова	16,55	8,28	8,28	11,03	20,00	31,03	4,83
Пегматиты Изумрудных Копей	9,46	10,81	16,22	9,46	17,57	31,08	5,40
Узбекская ССР	13,46	7,06	13,30	7,72	22,17	30,87	5,42
Румыния	15,20	4,56	11,25	7,60	24,01	32,52	4,86
Болгария	15,04	5,26	10,53	9,40	23,68	30,83	5,26
Земная кора	14,38	7,29	10,21	9,38	21,67	30,26	6,82

тетрагональные (однако среди пегматитовых провинций Изумрудные копи стоят несколько особняком). Имеются отчетливые различия и в количественных соотношениях (см. табл. 8).

«Рудные» провинции очень резко дифференцированы по симметричному показателю на два подтипа. Первый подтип (а') образуют Донецкий бассейн и Пайхойско-Южноновоземельская провинция. Он характеризуется ведущей ролью ромбических минералов, число которых даже превышает число моноклинных, а также наиболее высокой из всех провинций долей кубических минералов. Это наиболее «высокосимметрич-

ный» тип провинции. Второй подтип (а"), объединяющий Криворожский бассейн и Рудный Алтай,— обычный «низкосимметричный», его сингонийный ряд аналогичен ряду земной коры. Если опираться на закон Федорова—Грота о связи симметрии и состава минералов и на эволюционные закономерности А. Е. Ферсмана и И. И. Шафрановского, то можно предположить прохождение через юную стадию минералогических провинций подтипа (а') и более зрелый возраст провинций подтипа (а"). Следовательно, «симметричные» данные кадастра могут рассматриваться и как источник эволюционной информации.

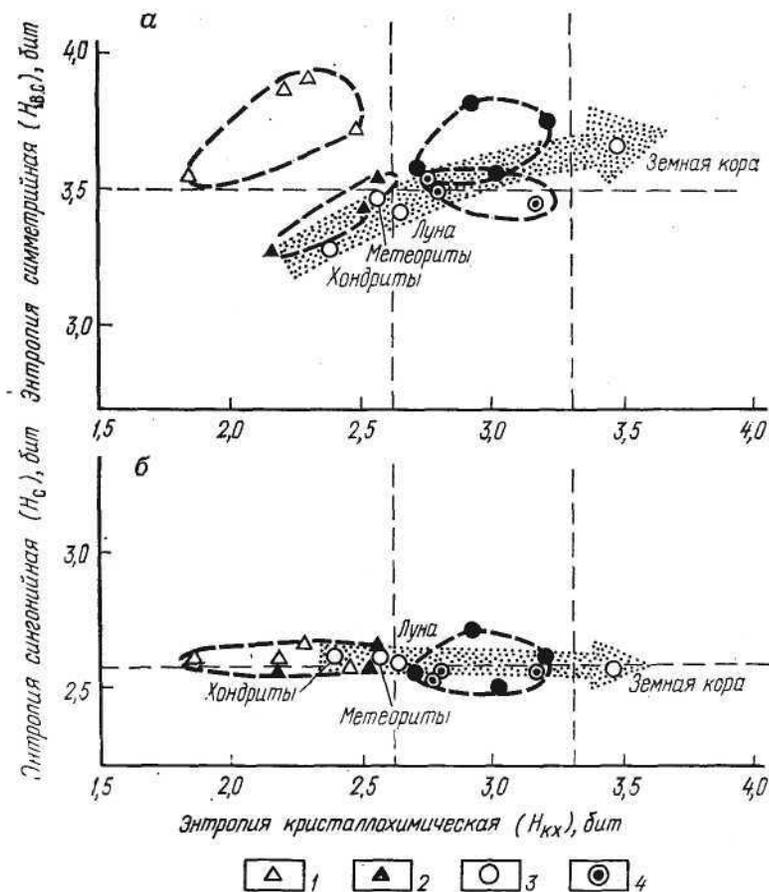
Очевидно, рассмотренными здесь в качестве примера показателями не ограничивается информативность минерального кадастра. А. С. Уклонский, а вслед за ним и многие другие геохимики решают целый ряд задач на основе анализа минеральных форм существования химических элементов, сравнивая объекты *по числу и видам минералов того или иного элемента*. Можно назвать и другие показатели, в частности плотность размещения атомов или структурную рыхлость минералов (см. гл. II), перспективность использования которых очевидна. Здесь, однако, ограничимся рассмотренными показателями, обратив внимание еще на один методический подход: сравнение не самих показателей, а неоднородностей их распределения, выражающихся через энтропию.

Сравнение геологических объектов *по энтропии кадастровых характеристик* осуществляется в условиях максимального сжатия минералогической информации и отражает наиболее высокий уровень обобщения.

Методы расчета информационной энтропии подробно изложены в книге автора по теории минералогии [60] и в специальной литературе. Поэтому здесь отметим лишь, что величина энтропии какого-то показателя является мерой сложности, неорганизованности системы по этому показателю; следовательно, по изменению энтропии системы можно судить о характере ее эволюции.

Данные по кристаллохимической и симметричной энтропии минералов рассматриваемых объектов, приведенные в табл. 6, подтверждают отмечавшуюся ранее специфику различных типов минералогических провинций. Рассмотрим, например, энтропию распределения минералов по кристаллохимическим классам и по видам симметрии.

Для большей наглядности эти данные отражены графически на рис. 12, а. Как видно из рисунка, фигуративные точки энтропий  $H_{кх}$  и  $H_{в.с.}$  наших модельных провинций группируются в четырех полях, строго соответствующих различным типам провинций. Границами полей являются значения энтропии  $H_{кх} = 2,6$  и  $H_{в.с.} = 3; 5$  бит. Поля пегматитовых и щелочных провинций находятся в низкоэнтропийной по кристаллохимиче-



**Рис. 12. Поля распределения минералогических провинций:**

*а* — в координатах  $H_{кх}—H_{вс}$ ; *б* — в координатах  $H_{кх}—H_{с}$  (стрелкой показана общая тенденция космогенной эволюции минерального вещества). 1 — «щелочные» провинции; 2 — «пегматитовые» провинции; 3 — «рудные» провинции; 4 — сложные регионы (страны)

скому показателю области диаграммы ( $H_{кх}$  от 1,82 до 2; 55 бит); поля «рудных» провинций и сложных регионов — в высокоэнтропийной ( $H_{кх}$  = от 2,69 до 3,18 бит). Естественным пределом является величина энтропии земной коры  $H_{кх}$  = 3,46 бит (по другим оценкам 3,64 бит). Если система мономинеральна, ее энтропия обращается в ноль. Процессы минеральной дифференциации ведут к снижению энтропии, процессы смешения — к возрастанию. Таким образом, низкоэнтропийные провинции генетически однородны, высокоэнтропийные гетерогенны. «Рудные» провинции, как видно из диаграммы, характеризуются значительной гетерогенностью; их минералогический

облик сформирован минералообразующими процессами разной генетической природы.

По энтропии видов симметрии щелочные и «рудные» провинции являются относительно высокоэнтропийными; пегматитовые провинции и сложные регионы — низкоэнтропийными. Причины этой дифференциации пока неясны: вероятнее всего, она является следствием различий в термодинамических условиях кристаллизации.

Энтропийный анализ распределений минералов по сингониям (см. рис. 12, б) не раскрывает отмеченных выше различий, и провинции дифференцируются на две большие группы только по величине  $H_{кх}$ , хотя общие тенденции распределения фигуративных точек в полях сохраняются такими же, как и при анализе на уровне видов симметрии.

Сравнительный анализ энтропии кадастровых показателей открывает, таким образом, новые возможности для установления общих топоминералогических, генетических и эволюционных закономерностей минерального мира.

Заканчивая этот обзор принципов составления и структуры минералогических кадастров, мы должны еще раз подчеркнуть их исключительно важное значение для топоминералогических операций и обратить внимание на далеко не удовлетворительное использование кадастровой информации. Может быть, именно из-за недооценки минеральных кадастров они составляются лишь эпизодически, для отдельных топоминералогических объектов. Отсутствие даже качественных кадастров для большинства минералогических провинций не дает возможности проведения их сравнительного анализа и является главным препятствием на пути создания научной типизации и классификации провинций.

## ГЛАВА VI

### ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ, СОСТАВА И СВОЙСТВ МИНЕРАЛОВ

Комплексное изучение всех встречающихся в районе минералов представляет собой весьма ответственную и наиболее трудоемкую часть топоминералогического исследования. Цель его — диагностика минералов, определение их пространственной изменчивости, использование минералов как источников генетической информации, как индикаторов рудоносности, выявление полезных качеств минералов и определение их практической ценности и т. п. Поэтому посвятим данную главу не столько

характеристике минералов (такая информация содержится в минералогических учебниках и многочисленных руководствах), сколько анализу различных вопросов, связанных с решением топоминералогических задач.

## **ОБЗОР КОНСТИТУЦИОННЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ И СВОЙСТВ МИНЕРАЛОВ**

Минералогии изучают весьма широкий комплекс свойств минералов. Собственно все методы физики и химии твердого тела в той или иной степени использовались в минералогии. Обзор их давался неоднократно.

### **Конституция минералов**

*Химический состав:* содержание главных минералообразующих элементов, кристаллохимическая формула, элементы-примеси (структурные и неструктурные), природа элементов-примесей (изоморфные, тип изоморфизма, связанные с протогенетическими, сингенетическими и эпигенетическими включениями других минералов, связанные с газовой-жидкими включениями и т. п.), характер распределения элементов, корреляции, изотопный состав элементов.

*Кристаллическая структура:* пространственная группа, дебаеграмма, параметры элементарной ячейки, число формульных единиц, рентгеновская плотность, тип структуры, координаты атомов, структурные дефекты.

*Морфология:* размеры, облик, габитус, простые формы и их относительная степень развития, соотношения размеров граней разных простых форм и одной и той же формы, сингония, вид симметрии, идеальная и реальная симметрии, особенности отклонения от идеальных моделей, скульптура граней, формы роста и разрушения.

*Анатомия:* зональность, секториальность, мозаичность, включения, структуры «отдыха» и метаморфизма.

### **Свойства минералов**

*Физико-химические:* энтальпия, энтропия, изобарный потенциал, растворимость, реакция на различные химические испытания, электрохимические свойства, гидрофильность, гидрофобность.

*Гравитационные:* плотность, пористость, объемный вес.

*Механические:* упругость, пластичность, ползучесть, хрупкость, твердость (вдавливания, микровдавливания, царапания и стирания, шлифования и т. п.), наклеп, упрочнение.

*Термические:* теплоемкость, теплопроводность, термомагнитные и термоэлектрические, а также физические и химические

изменения при нагревании в различных атмосферах, газовыделение при нагревании.

*Электрические:* электропроводность, диэлектрическая проницаемость, диэлектрические потери, тип проводимости, пирозлектрические, трибоэлектрические, электрокалорические, термоэлектрические, фотоэлектрические и другие свойства, контактная термоэдс.

*Магнитные:* магнитная восприимчивость и проницаемость, гистерезисные свойства (остаточная намагниченность, магнито-стрикция), магнитотермический эффект (точка Кюри), термомагнитные и магнитооптические свойства.

*Оптические:* отражение и пропускание света различных длин волн (в том числе спектроскопия в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной областях спектра), окраска, преломление света, поляризация отраженного и проходящего света, вращение плоскости поляризации, двуотражение, люминесценция при различном возбуждении (фото-, термо-, рентгено-, радио-, катодо-, хеми-, триболюминесценция), электрооптические свойства (эффект Керра), магнитооптические свойства (эффект Коттона—Мутона).

*Электронные* (кроме оптических): электронный парамагнитный резонанс, ядерный магнитный резонанс, эффект Мессбауэра (ядерный гамма-резонанс).

*Прочие свойства:* радиоактивность ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) естественная и наведенная, акустические свойства, взаимодействие с радиоактивным, электромагнитным, рентгеновским излучением, с электронным лучом, лазерным лучом и другими видами внешнего тестового воздействия и т. д.

Поскольку минералы имеют кристаллическую структуру, т. е. характеризуются регулярным расположением слагающих их атомов, они отличаются от минералоидов и других некристаллических твердых тел анизотропией свойств. В связи с этим вводится ряд понятий, отражающих анизотропию свойств: индикатриса свойств (например, оптическая индикатриса), коэффициенты анизотропии, значения свойств в единичных направлениях с указанием этих направлений, значения свойств в случайных направлениях с соответствующей оговоркой и т. п.

Требования к характеристике свойств минералов, их выражению, представлению в обобщениях и публикациях в настоящее время стандартизированы и изложены в соответствующих рекомендациях Международной минералогической ассоциации.

Для характеристики минералов наиболее широко используются данные об их химическом составе (на основе химического и спектрального анализов), рентгеноструктурные данные (индексированные или неиндексированные дебаеграммы, параметры элементарной ячейки), оптические свойства (показатели преломления и их анизотропия, отражательная способность). Это связано с высокой информативностью перечисленных ха-

рактических и всеобщим овладением методами их получения, простотой и хорошим освоением соответствующей аппаратуры, которая имеется в любых минералогических лабораториях. Другие свойства минералов используются более ограниченно, главным образом в специализированных исследованиях, проводимых хорошо оснащенными лабораториями.

## ВЗАИМОСВЯЗЬ КОНСТИТУЦИИ И СВОЙСТВ

Химический состав, кристаллическая структура, морфология и свойства минералов функционально взаимосвязаны; точнее, свойства выражают конституцию или конституция проявляется через свойства. Между различными свойствами поэтому также существует определенная взаимосвязь. Например, минералы с высокой электропроводностью обладают хорошей теплопроводностью и высокой отражательной способностью, и электропроводность  $\gamma$  можно примерно рассчитать исходя из средней отражательной способности  $R$  (в %) по эмпирическому уравнению Бейсева—Эстерле—Серебрякова:

$$\gamma = 10 \frac{R / 100 - 0,24}{0,045} - 7, \quad 1/\text{Ом} \cdot \text{см.}$$

Теоретически количественные значения любого свойства минерала можно вычислить на основе данных об его составе и кристаллической структуре. Специальные исследования в этом направлении проводятся достаточно широко, и в физике твердого тела, и в минералогии, разработано немало простых и сложных расчетных методов для определения почти всех свойств. Они дают иногда довольно точные результаты, но в целом состояние теории и методов расчета еще далеко неудовлетворительное. Трудности связаны с несовершенством теории конституции минералов, которая разработана лишь для идеальных кристаллов и дает только качественную характеристику дефектов кристаллической структуры. А именно дефекты определяют многие свойства минералов.

Для определения твердости, например, А. С. Поваренных исходя из кристаллохимической теории разработал вполне совершенное расчетное уравнение, в которое для приближения к реальной структуре минералов ввел целый ряд эмпирических коэффициентов:

$$H = aK \frac{aVEK_{\text{кат}} + bVEK_{\text{ан}}}{a + b},$$

где  $H$  — твердость по Моосу;  $a$  — структурный коэффициент, равный 1 для решеток типа NaCl и 0,7 для решеток типа ZnS;  $K$  — коэффициент пропорциональности, повышающийся от 5

до 9 с увеличением твердости;  $a$  и  $b$  — числа катионов и анионов;  $VEK$  — веки Ферсмана.

Однако это уравнение позволяет определить твердость лишь приблизительно, на уровне 10-балльной шкалы Мооса, и дальнейшее его совершенствование на основе современных кристаллохимических представлений бессмысленно. Твердость в значительной степени зависит от дислокационной структуры минералов, и, пока кристаллохимическая теория не будет учитывать количество, распределение и свойства дислокаций, а эти данные не будут определяться в процессе изучения минералов, точность расчета твердости на ее основе существенно не повысится.

То же в большей или меньшей степени относится и ко всем другим свойствам. Несколько лучше обстоит дело с расчетом свойств различных членов совершенных или несовершенных изоморфных рядов. Зависимость свойств от состава в этих рядах описывается прямолинейным законом аддитивности, известным как правило Вегарда. Однако это правило справедливо лишь для довольно грубых оценок и точные измерения свойств всегда свидетельствуют об отклонениях от этого правила, о криволинейных зависимостях «состав—свойство». Да и теоретически прямые зависимости в изоморфных рядах невозможны, так как при смешивании двух компонентов неизбежно должна возрасти суммарная термодинамическая энтропия вследствие возникающей дополнительной неупорядоченности:

$$\Delta S_{\text{смеш}} = -R (X_A \ln X_A + X_B \ln X_B),$$

где  $X_A$  и  $X_B$  — мольные доли смешиваемых компонентов.

В настоящее время более эффективными, чем аналитические, являются эмпирические методы расчета одних качеств минерала по другим. На основе представительных эмпирических выборок можно вывести достаточно точные уравнения, которые отражают прямые связи «состав—свойство», «структура—свойство», «свойство—свойство», не раскрывая их физической и химической природы и опосредствованно учитывая особенности реальных минералов. Это могут быть уравнения одномерной регрессии, как, скажем, уравнения зависимости оптических свойств от содержания отдельных компонентов в роговых обманках:

$$Mg = 367,73 - 212,50n_g \pm 1,96;$$

$$Fe = 278,66n_g - 455,54 \pm 3,27;$$

$$Fe_2O_3 = 68,71n_g - 110,87 \pm 2,30;$$

$$K_2O_3 = 15,34n_g - 25,03 \pm 0,43 \text{ и т. д.},$$

или уравнения множественной регрессии, подобные уравнению зависимости параметра элементарной ячейки от состава сфалерита:

$$a_0 = 5,4083 + 0,00456FeS + 0,00210MnS + 0,00424CdS.$$

Аналитическое или эмпирическое определение одних качеств по другим, конечно, не увеличивает количества информации и не может заменить соответствующих прямых экспериментальных определений. К нему мы прибегаем лишь в случае, когда определить то или иное свойство по каким-то причинам невозможно и только расчет может дать примерное представление о нем. Топоминералогия является той областью минералогических исследований, в которой подобные пересчеты применяются наиболее широко. Это связано с необходимостью приведения разнородных данных о минералах к единой системе, чтобы можно было все их использовать для минералогического картирования, сравнительного анализа, установления общих топоминералогических закономерностей.

### **МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МИНЕРАЛОВ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ТОПОМИНЕРАЛОГИИ**

По своей природе все методы изучения свойств минералов можно подразделить на три категории:

— методы наблюдения (непосредственное восприятие различных качеств минералов);

— методы измерения (получения количественных данных о качествах минералов);

— методы испытания, или экспериментальные методы (воздействие на минерал различными методами с целью определения его реакции на то или иное воздействие).

Одни свойства, например цвет, можно наблюдать визуально; можно измерить, - получив спектр отражения или пропускания и величину плотности окраски; можно испытать его устойчивость нагреванием, облучением и т. п. Другие выявляются только в результате измерения (величина кристаллов, плотность); третьи — только в результате испытания (твердость, люминесцентные свойства и т. п.).

В минералогии существует вполне понятная тенденция преимущественного развития методов второй и третьей категории, которые дают количественные результаты известной степени точности. Методы наблюдения используются или как предварительные, или как вспомогательные, однако намечается неоправданное пренебрежение ими. В топоминералогических исследованиях методы наблюдения должны использоваться наряду с измерительными и испытательными как основные. Здесь в качестве главного достоинства выступают моментальность получения результатов и их надежность, независимость от приборно-методических ошибок. Данные наблюдений можно обрабатывать сразу же после полевых исследований или в их процессе. На их основе могут проявиться главнейшие пространственные минералогические закономерности. Такие показатели, как цвет сфалерита, кварца, флюорита, кальцита и многих дру-

гих минералов, как внешняя неоднородность того же кварца, слюд, как формы агрегации минералов и т. п., могут успешно использоваться в качестве элементов минералогического картирования. Не используя наблюдательные методы (а неоправданно пренебрежительное отношение к ним имеет место), мы лишаемся весьма оперативной и весьма важной топоминералогической информации.

Что же касается точных методов второй и третьей категорий, то проблемы их совершенствования с целью более эффективного использования в топоминералогии уже обсуждались нами в гл. V. Речь шла о необходимости резкого повышения экспрессности методов, их автоматизации, о разработке полевых вариантов стандартных приборов и специальных полевых методов. Топоминералогические исследования имеют смысл лишь при условии массового изучения наиболее информативных свойств (десятки и сотни тысяч количественных определений за полевой сезон) опорных минералов, используемых в качестве элементов топоминералогического картирования. Этому условию должны соответствовать ведущие методы изучения свойств минералов, к которым предъявляется специальное требование высокой производительности.

При топоминералогических исследованиях к методам исследования предъявляется еще одно серьезное требование — требование минимизации испытываемого материала. Проблема эта довольно успешно решается путем определения химического состава минералов и разработки локальных методов анализа. К ним относятся методически хорошо освоенные лазерный спектральный и рентгеноспектральный анализы. Успешно разрабатываются методы вторичной ион-ионной эмиссии рентгенофотозлектронной спектроскопии (ЭСХА), Оже-электронной спектроскопии (ОЖС), спектроскопии порогового потенциала (СПП), спектроскопии неупругих характеристических потерь (СХП) и др. Эти методы позволяют проводить как количественный анализ, так и определять валентное состояние атомов, анализировать распределение электронных состояний по энергиям.

В рентгеноструктурном анализе многие методы требуют мало материала, особенно метод Гандольфи, позволяющий получить дебаеграмму из одного зерна. Однако нет локальных методов структурного анализа отдельных зерен или их участков в поминеральных агрегатах.

В последнее время достигнуты большие успехи в минимизации объектов в методах оптической спектроскопии, определении плотности, твердости минералов, в исследовании люминесценции, однако в целом состояние методов, особенно взятых на вооружение рядовыми, неспециализированными лабораториями, еще далеко не отвечает требованиям топоминералогических работ.

Серьезным недостатком многих современных методов минералогических исследований является необходимость подготовки специальных сложных препаратов или отбора мономинеральных фракций. Совершенствование же методов препарирования пока отстает от совершенствования соответствующих методов исследования минералов. Проблема должна, очевидно, решаться двумя путями — ориентировкой методов на «сырые» природные образцы и повышением производительности и автоматизацией методов препарирования. Завершая обсуждение проблемы применения лабораторных методов в топоминералогических исследованиях, мы должны обратить внимание на поразительно большой разрыв между методической и приборной вооруженностью научных лабораторий и лабораторий производственных организаций, экспедиций, как главную черту их современного состояния. Быстрейшее доведение новейших методических достижений до минералогической практики является сейчас самой неотложной организационной задачей.

#### **ТОПОМИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ, РЕШАЕМЫЕ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ИЗУЧЕНИЯ КОНСТИТУЦИИ И СВОЙСТВ МИНЕРАЛОВ**

Изучение конституции и свойств минералов при топоминералогических исследованиях преследует специальные цели.

Одна из главнейших задач топоминералогии — установление пространственных минералогических закономерностей, отражающих пространственную эволюцию процессов минералообразования. Эти закономерности можно проследить не только на основе изменения минерального состава, количественных соотношений различных минералов, но и на основе анализа изменений конституции и свойств отдельных «сквозных» минералов. Естественно, что для целей такого анализа наиболее подходят широко варьируемые качества минералов, изменчивость которых, однако, связана не со случайными причинами, а имеет общую генетическую основу (например, связана с изменением состава и термодинамических параметров минералогенетической среды). Обычно в качестве объектов пространственного анализа выбираются минералы, являющиеся членами рядов широкой и непрерывной смесимости; они характеризуются большой изоморфной емкостью и связанными с изоморфизмом значительными изменениями свойств (карбонаты, сульфиды и др.); кроме того, это минералы, отражающие условия кристаллизации структурой дефектов и связанными с дефектностью свойствами (кварц, флюорит и др.). На рис. 13 отчетливо выступают, например, тенденции пространственного изменения пробности россыпного золота по площади одного из золотоносных узлов, позволяющие прогнозировать качество золотин в россыпях; область минимальных значений пробности совпадает со штоком биотитовых гранитов и с его ореолом.

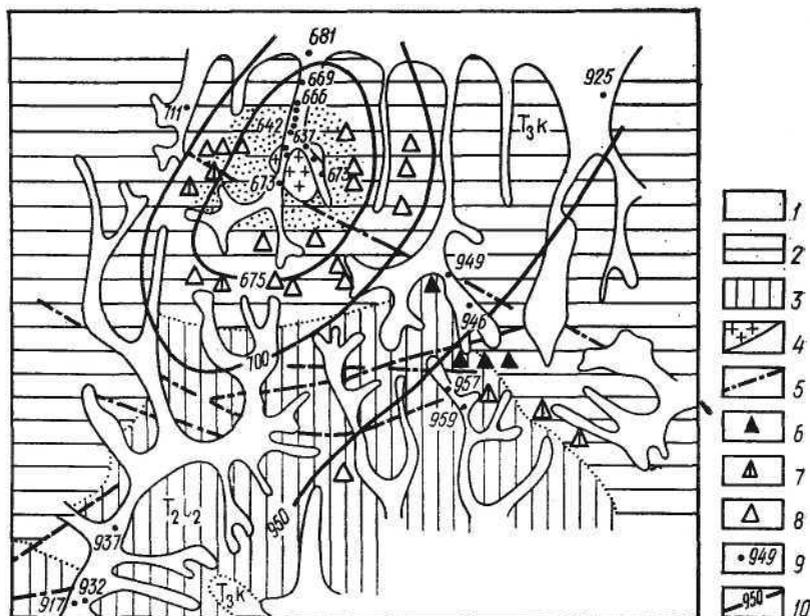


Рис. 13. Схема зонального распределения золота по пробности на площади золотоносного узла. По А. И. Скрябину.

1 — аллювий; 2 — песчаники, глинистые сланцы, алевролиты карнийского яруса ( $T_3k$ ); 3 — алевролиты, песчаники, конгломераты ладинского яруса ( $T_2l_2$ ); 4 — биотитовые граниты и роговики; 5 — разрывные нарушения; 6 — высыпки кварца; 7 — золото-вольфрамитового типа (?), 8 — без следов минерализации; 9 — пробность россыльного золота; 10 — изолинии пробности

Другая, исключительно важная топоминералогическая задача, непосредственно связанная с только что рассмотренной, — использование конституции и свойств минералов как источников генетической информации. Минералы, как известно, в особенностях своего состава, строения, свойствах фиксируют все изменения, происходящие в минералообразующей среде. Многие минералогии, особенно Д. П. Григорьев [9, 10], неоднократно отмечали, что все особенности минералов обуславливаются их генезисом. Генезис же фиксируется в качествах минералов, которые, следовательно, несут минералогенетическую информацию, поэтому изменение конституции и свойств минералов является основой для познания их генезиса.

Эти представления выражают действие закона минералогенетического резонанса [60], имеющего фундаментальное значение для минералогической науки, поскольку им определяется и принципиальная возможность, и методология расшифровки минералогенетической информации, содержащейся в минералах в виде компонента их структуры. Для получения генетической

информации разработан целый ряд специальных методов: минералогическая термометрия и барометрия, анализ типоморфизма минералов, парагенетический анализ и др. Общая теория функционирования минералогической информации в процессе эволюции минералов и методология ее расшифровки составляют предмет развиваемого сейчас нового минералогического направления — генетико-информационной минералогии [60].

Решение следующей задачи — использование свойств минералов как индикаторов рудоносности — основано на установлении прямых или косвенных связей в образовании широко распространенных минералов с более локально проявленными процессами рудообразования. Рудообразующие процессы, как известно, формируют не только рудные тела, но и широкие ореолы нерудных минералов вокруг них (например, кварцевые, карбонатные, слюдяные ореолы вокруг гидротермально-метасоматических месторождений). Состав и свойства минералов в этих ореолах специфичны; чаще всего нерудные минералы содержат в повышенных количествах элементы-примеси, состав которых соответствует составу рудных тел. Эти элементы и являются индикаторами рудоносности. Другой пример: в процессе метаморфизма гранитоидов из перекристаллизующихся породообразующихся минералов (полевые шпаты, слюды) высвобождаются редкие элементы, в частности вольфрам, молибден, олово, висмут и другие, которые поступают в гидротермальные растворы. Выпадая из растворов на геохимических барьерах, эти элементы формируют редкометалльные месторождения. Перекристаллизованные полевые шпаты и слюды с резко пониженным по сравнению с фоном содержанием редких элементов также являются индикаторами рудоносности.

Не приводя далее данных о рудно-индикаторных свойствах минералов, сошлемся лишь на работу А. И. Гинзбурга, в которой на эти вопросы обращается особое внимание.

Важнейшая практическая функция топоминералогии — выявлять полезные свойства минералов, определяющие их ценность. Обычно поиски таких свойств ведутся на основании запросов науки и техники, в курсе которых должен быть минералог. Так получили практическое значение многие минералы, используемые в оптике, радиоэлектронике, химической технологии. Не менее часто предложения об использовании минералов даются и реализуются минералогами на основе выявления новых полезных особенностей состава и свойств минералов. Особенно это касается открытия в минералах в достаточно высоких концентрациях элементов-примесей. Так появились новые источники сырья в результате обнаружения цезия в биотите сподуменовых пегматитов, цезия же в астрофиллите, редких земель и стронция в апатите, германия в магнетите, рения в халькопирите и борните и т. д. В последнее время успешно реали-

зуются предложения об использовании новых минералов в качестве ювелирного и поделочного сырья, создается новая добывающая служба коллекционных минералов.

Этот краткий анализ основных целевых направлений изучения конституции и свойств минералов при топоминералогических исследованиях показывает, что каждое направление, предъявляет свои требования к качествам, используемым как опорные. Эти требования могут совпадать, а могут и, наоборот, быть резко противоположными. Так, для установления пространственных топоминералогических закономерностей и для генетико-информационных расшифровок наиболее подходят варьирующие качества (с высокой нормой реакции). Для диагностических же целей такие свойства менее надежны, диагностика ориентируется главным образом на качества, изменяющиеся в незначительных пределах и имеющие характер констант.

## **ПОНЯТИЕ ОБ ИНФОРМАТИВНОСТИ СВОЙСТВ**

Чтобы оценивать применимость конституционных особенностей и свойств минералов для решения тех или иных научных или прикладных задач, целесообразно ввести (подобно тому, как это было сделано в генетико-информационной минералогии [60]) общее понятие информативности свойства, уточняя в каждом случае, о какой информативности идет речь. Можно, следовательно, говорить о диагностической, топоминералогической, генетико-информационной, корреляционной и тому подобной информативности. Информативность можно рассматривать дифференцированно (например, через норму, чувствительность и емкость реакции в генетико-информационной минералогии). Оценка ее может быть как качественной, так и количественной. Очевидно, что получить наибольший эффект для решения задач можно, используя соответствующие высокоинформативные качества минералов.

Понятие «информативность свойств» вводится нами не впервые. В тех или иных частных приложениях оно использовалось во многих работах. Особенно строгую форму понятия диагностической информативности дал В. Г. Фекличев [53], который вывел даже количественный показатель информативности (см. гл. V). Это понятие следует распространить и на другие области минералогической методологии.

Почти во всех топоминералогических исследованиях в качестве опорных используется довольно ограниченное число минералов. Это широко распространенные («сквозные») минералы и наиболее хорошо изученные минералы. К ним относятся кварц, кальцит, флюорит, породообразующие силикаты (полевые шпаты, пироксены, слюды, хлориты и др.), сульфиды (пирит, сфалерит и др.)

Для главных минералов наиболее информативные свойства следующие.

Кварц — состав элементов-примесей, структурные дефекты, плотность, окраска, термолюминесценция, рентгенолюминесценция.

Кальцит — параметры ячейки, химический состав, элементы-примеси, изотопный состав углерода и кислорода, оптические свойства, термолюминесценция, окраска.

Флюорит — состав и содержание редких земель, марганца, структурные дефекты, окраска, фото-, термо- и рентгенолюминесценция.

Полевые шпаты — упорядоченность структуры, позиция Al в кремнекислородных тетраэдрах, состав, оптические свойства, термолюминесценция.

Слюды — параметры ячейки, политипия, состав, оптические свойства.

Сульфиды — параметры ячейки, состав, элементы-примеси, изотопный состав серы, свинца, твердость, термоэдс, плотность, отражательная способность, магнитная восприимчивость.

Эти свойства можно использовать в качестве элементов топоминералогического картирования.

## **ВОПРОСЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ**

Поскольку в процессе топоминералогических исследований формируются огромные выборки аналитических данных, то их обработку следует проводить с привлечением методов математической статистики, которые позволяют необходимым образом «сжимать» информацию, оговаривая точность и надежность средних цифр и обобщенных показателей. Значительные трудности представляют обобщение, изложение и публикация результатов исследования конституции и свойств минералов. Существующие громоздкие описания в топоминералогических монографиях и отчетах занимают слишком много места, но не указывают наиболее рационального использования содержащихся в них сведений. Очевидно, детальные описания необходимо составлять для наиболее информативных с генетической точки зрения минералов, для редких и малоизученных минералов, для впервые открытых минералов и т. п., выбирая, как наиболее компактную, табличную и графическую формы обобщения.

В топоминералогической практике неоправданно мало практикуется составление поминеральных карт. Попытки поминерального картирования, предпринимавшиеся Г. Н. Вертушковым [6], Б. В. Чесноковым (58) и У. И. Зубовым, нами и другими исследователями, раскрывают высокую его эффективность и позволяют рекомендовать максимально широкое внедрение специальных видов картирования в минералогическую практику.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ И ВРЕМЕННЫХ ВЗАИМООТНОШЕНИЙ МЕЖДУ МИНЕРАЛАМИ И МИНЕРАЛЬНЫМИ АССОЦИАЦИЯМИ

Исходя из понятия топоминералогии главный смысл топоминералогических исследований заключается в изучении пространственных и временных взаимоотношений между минералами и минеральными ассоциациями и в восстановлении полной кристаллизационной истории топоминералогических объектов разного масштаба (от минеральных индивидов до минералогических провинций). Генеральной задачей топоминералогии является создание пространственно-временных моделей объектов, представляющих собой синтез временно-минералогических и пространственно-минералогических моделей [54]. Только на основе таких моделей результаты минералогических исследований могут ассимилироваться геологической теорией и оказывать эффективное влияние на поисковую практику, которая является не чем иным, как поиском утилитарно ценных минералов в геологическом пространстве. Решению этой задачи пространственно-временного анализа подчинены, по сути дела, и все другие виды топоминералогических исследований.

### МЕТОДИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

В настоящее время изучение пространственно-временных топоминералогических закономерностей значительно и неоправданно отстает от изучения конституции и свойств минералов. Сравнивая современное состояние исследований в области диагностики минералов и в области восстановления кристаллизационной истории, В. И. Степанов [51, с. 5] 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». Исследования в этом направлении кроме их явной ограниченности сосредотачиваются к тому же на локальных объектах (рудных телах, минеральных месторождениях, отдельных телах горных пород). Объекты более крупного масштаба с позиций пространственно-временной минералогии рассматриваются исключительно редко. Локальные данные не увязываются с региональными, и создание досто-

верной и полной картины эволюции минералообразования в каком-то сложном и крупном регионе, увязанной с геологической эволюцией региона,— довольно редкое явление в минералогической практике.

Главная причина столь существенного отставания пространственно-временных минералогических исследований — это неразработанность их методики. Достаточно сказать, что до сих пор отсутствуют прямые критерии определения относительного возраста пространственно разобобщенных минералов, а без них достоверность минералоисторических реконструкций остается очень низкой. Правда, в этой области топоминералогии ведутся определенные методологические изыскания. Особенно сильно повысился к ней интерес в последние годы, поэтому мы располагаем уже значительным числом работ теоретического и методического плана, на которые можно опереться при воссоздании истории минералообразования в минералогических объектах разного ранга [4, 6, 9, 10, 12, 13, 40, 41, 44, 54, 57, 58, 60, 63 и др.].

При решении пространственно-временных минералогических задач основные трудности связаны с проблемой времени [41]. Процессы минералообразования характеризуются различной 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 использование слишком грубых методов физической хронометрии. Это обстоятельство диктует необходимость вести все минералогенетические реконструкции в топологической системе геологического времени [41], и только, если удастся проследить достаточно длинные цепи минералогенетических явлений, появляется возможность дать хронологическую привязку отдельным их звеньям. Поэтому основой пространственно-временных исследований является восстановление результатов минералогенетических процессов в их естественной последовательности, например последовательности кристаллизации, изменения и разрушения минералов. Главный инструмент исследования — критерии установления кристаллизационной истории.

Ведущее значение для установления исторической последовательности и пространственной эволюции событий минералогенезиса имеют онтогенетический, парагенетический, формационный и корреляционный анализы, логико-информационные и другие методы, позволяющие прямым или косвенным образом судить о взаимоотношениях минералов во времени и в пространстве.

## ОНТОГЕНИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗУЧЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ВЗАИМООТНОШЕНИЙ МИНЕРАЛОВ

Сущность онтогенического метода минералогических исследований заключается в определении истории минеральных индивидов и агрегатов на основе изучения их морфологии и внутреннего строения (текстурно-структурный или морфолого-анатомический анализ) с опорой на общие эволюционные закономерности минералогенезиса.

Главнейшая эволюционная закономерность развития любых реально существующих минералогических объектов, определяющая основные принципы онтогенического анализа, состоит в неизбежном прохождении этих объектов через последовательные стадии — *зарождение, рост, изменение, разрушение, исчезновение*. Такое же фундаментальное значение для методологии онтогенических исследований имеет *закон наследования* минеральными индивидами и другими минеральными системами структурных особенностей минералогенетических систем.

Процедура онтогенического анализа минеральных индивидов, агрегатов и полиагрегатных минеральных тел, общая по своей методике, имеет и ряд специфических особенностей.

Минеральный индивид. Восстановление последовательных событий истории минерального индивида (кристалл, зерно) сводится к выявлению его анатомического строения и к исторической расшифровке анатомической картины.

Основными элементами анатомии кристалла [10, 60], имеющими ростовую природу, являющиеся плоскости нарастания граней (зоны роста), пирамиды нарастания граней (секторы роста),

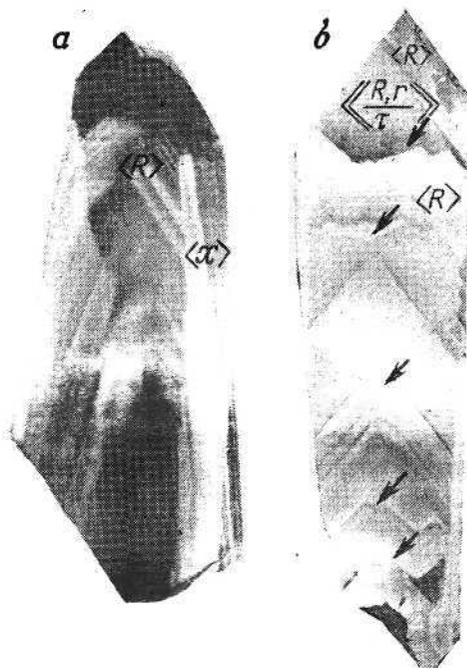


Рис. 14. Анатомические особенности минеральных индивидов кварца:

*a* — зонально-секториальное строение кварца; *б* — кристалл кварца с пирамидами регенерации. Стрелками показаны поверхности растворения. «Пирамиды роста — {...}, пирамиды регенерации — <<...>>...»

блоки разориентации (ростовая мозаичность) (рис. 14, а). Границы и ребра пирамид нарастания граней также элементы анатомии, поскольку это не идеальные геометрические образы, а физически вполне определенные образования, вещество которых отличается от вещества разделяемых ими пирамид (это тонкие пластины или стержни, а не плоскости или линии). На ростовые элементы накладываются элементы, отражающие процессы разрушения и изменения минеральных индивидов (механические двойники, структуры распада твердых растворов, структуры деформации, растворения, замещения и т. п.). Вторичные анатомические элементы (локальные, линейные, плоскостные, объемные) генетически могут быть связаны с самоупорядочением структуры индивида, с внешним энергетическим и с внешним вещественным воздействием на индивид (рис. 14, б).

Материал для онтогенического исследования подготавливается в виде различных препаратов (пластинки, прозрачные и полированные шлифы), вырезанных из индивидов по определенным направлениям, обычно по направлениям наибольшей изменчивости.

Анатомическое строение индивидов в ряде случаев легко устанавливается и при визуальном наблюдении по изменению плотности окраски, степени прозрачности, распределению микровключений. Чаще же требуется применять специальные приемы, выявляющие анатомию, а иногда и длительный экспериментальный подбор подходящих методов. Такими методами могут быть: наблюдение в проходящем поляризованном свете, визуальное или микроскопическое изучение люминесценции, катодолюминесценция в растровом электронном микроскопе, рентгеновская топография, ее структурное травление, гамма-облучение, нейтронография, автордиография и др.

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 (плотность почернения на негативе, радиография и т. п.), профилометрирование, если изучается рельеф травления.

Соответствующие фотограммы (рис. 15) или профилограммы зональности являются кривыми изменения во времени качества минерала, определяющего зональность (содержание примесей, дефекты упаковки и т. п.).

По зональности, к пространственно-временному анализу которой применим главный принцип стратиграфии (каждый перекрывающий слой моложе подстилающего), можно восстановить историю ростовых событий и выделить наложенные, более поздние анатомические элементы, связанные с изменением индивида.

Корреляция последних проводится на основе анализа взаимоотношений и отношений с ростовыми и анатомическими элементами.

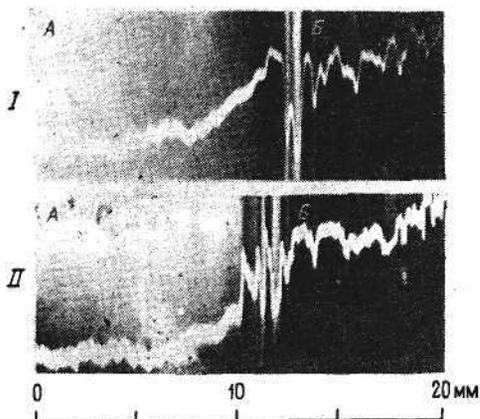
Минеральный агрегат. Восстановление истории минеральных агрегатов осуществляется на основе анализа взаимоотношений между минеральными индивидами, слагающими агрегат. При этом, естественно, используются как вспомогательные приемы, так и анализ самих минеральных индивидов. Общая картина формирования минеральных агрегатов создается еще в процессе

минералогического картирования или документации тел.

Материал для лабораторного онтогенического исследования минеральных индивидов должен быть представлен крупными штуфами, надежно и с необходимыми повторениями характеризующими структурно-текстурные особенности изучаемого тела. Положение образцов, их пространственная ориентировка тщательно документируются, сами образцы соответствующим образом маркируются. Особенности препарирования образцов и подготовки их к дальнейшим исследованиям определяются природой изучаемых агрегатов [57]. Однако во всех случаях возникает потребность в фотодокументации агрегатов, поэтому следует подбирать такие штуфы, чтобы при их фотографировании форма и строение агрегатов выявлялись наилучшим образом.

К общеметодическим относятся также операции распиловки образцов в необходимых направлениях с последующей шлифовкой и полировкой поверхностей штуфов или вырезанных из них пластинок, их структурным травлением и т. п. В. И. Степанов [51] 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 дробление и т. п.), выкалыванием с помощью специальных инструментов, селективным растворением, выпиливанием, высверливанием и т. д.



**Рис. 15. Фотограммы изменения плотности зональной окраски в кристаллах кварца:**

I и II — разрезы вкrest зональности одноименных ромбоздров двух кристаллов; А и Б — синхронные зоны роста

Морфолого-анатомическая документация агрегата — одна из начальных операций онтогенического анализа, а геометрическая модель — его конечная цель. Она осуществляется зарисовкой и фотографированием препаратов. Чтобы понять строение относительно простых агрегатов, таких, как друзовые корки и сферолиты, достаточно изучить лишь несколько разрезов. Более сложные (диффузионные, метасоматические или метаморфизованные и т. п.) агрегаты расшифровать трудно, обычно лишь

после изучения очень большого числа препаратов. В любом случае нельзя ограничиваться изучением текстурных срезов в одной плоскости, тем более случайной, необходимо добиваться полной стереологической документальности.

Последовательность кристаллизации слагающих агрегаты минеральных индивидов определяется на основе критериев относительного возраста минералов.

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

Главным признаком одновременного роста двух минеральных индивидов считается наличие индукционных границ между ними, характеристику которых впервые дал А. Е. Ферсман. Индукционные границы характеризуются наличием индукционной штриховки, образующейся в результате пульсационных колебаний относительных скоростей роста соприкасающихся кристаллов.

Индукционные границы состоят из индукционных граней и ребер, образующих штриховку, и псевдограней, которые эта штриховка покрывает (рис. 16). Индукционные грани представляют собой элементарные плоские площадочки соприкосновения одновременно растущих индивидов. Они бывают трех типов: 1) случайной ориентации со сложными индексами; 2) закономерной ориентации с простыми индексами (собственные грани кристалла), 3) с отпечатками граней соседнего кристалла. Псевдограницы слагаются системой индукционных граней и ребер, относящихся к одной кристаллографической зоне. Количество псевдогра-

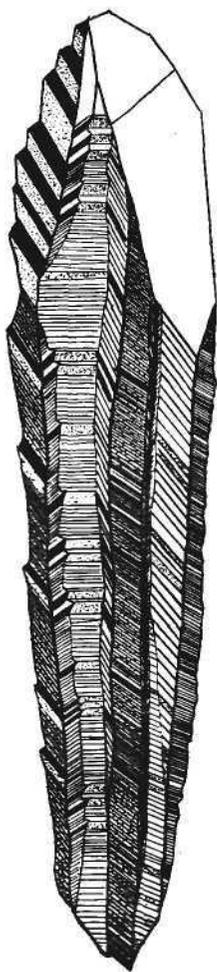


Рис. 16. Индукционные поверхности на кристалле кварца, извлеченном из друзы

ней на кристалле соответствует числу пар граней данного и соседнего кристалла, находящихся в соприкосновении.

Профиль псевдограницы в перпендикулярном к ней разрезе представляет собой график изменения относительной скорости роста двух индивидов во времени, если, конечно, не происходило более поздней перестройки рельефа индукционной границы. Между индивидами, растущими с абсолютно одинаковыми скоростями, этот профиль будет прямолинейным. В. М. Хребтов и М. Д. Часовитин, анализируя механизм одновременного роста индивидов двух минералов на примере кварца и золота, аналитически определили условия формирования золотин различной крупности и формы. Следовательно, анализ взаимоотношений индивидов имеет и прикладное значение.

Индукционные поверхности могут переходить в гранные плоскости или плоскости-отпечатки, это свидетельствует о прекращении совместного роста и дальнейшем одиночном росте одного из индивидов. Различные случаи подобного роста, который Б. В. Чесноков [57] называет частично одновременным, показаны на рис. 17.

*Критерии последовательного роста* минеральных индивидов основаны на анализе распределения центров их зарождения в пространстве и анализе границ между индивидами.

Основной критерий последовательного минералообразования — это критерий нарастания и обрастания минералов: минерал А, нарастающий на минерал Б или обрастающий его, является, несомненно, более поздним.

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. Некоторые примеры разновозрастных срастающихся индивидов показаны на рис. 18.

Большое значение для определения **относительного возраста** минералов имеет анализ границ срастания. Границей срастания

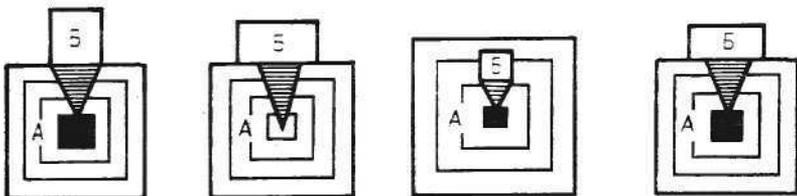
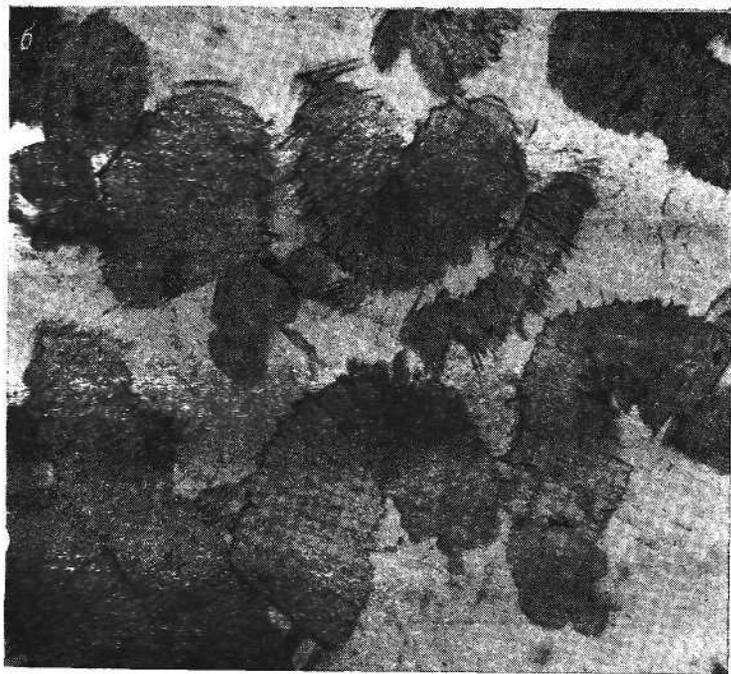
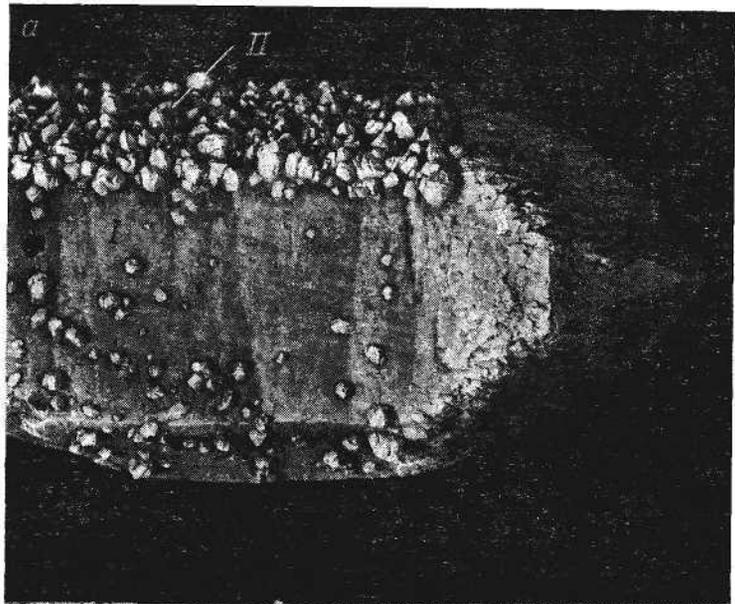


Рис. 17. Частично одновременный совместный рост индивидов А и Б. По Б. В. Чеснокову [76].

Показаны различные случаи соотношения роста: зачерненная часть большого кристалла образовалась до начала роста малого кристалла



**Рис. 18. Примеры нарастания и обрастания минералов разного возраста:**  
**а** — нарастание кварца II на кварц I нат. вел.; **б** — индивиды хлорита, обрастаемые кварцем (включения в кристалле кварца), ув. 50

(если границы не реакционные) всегда является собственной поверхностью более раннего, обрастаемого минерала. Она отпечатывается на более позднем минерале со всеми особенностями рельефа. На анализе границ основан критерий относительного идиоморфизма минералов: в минеральных телах выполнения более поздний минерал ксеноморфен по отношению к более раннему. На рис. 19 по этому критерию возраст индивидов определяется в последовательности 1 → 2 → 3.

Надежным критерием является 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 критериев 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 какой-то области подтока питания во все стороны (т. е. центробежно). Центробежность или центростремительность развития легко устанавливается на основе геометрического анализа строения агрегатов.

Наиболее обычные минеральные тела замещения — это метакристаллы, параморфозы и псевдоморфозы. Общим критерием определения их метасоматической природы является присутствие реликтовых включений замещаемых сред. Для псевдоморфоз и параморфоз характерно, кроме того, несоответствие внешней формы характеру слагающего их кристаллического материала. Образование параморфоз, являющихся результатом полиморфных превращений, сопровождается различными воздействиями на вмещающую среду, связанными с изменением объема (развитие радиальной трещиноватости и аномальных оптических ореолов в случае приращения объема, развитие

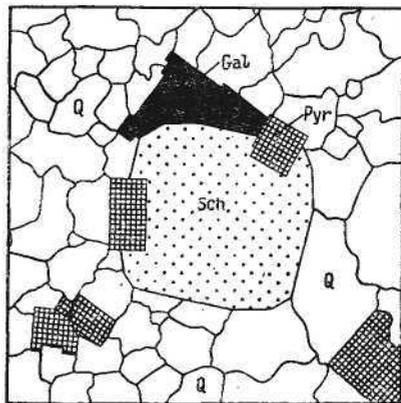


Рис. 19. Срастание индивидов с различной степенью идиоморфизма: пирит → шеелит → галенит → кварц

кольцевой трещиноватости отрыва в случае сокращения объема).

Более детально критерии одновременного и последовательного роста, замещения, перекристаллизации и других изменений минералов и особенности их применения в онтогеническом анализе рассмотрены в книгах Б. В. Чеснокова [57], Д. П. Григорьева [9], Д. П. Григорьева и А. Г. Жабина [10], А. Г. Жабина [15].

Минеральное тело. Минеральные тела являются агрегатами разновременных агрегатов, и их исторические реконструкции основаны на тех же принципах: анализе распределения центров зарождения агрегатов в пространстве и анализе границ между агрегатами. Данные о динамике формирования самих слагающих минеральное тело агрегатов используются для уточнения и детализации исторической картины формирования рудного тела.

### **СИНХРОНИЗАЦИЯ И ВОЗРАСТНАЯ КОРРЕЛЯЦИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-РАЗОБЩЕННЫХ МИНЕРАЛОВ**

Определение последовательности кристаллизации соприкасающихся минералов с помощью онтогенического метода, несмотря на определенные трудности, не очень сложно. Значительно усложняются минералогенетические реконструкции несоприкасающихся, разобщенных в пространстве минеральных систем или систем, сохранившихся после разрушающих воздействий в виде фрагментов.

Д. П. Григорьев и А. Г. Жабин [10] предлагают два онтогенических приема временной увязки фрагментарно сохранившихся звеньев процесса: по перекрывающимся отрезкам процессов и путем параллелизации этих звеньев с какой-либо другой, непрерывной цепью событий, если таковая имела место.

Первый прием заключается в постепенном наращивании того или иного временного ряда и заполнении пропусков в нем в результате поступления новой информации при непрерывно расширяющемся исследовании. Установив на разных образцах, отобранных из одного и того же минерального тела, например, следующие последовательности кристаллизации минералов:

$a \rightarrow b$

$b \rightarrow c$

$b \rightarrow c \rightarrow d$

$d \rightarrow e \rightarrow f$ ,

мы, очевидно, можем уверенно интерпретировать развитие минералообразования в данном рудном теле по схеме

$a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow e \rightarrow f$ .

Второй прием можно применять лишь в условиях, когда восстанавливаемый ряд связан в пространстве и во времени с каким-то другим временным рядом. Например, зная последовательность нарастания зон кристалла-хозяина (рис. 20, 1—6), содержащих в некоторых случаях включения минералов ( $a-d$ )

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

можно надежно определить последовательность кристаллизации минералов-включений как  $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$ .

Ряд 1—6 здесь является вспомогательным. К этой же последовательности можно привязать и соответствующие минералам-включениям свободно растущие индивиды.

Природные возможности для применения этих прямых критериев возрастной увязки пространственно-разобщенных минералов, однако, ограничены, и чаще всего приходится использовать различного рода косвенные критерии. Они опираются на те или иные эволюционные закономерности минералогенеза, но пользоваться ими нужно весьма осмотрительно. Дело в том, что на основании косвенных критериев определяется место того или иного минерала в закономерно развивающихся во времени процессах, но сами физико-химические процессы, составляющие основу процессов минералогенетических, инвариантны в пространственно-временном отношении, т. е. независимы от времени и места их протекания. Это определяет единство закономерностей в эволюции природных минералогенетических мультисистем и определенное сходство в облике формируемых ими минеральных систем.

Используя косвенные критерии тех или иных возрастных корреляций, следует убедиться, что минералог имеет дело с продуктами одного и того же непрерывно развивающегося минералогенетического процесса, а не разных процессов.

Теоретические основы возрастной корреляции минеральных систем разработаны В. И. Поповой [41]. ею же дан анализ существующих методов корреляции и выполнен ряд новых методических разработок. Эти же вопросы разбирались и автором [60].

Наиболее надежна синхронизация минералов по следам

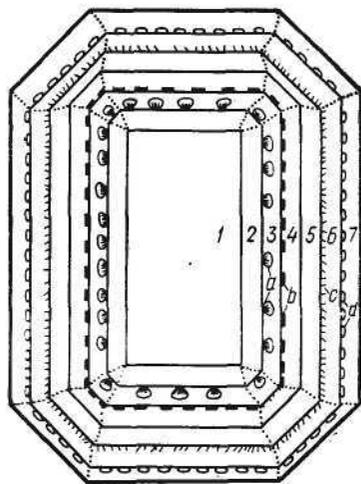


Рис. 20. Зональный кристалл с включениями:

1—7 — зоны роста;  $a, b, c, d$  — включения, сингенетичные соответствующим зонам

различного рода аномальных явлений, имевших достаточно высокую интенсивность, чтобы наложить заметный отпечаток на структуру минерала, и широкий региональный масштаб проявления. К таким явлениям относятся, например, тектонические подвижки, изменяющие режим минералообразования и фиксирующиеся в строении минералов появлением «присыпок», деформацией, зональностью.

Особенно большое значение имеет зональность, которую ряд исследователей интерпретируют как природные сейсмограммы. Зональность для целей синхронизации в хрусталеносных гнездах и месторождениях Приполярного Урала успешно использована для кварца — Д. П. Григорьевым, для возрастных корреляций пироклора — Д. А. Минеевым и Н. И. Разенковой, для пирита Березовского месторождения — В. И. Поповой и Б. В. Чесноковым. Основу метода составляет прослеживание реперных зон или реперных пиков на фотограммах зональности. По этим зонам как синхронным реперам осуществляется взаимоувязка формирования минеральных индивидов во времени. Подобные синхронные реперы можно найти в распределении и форме включений в кристаллах, в строении минеральных агрегатов, в следах деформаций, растворении минералов и т. п.

Для определения последовательности кристаллизации минералов широко используются различные эволюционные данные: закономерности изменения состава, строения и формы минеральных индивидов, а также соотношений между минералами парагенезиса. Если известна общая тенденция изменения того или иного свойства минерала, скажем формы кристаллов кальцита (рис. 21), то по данным его изучения можно примерно ус-

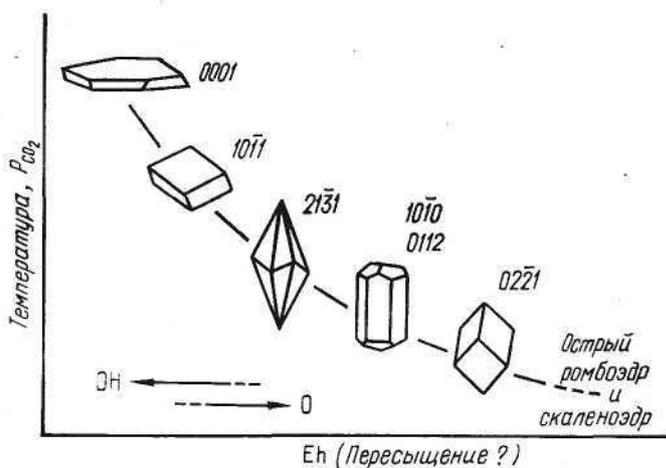


Рис. 21. Кристаллогенетические тенденции изменения формы индивидов кальцита в зависимости от условий минералообразования. По И. Костову.

тановить с минералом какого времени (поздним, ранним) мы имеем дело [21].

В качестве дополнительного возрастного признака при хронокорреляциях минералов используются почти все их типоморфные признаки, изменяющиеся во времени. Широко применяется анализ включений минералообразующих сред.

Могут быть использованы корреляционный и парагенетический анализы, а также другие приемы, но всегда необходимо иметь в виду, что это методы косвенные и применение их должно быть обоснованным.

## **ВЫДЕЛЕНИЕ ГЕНЕРАЦИЙ МИНЕРАЛОВ**

В любых минералогических исследованиях, а в топоминералогических в особенности, большое внимание уделяется генерациям минералов — различным поколениям одного и того же минерала, разделенным перерывами в его кристаллизации.

В генерациях выделяются зарождения минералов — возрастные группы минеральных индивидов, образовавшиеся на фоне непрерывной кристаллизации минерального вещества.

Детальный анализ генераций и зарождений минералов сделан в работах Д. П. Григорьева [9, 10].

В. И. Попова [41], критически рассмотревшая все применявшиеся разными исследователями способы выделения генераций, определила как наиболее надежные и достаточные следующие критерии установления межгенерационных перерывов кристаллизации (границ генераций):

- растворение с последующим дорастанием минерала;
- нарастание других минералов, полностью разделяющих разные зоны минерала;
- нарастание на минерал кристаллов других минералов без индукционных поверхностей и возможный захват их в виде включений при возобновлении роста кристалла-хозяина;
- пересечение минерала прожилком того же минерала без дорастания периферических зон.

Поскольку новые порции вещества прежде всего кристаллизуются на собственных затравках, новые генерации вещества нередко нарастают в виде новых зон роста на индивиды ранних генерации. Особенно это характерно для метакристаллов. Поэтому при выделении генераций нельзя ограничиваться анализом строения только минеральных агрегатов, но необходимо 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.

Распределение генераций минералов в пределах минеральных тел, выявляемое методами минералогического картирова-

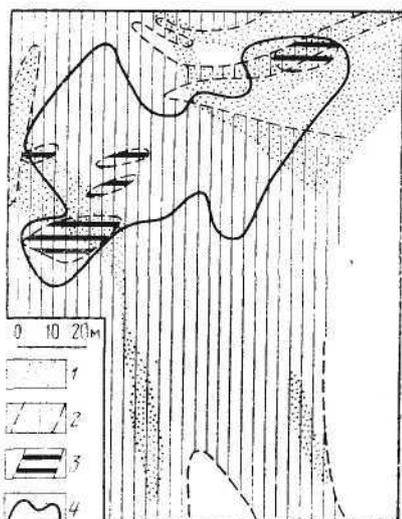


Рис. 22. Распределение флюорита в прожилках Северного Глубокого рудного тела Хинганского месторождения на горизонте 110 м. По данным минералогического картирования. По В. И. Поповой.

Флюорит генераций: 1 — первой, 2 — второй, 3 — третьей; 4 — контур промышленных руд

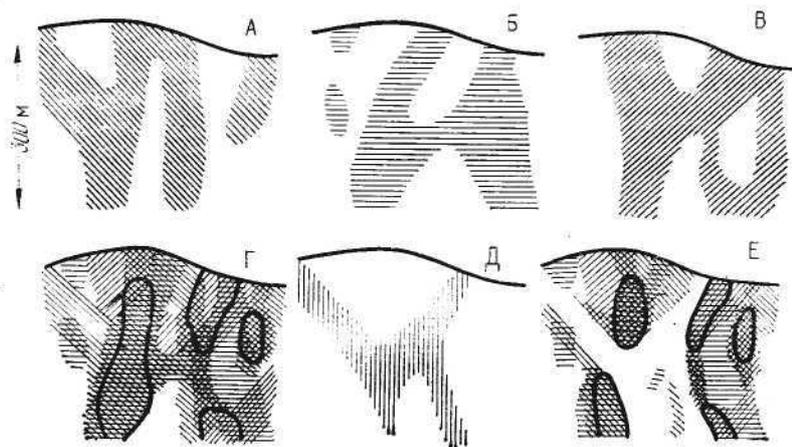


Рис. 23. Схемы расположения генераций касситерита и контуров рудных тел в небольшом участке гидротермальной системы (вертикальная проекция). По В. А. Попову.

А, Б, В — последовательные генерации касситерита; Г — положение рудных тел после телескопирования трех генераций в трещинной системе; Д — конфигурация тела, где произошло растворение (замещение) касситерита; Е — контуры рудных тел после растворения

ния, отчетливо иллюстрирует эволюцию минералообразования во времени и в пространстве (рис. 22), связанную с изменением условий минералообразования.

В. А. Попов [42] обратил внимание на широко распространенное явление «исчезновения» определенных генераций минералов в результате их растворения или замещения другими минералами. В схематизированном виде это явление показано на примере одного из оловорудных месторождений на рис. 23. Оно существенно усложняет историю формирования минеральных тел.

Оба эти примера свидетельствуют о существенном несоответствии контуров распространения тех или иных генераций минералов и контуров минеральных тел геолого-экономическим контурам рудных тел.

### **ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ТОПОМИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ**

Обобщение результатов изучения взаимоотношений минералов во времени и в пространстве проводится созданием пространственно-временных топоминералогических моделей [54] разного масштаба — от моделей отдельных минеральных индивидов до модели всей минералогической провинции или даже более крупного объекта.

**Минеральный индивид.** 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 минерального индивида — это отрезок истории более крупного объекта, элементом которого индивид является. Удачных примеров использования минеральных индивидов для расшифровки тех или иных черт истории минеральных систем достаточно много. Так, О. П. Иванов и Л. Я. Ефременко 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 зальбанд внутрь жилы), параллельно уменьшению содержаний титана, железа и марганца. Наряду с такими однонаправленными тенденциями для ряда элементов-примесей касситерита (таких, как скандий, индий, ниобий) характерно пульсационно-ритмичное изменение концентрации, которое и отражается в зональности индивидов; не исключено, что оно связано с автоколебаниями состава системы.

**Минеральный агрегат.** Более 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-шестоватых и других моно- и полиминеральных агрегатов [9, 10, 15] 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 [10].

Минеральное тело. Минеральное месторождение. Эти топоминералогические объекты являются несравнимо более сложными, чем индивиды и агрегаты, поэтому и пространственно-временное их моделирование представляет достаточно трудоемкую задачу. Однако наиболее значительная часть топоминералогических исследований концентрировалась на объектах именно этого масштаба и здесь достигнут существенно больший прогресс, чем на объектах других уровней [54].

Пространственно-временные модели минеральных 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 топоминералогические черты, поэтому они могут быть достаточно детальными.

В практике топоминералогических исследований пространственные и временные минералогические модели месторождений составляются, как правило, отдельно.

Наиболее популярными временными моделями являются диаграммы последовательности кристаллизации минералов на месторождениях. Они могут называться по-разному и иметь различный вид, но общая их суть состоит в отражении динамической картины развития кристаллизационных и других событий в процессе формирования минерального месторождения. Пример такой диаграммы показан на рис. 24. Синтез общей картины последовательности кристаллизации минералов особенно важен для характеристики горных пород, и в петрологических исследованиях этой проблеме уделяется много внимания.

Пространственные топоминералогические закономерности отражаются на плоских и объемных картах. На них мы сейчас останавливаться не будем, поскольку вопросам минералогического картирования и составления карт будут посвящены специальные главы. Главный материал (временные диаграммы и

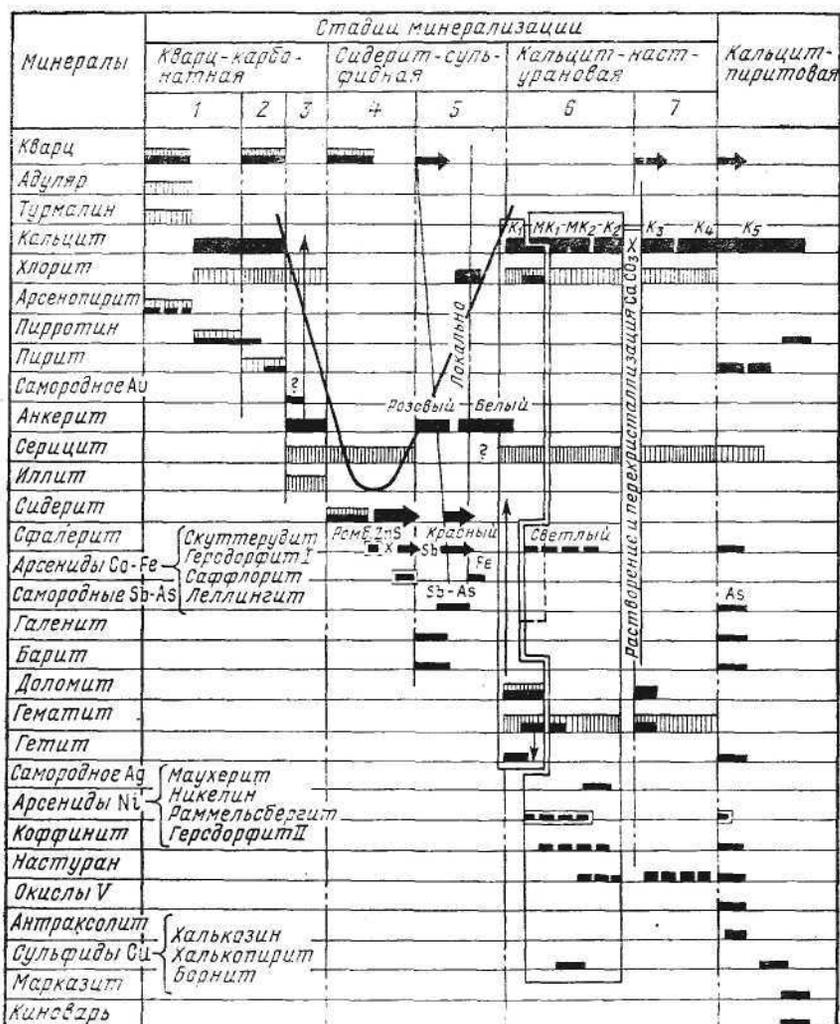


Рис. 24. Схема последовательности кристаллизации минералов в открытых трещинах (четыре полосы) и в измененных породах (заштрихованные полосы) месторождения уран-свинцово-цинковой формации. По Ю. М. Дымкову.

пространственные карты) дополняется конкретными материалами, которые отражают наиболее яркие черты эволюции минералообразования. В качестве примера приведем, по И. И. Шафрановскому и Н. З. Евзиковой, две схемы, относящиеся к оловорудным месторождениям (рис. 25, 26). На этих схемах суммированы данные от эволюции формы кристаллов касситерита и анатаза во времени и в пространстве и дается пространственное распределение кристаллов разного типа на одном из оловорудных месторождений. Эти данные имеют большое значение для расшифровки эволюции минералообразования и прогнозирования оруденения. Так, многие исследования Н. З. Евзиковой [13] представляют пример тщательно и целеустремленно выполненных работ топоминералогического плана.

Минералогические провинции (и другие районы). Общими моделями минералогических регионов разного ранга являются топоминералогические монографические описания (см. вводные главы) и сводные комплексные минералогические карты. Частные модели, так же как и для месторождений, имеют либо преимущественно временной, либо преимущественно пространственный аспект. Методические вопросы региональных минералогических исследований рассмотрены в работах Б. В. Бродина [4].

Ключевой методической проблемой сравнения и обобщения результатов топоминералогического изучения минералогиче-

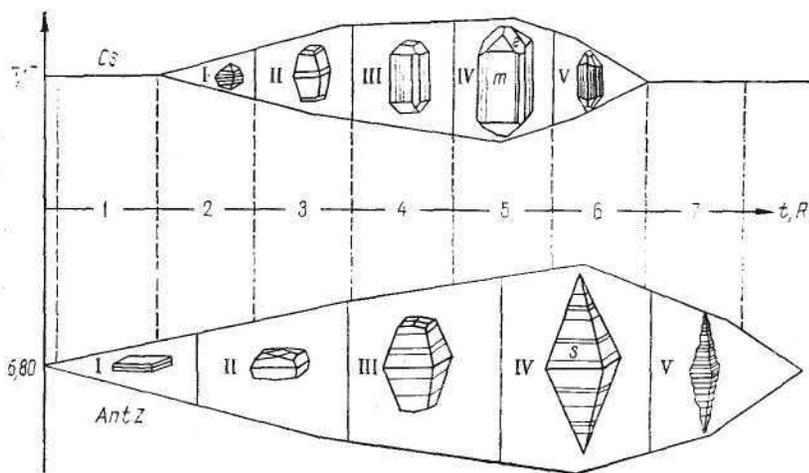


Рис. 25. Эволюция во времени ( $t$ ) и в пространстве ( $R$ ) морфологии кристаллов касситерита ( $Cs$ ) и анатаза ( $Antz$ ). По Н. З. Евзиковой.

I—V — кристалломорфологические типы; буквенными индексами обозначены наиболее плотные грани кристаллов:  $m \{110\}$  и  $e \{101\}$  у касситерита,  $s \{111\}$  — у анатаза;  $\omega$  — грамм-атомный объем; 1—7 — нумерация стадий минерализации

ских провинций явился выбор элементарной минералогической системы. Анализ на уровне отдельных минералов, во-первых, слишком трудоемок, во-вторых, не позволяет вскрыть наиболее общие закономерности, которые поглощаются деталями. Анализ на уровне минеральных месторождений, наоборот, дает слишком высокую степень обобщения и применим лишь в мелкомасштабных исследованиях. Многие минералоги предлагают проводить анализ на уровне минеральных парагенезисов, однако такой анализ требует очень детальной изученности взаимоотношений минералов во всех без исключения минеральных комплексах, что применимо лишь для очень небольших регионов. Кроме того критерии выделения парагенезисов весьма неопределенны. Поэтому в качестве элементарной минералогической системы региональных построений обычно используется минеральная ассоциация [4, 40]. Да и во многих работах, построенных на парагенетической основе, в качестве элементарной системы в действительности также используются минеральные

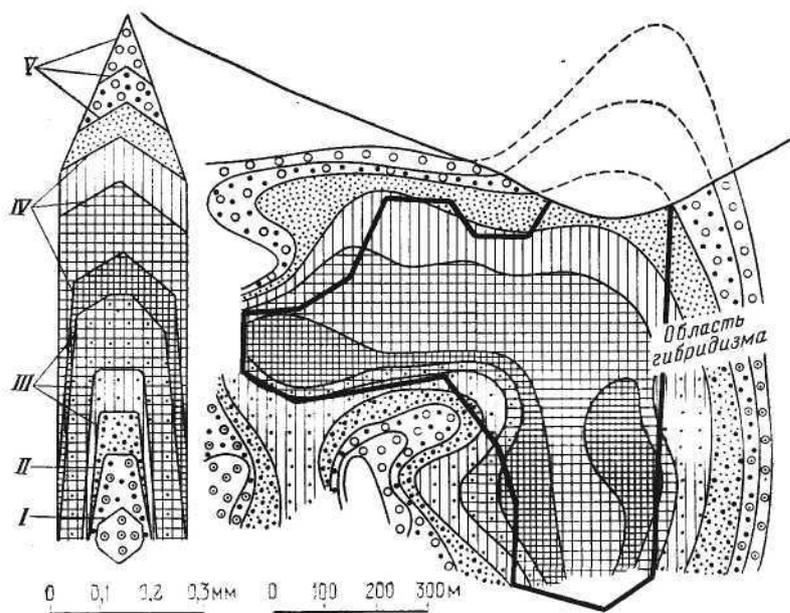


Рис. 26. Зональное строение кристалла касситерита (слева) и ореол касситеритовой минерализации (справа). По Н. З. Евзиковой.

Кристалл изображен в проекции на  $\{110\}$ , ореол минерализации — в продольной проекции на вертикальную плоскость, I—V — поверхности разграничения соответствующих кристалломорфологических типов касситерита или границы распространения их в оруденном пространстве. Наиболее густо заштрихованная область соответствует переходу от кристалломорфологического типа III к типу IV (слева) и наиболее продуктивному по содержанию олова горизонту ореола минерализации (справа). Толстой ломаной линией обозначен контур кондиционных оловянных руд, пунктирными линиями — эродированная часть минерализации. В области гибридности распространяются укороченные по оси с кристаллы касситерита, грани которых характерны для различных кристалломорфологических типов и обычно встречаются порознь.

ассоциации, а не парагенезисы в точном понимании этого термина. Однако все исследователи, оговаривая или не оговаривая это, используют ассоциации не формально, не в полном объеме их полигенного многообразия, а «вычлняют» относительно однородные по характеру взаимосвязей и генетической природе «куски» ассоциаций. И, хотя в такой операции есть определенный элемент произвольности, подобный «ассоциативный» подход к региональным топоминералогическим построениям является наиболее рациональным.

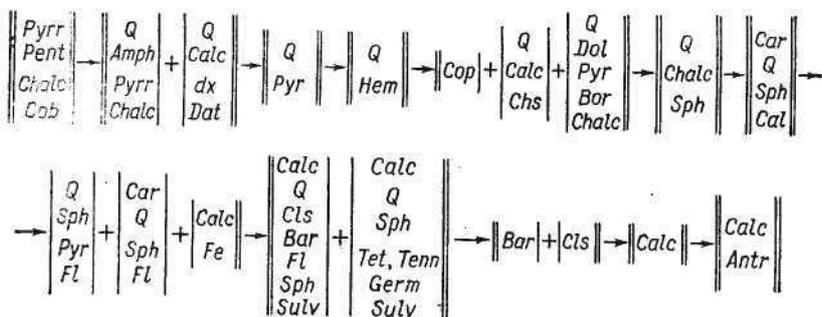
Опыт наших топоминералогических работ привел к необходимости выделения в качестве элементарной топоминералогической единицы минеральной формации. Под *минеральной формацией* понимается устойчиво повторяющаяся ассоциация минералов. Фактор повторяемости свидетельствует о закономерном характере таких ассоциаций. Именно ассоциациями в таком их содержании оперируют исследователи практически во всех топоминералогических исследованиях [4]. Минеральная формация может быть представлена одним или несколькими парагенезисами; обычно генетическая гетерогенность или гомогенность формаций сразу же устанавливается в процессе формационного анализа. Минеральные формации называются по входящим в них минералам (например, кварц-мусковит-молибденит-шеелит-флюоритовая) и индексируются общепринятыми сокращениями названий минералов (*Q—Muse—Mol—Sch—Fl*). Выделение минеральных формаций предлагается и другими минералогами [4, 42], при этом они вкладывают в это понятие такой же или более широкий смысл.

В нашем понятии минеральная формация несопоставима с рудной формацией, имеет более узкий, более конкретный смысл. К ней, однако, применим весь методический аппарат анализа рудных формаций, а точные количественные методы, разрабатываемые школой Р. М. Константинова, оказываются даже более эффективными, чем в приложении к рудным формациям. Опыт использования формационного анализа на примере изучения гидротермальной минерализации Пайхойско-Южновоземельской минералогической провинции был изложен в работе [61].

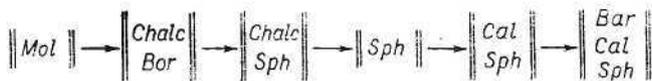
#### **ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ РЯДЫ**

На рис. 25 приводятся примеры пространственно-временных рядов изменения морфологии кристаллов касситерита и анатаза. В подобные ряды можно выстроить минералы, слагающие минеральный агрегат; минералы, слагающие минеральное тело; минералы или минеральные парагенезисы, образующие месторождение; минеральные формации, входящие в состав минералогических провинций и т. п.

В работе, обобщающей опыт среднемасштабной топоминералогии [61], автором был выведен пространственно-временной ряд гидротермальных минеральных формаций Пайхойской-Южновоземельской провинции, который в сокращенном варианте имеет вид



Для Саурей-Лекынтальбейского рудного узла на Полярном Урале В. И. Силаев устанавливает следующий, генерализованный ряд:



Собственно такие же ряды представляют собой и различные эволюционные диаграммы, увязывающие во времени минеральные формации с основными этапами магматизма и другими событиями геологической истории. Подобные эволюционные построения, синтезирующие широкий комплекс данных, приводятся и автором [61].

Эти ряды, во-первых, отражают распределение минералов в пространстве, отражают минеральную зональность топосов и могут успешно использоваться для прогнозирования минерального состава неизученных (например, закрытых) участков. Во-вторых, отражая эволюционные закономерности минералообразования, они иллюстрируют прерывистость или непрерывность процессов, их направленность, путем сравнения с подобными рядами хорошо изученных объектов позволяют предсказать возможность наличия новых членов (новых для региона минералов, парагенезисов, формаций). В-третьих, ряды растягиваются на длительные интервалы времени, нередко охватывая несколько геологических периодов и даже эпох, поэтому появляется возможность хронологической привязки некоторых членов ряда и увязки относительной системы времени с абсолютной.

## МИНЕРАЛОГЕНЕТИЧЕСКИЕ РЕКОНСТРУКЦИИ

Цель минералогенетических реконструкций, которым уделяется серьезное внимание при топоминералогических исследованиях, — это установление эволюции процессов минералообразования в связи с геологической эволюцией изучаемого объекта (минеральное тело, месторождение, регион).

Общая методическая схема минералогенетических реконструкций [10, 60] следующая: вначале восстанавливаются результаты минералогических процессов в их естественной последовательности, а затем по ним с применением соответствующих методов и приемов расшифровки содержащейся в минералах генетической информации восстанавливается сам процесс минералообразования, определяются величины параметров состояний среды, в которых он протекал. Объектами минералогенетических исследований, являются, следовательно, минералы или другие минеральные системы, а методическую основу минералогенетических реконструкций составляют пространственно-временные модели минералогических систем (см. гл. VII), теоретические представления и методы генетико-информационной минералогии [60]. Задача состоит в том, чтобы пространственно-временную модель объекта с помощью генетико-информационных методов трансформировать в модель генетическую.

Детальность, точность и достоверность минералогенетических реконструкций определяются не только детальностью исследований, но и совершенством методов расшифровки генетической информации, разработка которых в целом находится пока еще в неудовлетворительном состоянии. Следовательно, реконструкция проводится на разных уровнях детальности, причем каждый уровень характеризуется определенными методическими подходами. Они детально рассмотрены в работе автора [60]. Здесь же по критериям детальности мы будем классифицировать минералогенетические реконструкции на два типа: 1) качественные, дающие общее представление о генетической природе тех или иных топоминералогических объектов, и 2) количественные, дающие достаточно точную оценку минералогических явлений и количественную оценку параметров, в которых они протекали.

### КАЧЕСТВЕННЫЕ МИНЕРАЛОГЕНЕТИЧЕСКИЕ РЕКОНСТРУКЦИИ

Качественные минералогенетические реконструкции топоминералогических объектов могут проводиться с помощью информационно-энтропийного анализа, типоморфического анализа и с применением тех или иных качественных индикаторов генезиса.

В основе информационно-энтропийного анализа минеральных систем лежит понятие о величине их информационной энтропии, которая дана или в прямом цифровом выражении (в единицах уровня энтропии или количества информации) с использованием известной шенноновской формулы (см., например, работу И. С. Вентцель «Теория вероятностей», 1964), или в косвенном выражении в виде каких-либо характеристик внутренней структурной неоднородности системы (например, в баллах сложности состава, искажения формы и т. п.). Относя изменение информационного содержания (внутреннего разнообразия) минеральной системы к критерию ее развития, мы при сравнении величины энтропии минеральных систем в пространственно-временных рядах или при сравнении результатов с известными данными можем оценить уровень эволюционного развития системы и получить представление о главнейших генетических факторах.

В информационных показателях можно «сжать» большой объем информации (практически неограниченное число зависимых и независимых характеристик минералов), поэтому их очень удобно использовать для показа данных на минералогических картах. Например, использование показателей энтропии и анэнтропии состава сфалерита в минералогическом картировании позволило нам [61] установить самые общие закономерности развития гидротермальных систем в Пайхойско-Южновоземельской провинции. О. Б. Дудкин успешно применил этот анализ для установления термодинамической эволюции ряда апатитовых месторождений Кольского полуострова, О. Г. Сметанникова и др. — для определения основных черт генезиса пегматитов, В. И. Силаев и В. А. Петровский — для раскрытия генетических закономерностей перекристаллизации карбонатных пород и т. д. В качестве примера информационно-энтропийного анализа на основе косвенных показателей можно сослаться на исследование В. Б. Василенко и др., которые определяют условия образования апатита Селигдарского месторождения по так называемой микрокристалличности (величина блоков когерентного рассеяния и показатель относительного микроискажения), являющейся отражением морфолого-структурной энтропии минерала. Другие примеры приведены в работе автора [60].

Типоморфический анализ [55. 60]. популярность и эффективность которого в последние годы все более возрастает, базируется на явлении (и свойстве) типоморфизма минералов, т. е. на их способности отражать общую генетическую природу в своей конституции и свойствах. Сущность типоморфического анализа заключается в получении обобщенного представления о генезисе объекта путем сравнения минералов изучаемого месторождения (или любого другого объекта) с минералами из месторождений известной генетической природы. Конституционные особенности и свойства, характерные для минералов опре-

деленного генезиса, называются типоморфными признаками. Обобщенная статистическая модель минерала из каждого конкретного объекта называется локатипом. В процессе типоморфического анализа, следовательно, сравниваются по типоморфным признакам локатипы минералов различных топоминералогических объектов. На методике типоморфического анализа мы останавливаться не будем, так как она детально изложена в специальной литературе [60].

Близким к типоморфическому анализу является и метод оценки условий образования минералов по качественным показателям (или индикаторам) генезиса. Например, по морфологическим особенностям агрегатов можно установить факт плавления ряда минералов в рудах и даже примерно определить температуру плавления. Определенные особенности строения минералов (например, наличие планарных элементов в кварце, фрагментирование индивидов, появление диаплектовых стекол и др.) являются индикаторами ударного метаморфизма. Можно перечислить множество и других, подобных индикаторов различных явлений: растворения минералов, механической абразии, радиоактивного облучения, перегрева и т. п.

Многие признаки минералов, статистически коррелируясь с минералогенетическими параметрами, позволяют примерно оценивать их величину. Так, по содержанию кадмия в сфалерите на основе решения эмпирических уравнений в определенных типах месторождений удается установить температуру кристаллизации сфалерита, а по составу скаполита, апатита и кордиерита — судить о флюидном режиме глубинных зон, в частности зон гранулитового метаморфизма. По кристалломорфологическим особенностям минералов можно получить „представление о режиме кристаллизации; например, тонкоигольчатый апатит рассматривается как признак контактового метаморфизма и быстрой кристаллизации магматического расплава. Нужно отметить, что морфология апатита характеризуется высокой информативностью. Установлена отчетливая закономерность уменьшения удлинения и повышения роли пинакоидальных граней на кристаллах апатита из пород от относительно высокотемпературных к относительно низкотемпературным (рис. 27). Эта закономерность находит экспериментальное подтверждение. Следовательно, форму кристаллов апатита можно использовать для приближенной оценки температуры минералообразования.

Подобные качественные индикаторы для приближенно-количественных оценок, конечно, нужно применять с большой осторожностью, в основном для тех условий (типов месторождений, пород и т. п.), на которых они проверялись. Однако на их основе можно создать достаточно представительные минералогенетические реконструкции, имеющие серьезное прогнозное значение. Одним из примеров топоминералогического исследования, содержащего элементы такой реконструкции, может служить ра-



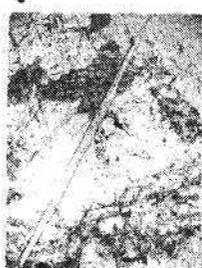
Кварцевые жилы



Гранит



Кварцевый диорит



Габбро

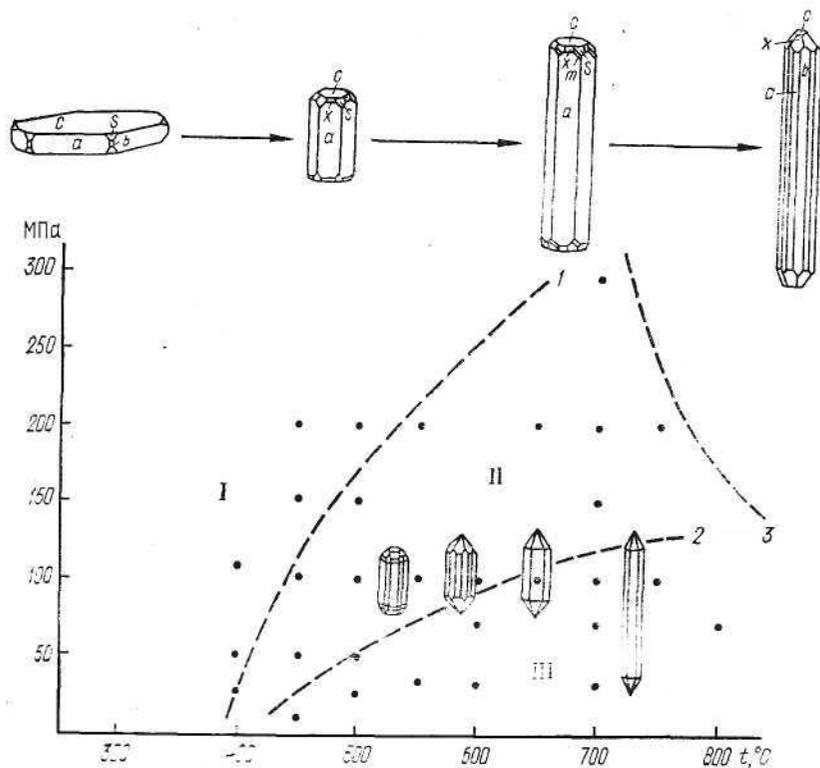
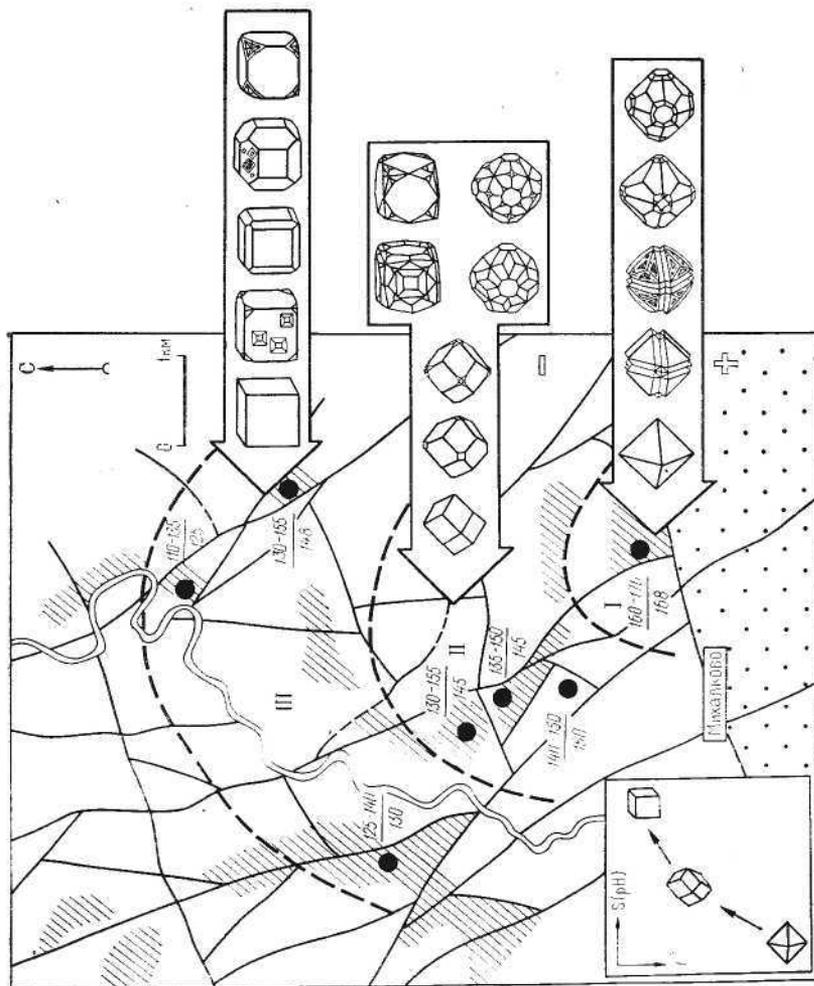


Рис. 27. Типоморфизм апатита из различных типов горных пород.

Природный кристаллогенетический ряд иллюстрирует зависимости формы кристаллов от температуры кристаллизации. Экспериментальная P-T-диаграмма подтверждает эту зависимость. I — область, в которой апатит не кристаллизуется; II — область призматических кристаллов с удлинением по оси  $c$  до 6; III — область игольчатых кристаллов с удлинением по оси  $c$  более 6; 1 — граница появления призматических кристаллов; 2 — граница появления игольчатых кристаллов; 3 — граница аппаратурных возможностей



**Рис. 28.** Зональное распределение габитусных типов кристаллов флюорита на Михалковском флюоритовом месторождении в Центральном Родопе (НРБ). По данным Б. Зидаровой и др.

Цифры около точек, отмечающих положение флюоритовых месторождений, — предельные и средние температуры гоменизации включений; I—III — зоны распространения кристаллов различных габитусов

бота Б. Зидаровой, М. Малеева, И. Костова по изучению Михалковского флюоритового месторождения в Болгарии. Развитие на месторождении морфологические типы кристаллов флюорита, как показывает минералогическое картирование, распределены в пространстве строго закономерно, формируя отчетливую зональность (рис. 28). Опираясь на установленные тенденции изменения формы кристаллов в зависимости от температуры и химизма среды, эту зональность можно интерпретировать как температурную, делая из этого соответствующие выводы.

## **ПРИНЦИПЫ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ МИНЕРАЛОГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕКОНСТРУКЦИЙ**

Количественные минералогенетические реконструкции геологических объектов осуществляются с помощью генетико-информационного анализа [60], базирующегося на явлении (и свойстве) гомоморфизма минералов, т. е. на наличии функциональных зависимостей «свойство минерала—состояние среды». Сущность генетико-информационного анализа заключается в установлении признаков минерала, являющихся количественными индикаторами определенных параметров минералогенетической среды, и в исследовании с помощью этих индикаторов минералообразующих процессов.

Наиболее ответственной операцией генетико-информационного анализа является установление и градуировка индикаторных признаков, которые можно рассматривать как своеобразные минералогические термометры и барометры, минералогические гравиметры и сейсмографы, потенциометры и часы и т. п. Общие понятия об информативности таких признаков уже были рассмотрены нами в гл. VI; более детально методы установления индикаторных признаков были рассмотрены автором [60].

В соответствии с законом многообразия форм записи минералогенетической информации любой параметр минерала содержит информацию о любом параметре минералогенетической среды. Однако существует и определенная специализация различных информационных каналов, которая наряду с методологическими ограничениями сужает возможности расшифровки минералогенетической информации.

Рассмотрим конституционные особенности и свойства минералов, обычно используемые в качестве индикаторных признаков. Уже само существование минерала в определенном минеральном окружении (парагенезисе) является следствием определенного состояния минералогенетической среды. На основе минерального состава и с помощью парагенетического анализа можно получить представление о химическом составе среды, концентрации компонентов (или связанных с ней величинах—химических потенциалах, фугитивности, активности компонен-

тов в растворах), РТ-условиях. Успешно используются в качестве индикаторов минералообразования акцессорные минералы [26].

Особенности кристаллической структуры минералов используются чаще всего как индикаторы химического состава среды, температуры и давления минералообразования, некоторых кинетических особенностей процесса кристаллизации. Обычно носителями минералогенетической информации служат структурные дефекты и параметры элементарной ячейки; эффективным структурным индикатором является структурная плотность минералов.

Данные об изотопном составе входящих в структуру минерала элементов составляют основу для определения абсолютного возраста минералов по соотношению радиогенных изотопов, используются как геотермометры, как индикаторы биогенных процессов минералообразования и т. п.

Химический состав минерала является наиболее надежным индикатором химизма минералогенетической среды. На зависимости коэффициентов распределения компонентов между сокристаллизующимися минералами от температуры и давления основана большая серия довольно надежных геотермометров и геобарометров.

Морфологические особенности минералов, главным образом особенности формы кристаллов, которые легко поддаются количественной характеристике, нередко используются как индикаторы различных физико-химических параметров среды. Но главное генетико-информационное значение формы кристаллов состоит в том, что она отражает симметрию минералогенетической среды, симметрию питания и дает возможность восстановить пути движения минералообразующих растворов, ориентировку минерала в пространстве, направление силы тяжести во время минералообразования.

Богатая минералогенетическая информация содержится в анатомических особенностях минеральных индивидов. В зональности индивидов записана динамика минералообразующего процесса; нарушения первичной анатомической картины раскрывают особенности процессов изменения минералов и т. п. Особенно популярными объектами генетико-информационных исследований являются различные включения в минералах (твердые, жидкие, газообразные). На их исследовании основаны наиболее важные методы восстановления химизма среды, методы геотермометрии и геобарометрии.

Физические свойства минералов, поскольку они взаимосвязаны со структурой и составом минералов, являются источниками той же генетической информации, что и конституционные особенности, но зачастую они более удобны для генетико-информационного анализа, поскольку могут быть более чувствительными и легко измеримыми.

Можно перечислить ряд минералов, для которых разработаны многочисленные и разнообразные генетико-информационные методы, использующиеся как опорные при минералогенетических реконструкциях. Это кварц, кальцит, слюды, полевые шпаты, пироксены, оливин, многие сульфиды.

## **МИНЕРАЛОГЕНЕТИЧЕСКИЕ ИНДИКАТОРЫ**

В табл. 9 мы попытались свести данные о главнейших минералогенетических индикаторах, используемых в генетико-информационном анализе. Таблица дает представление об арсенале средств генетико-информационных исследований. Конечно, приведенный в ней перечень индикаторов далеко не полный; даны лишь наиболее популярные хорошо разработанные индикаторы или индикаторы, созданные на чем-то отличающейся основе. Индикаторы сходной природы даны ограниченно. Например, число минералогических термометров и барометров, основанных на принципе минеральных равновесий, можно было бы дополнить амфибол-плаггиоклазовым, амфибол-гранатовым» роговообманково-пироксеновым, биотит-клинопироксеновым, биотит-кордиеритовым, ставролит-мусковит-хлоритовым, амфибол-биотитовым, клинопироксен-ортопироксеновым, клинопироксен-гранатовым, ортопироксен-гранатовым, оливин-клинопироксеновым, плаггиоклаз-биотитовым, кордиерит-гранат-силлиманитовым и другими применяемыми или разрабатываемыми методами термобарометрии. То же относится к минералогическим часам и другим индикаторам.

Используя минералогические индикаторы для расшифровки генетической информации, содержащейся в минералах, необходимо иметь в виду два важных обстоятельства, определяющих эффективность этого типа исследований. Первое — выбор наиболее подходящих для каждого конкретного исследования, наиболее информативных индикаторов; общие принципы выбора уже рассматривались в гл. VI. Второе — это отделение первичной генетической информации от наложенной, отделение информации от помех; методические основы этой операции разобраны автором [60].

## **МИНЕРАЛОГЕНЕТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ**

Минералогенетические реконструкции объектов, представляющие собой модели их формирования и развития с конкретной и строгой пространственно-геологической и хронологической привязкой всех минералогенетических событий, с приближенными или строгими количественными данными о параметрах процессов, составляют конечную цель генетических исследований в топоминералогии.

**Минералогические индикаторы физико-химического состояния и параметров минералогенетической среды**

Состояние минералогенетической среды, параметры	Индикаторы	Особенности применения индикаторов
Общая структура	<p><i>Индикаторы симметрии среды</i></p> <p>Приложение универсального принципа симметрии Кюри к анализу формы, анатомии и анизотропии свойств индивида (на реальном индивиде сохраняются только те элементы симметрии, которые являются общими для индивида в его идеальном развитии и для среды)</p> <p><i>Индикаторы вихревой структуры среды и вращения индивидов во время роста</i></p> <p>S-образное и спиральное распределение механических включений в разрезах кристаллов, проведенных через центр индивида (структуры «снежного кома»)</p>	<p>Наиболее эффективно используется при изучении кристаллов, выросших в свободных полостях, и метакристаллов, при изучении агрегатов и минеральных тел</p> <p>Применяется при изучении метакристаллов в метаморфических породах</p>
Фазовый состав	<p><i>Индикаторы фазового состава среды</i></p> <p>Фазовый состав реликтов минералогенетической среды в минеральных индивидах, консервирующихся в виде включений</p> <p>Морфологические особенности индивидов (гравитационно искаженная форма кристаллов свидетельствует об их росте из гетерогенных, коллоидных растворов)</p> <p>Скульптура и гранитный рельеф кристаллов (спиральные формы весьма характерны для кристаллов, выросших из паров или расплавов, нередко встречаются на кристаллах, выросших из растворов)</p> <p><i>Индикаторы плотности жидкой фазы</i></p> <p>Измерение броуновского смещения мелких газовых пузырьков в жидких включениях и вычисление плотности решением уравнения Эйнштейна—Смолуховского</p>	<p>Необходимо учитывать изменения, которые происходили в момент кристаллизации и в процессе «жизни» минерального индивида</p> <p>Применим для индивидов, выросших в открытых полостях</p> <p>Индикаторы этого типа — косвенные</p> <p>Применение индикатора ограничено редкой встречаемостью включений с пузырьками подходящего размера</p>

Состояние минералогенетической среды, параметры	Индикаторы	Особенности применения индикаторов
Химический состав	<p><i>Индикаторы химического состава</i></p> <p>Химический состав минерала (содержание минералообразующих и аксессуарных элементов в минерале отражает химический состав среды; для количественных определений следует учитывать условия кристаллизации и величину коэффициента распределения соответствующего элемента между минералом и средой)</p> <p>Химический состав реликтов минералогенетической среды, законсервированных в виде включений в минералах</p> <p>pH и Eh индивидуальных включений в минералах</p> <p>Кристалломорфология и свойства минералов, определяемые химизмом среды</p> <p><i>Индикаторы кислотности—щелочности и окислительно-восстановительной обстановки (минералогические pH-метры и потенциометры)</i></p> <p>Минералы и пары минералов, содержащие элементы с переменной валентностью (определение проводится по полям этих элементов на pH—Eh-диаграммах)</p> <p>Кварцевый pH-метр основан при изучении физическими методами физических следствий вхождения в решетку кварца атомов алюминия, вызывающего недостатка валентности и захват щелочных ионов-компенсаторов (литий, натрий) и водорода. Соотношение ионов-компенсаторов и водорода—функция pH-среды</p>	<p>Наиболее надежный качественный и приближенно-количественный индикатор; точные количественные оценки затруднены отсутствием строгих данных об условиях кристаллизации</p> <p>Затруднения вызывают химический анализ содержимого мелких индивидуальных включений (валовые исследования методом водных вытяжек дают малодостоверные результаты) и учет метаморфизма включений</p> <p>Те же ограничения, что и при определении химического состава среды</p> <p>Индикаторы дают лишь качественную оценку; применение ограничено наличием экспериментальных данных (относительно хорошо разработанных для кварца)</p> <p>Применение ограничено наличием экспериментальных данных</p> <p>Индикатор разработан экспериментально, на природном материале проверен недостаточно</p>

Состояние минералогенетической среды, параметры	Индикаторы	Особенности применения индикаторов
Направление силы тяжести	<p><i>Индикаторы вертикали (минералогические отвесы)</i></p> <p>Гравитационно искаженная форма минеральных индивидов, определяемая:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• неравномерным питанием верхних и нижних граней;</li> <li>• неодинаковым зарождением и функционированием центров роста на верхних и нижних гранях;</li> <li>• гравитационным распределением посторонних фаз в среде;</li> <li>• гравитационно обусловленной анизотропией разрушения кристаллов и др.</li> </ul> <p>Это отражается в асимметрии кристаллов, в различии гранных скульптур, в распределении дефектов двойниковых субиндивидов, степени разориентировки блоков</p> <p>«Присыпки» на обращенных вверх гранях кристаллов</p> <p>Распределение включений, положение газовых пузырьков и осадков в застекловавшихся или расшнурованных включениях</p> <p>Сталактиты, сталагмиты, сталагматы и другие «натечные» агрегаты</p> <p><i>Индикаторы горизонтали (минералогические уровни)</i></p> <p>Параллельно-пластинчатые агрегаты, сформировавшиеся в результате пленочной кристаллизации на поверхности раствора</p> <p>Слонность агрегатов «отстойников», сформировавшихся в заполненных раствором открытых полостях, и распределение минеральных индивидов в них</p>	<p>Применим ко многим объектам, но требует большого объема исследований, необходимых для сбора статистических данных</p> <p>Определение положения палеовертикали осуществляется наиболее быстро</p> <p>Наиболее точный индикатор, но применим для узкого круга объектов</p> <p>Положение горизонтали определяется точно и быстро, но подобные образования встречаются редко</p> <p>Те же самые ограничения</p>

Состояние минералогенетической среды, параметры	Индикаторы	Особенности применения индикаторов
Радиационная обстановка	<p><i>Индикаторы интенсивности и суммарной дозы ионизирующего излучения (минералогические палеодозиметры)</i></p> <p>Наличие радиационных дефектов в минералах и связанных с ними явлений (радиационная окраска и т. п.), их типы, распределение, плотность</p>	<p>Могут использоваться не только как палеодозиметры, но и как минералогические часы</p>
Температура	<p><i>Индикаторы температуры (минералогические термометры или геотермометры)</i></p> <p>Температурные пределы устойчивости минералов (в том числе температуры плавления)</p> <p>Поля устойчивости минералов и минеральных ассоциаций на <i>PT</i>-диаграммах</p> <p>Характерные температурные точки конституционных трансформаций (точки инверсии полиморфных модификаций, точки распада и гомогенизации твердых растворов, температуры кристаллизации эвтектик, температуры существования несмешивающихся жидкостей и др.)</p> <p>Особенности структурного строения минералов (соотношение порядка—беспорядка в калиевых полевых шпатах и плагиоклазах)</p> <p>Изотопные геотермометры (основанные на зависимости коэффициента распределения изотопов между минералом и средой):</p> <p>кислородный геотермометр — по <math>^{18}\text{O}</math> или <math>^{18}\text{O}/^{16}\text{O}</math> геотермометр по распределению изотопов серы между сфалеритом и галенитом</p>	<p>Дает весьма приблизительные данные. Наиболее применимы для систем магматического генезиса</p> <p>Применение ограничено наличием экспериментальных данных</p> <p>Геотермометры этого типа дают вполне удовлетворительные приблизительные данные</p> <p>Дает удовлетворительные данные, но требует дальнейшего совершенствования</p> <p>Хорошо обоснованы теоретически, но экспериментально проработаны в общем неудовлетворительно:</p> <p>наиболее надежный и хорошо разработанный геотермометр находится в стадии разработки</p>

Состояние минерало-генетической среды, параметры	Индикаторы	Особенности применения индикаторов
	<p>геотермометр по распределению изотопов серы между сфалеритом, галенитом и пиритом</p> <p>аргоновый изотопный геотермометр</p> <p>Графитовый геотермометр, основанный на зависимости параметров элементарной ячейки графита от температуры его образования</p> <p>Геотермометры, основанные на распределении элементов между сосуществующими минералами (метод минеральных равновесий) или минералами и средой:</p> <p>двуполевошпатовый геотермометр Барта—Рябчикова — на распределении альбитового компонента между щелочным полевым шпатом и плагиоклазом</p> <p>плагиоклазовый геотермометр Кудо—Вейля — на анализе соотношений альбитового и анортитового компонентов</p> <p>биотитовый геотермометр Офтедаля — на зависимости содержания скандия и лития в биотите от температуры</p> <p>магнетитовый геотермометр Баддингтона—Тинсли—Тугаринова — на температурной зависимости содержания титана, ванадия и марганца в магнетите, сокристаллизующемся с ильменитом</p>	<p>разработан на экспериментальных данных; недостаточно широко опробован на природном материале; находится в стадии разработки</p> <p>Разработан экспериментально, но на природном материале испытан слабо</p> <p>Принцип геотермометров основан на решении функции <math>K_{a-b}^{I-II} = f(T, P)</math>; применим для тех случаев, когда влияние <math>P</math> незначительно или величина <math>P</math> известна (I—II — сокристаллизующиеся минералы; а—б — элементы, присутствующие в обоих минералах)</p> <p>Во всех случаях требуется доказательство предельного насыщения системы элементом — измерителем температуры и доказательство достижения равновесия:</p> <p>геотермометр «работает» при давлениях не выше 0,3 ГПа</p> <p>методически разработан неудовлетворительно</p>

Состояние минералогенетической среды, параметры	Индикаторы	Особенности применения индикаторов
	кальцитовый геотермометр Харкера—Татла—Графа—Гольдсмида — на распределении магния между кальцитом и доломитом (а также другими магниесодержащими минералами)	для пары «кальцит—доломит» разработан хорошо благодаря последним работам А. С. Таланцева
	гранат-биотитовый геотермометр Перчука — на распределении компонентов между минералами клинопироксен-гранатовый геотермометр — на распределении магния, кальция, железа, марганца	довольно надежный и широко применяется построен по экспериментальным данным, испытан ограниченно
	пирротиновый геотермометр Арнольда — на содержании железа в пирротине	пирротин должен находиться в равновесии с пиритом при отсутствии халькопирита
	сфалеритовый геотермометр Куллера — на содержании железа в сфалерите	сфалерит должен находиться в равновесии с пирротинном; на зависимость $t = f(\text{FeS}/\text{ZnS})$ влияют различные трудноучитываемые факторы
	сфалерит-халькопиритовый геотермометр — на распределении кобальта	слабо разработан, поэтому применимость ограничена
	пирит-пирротиновый геотермометр — на распределении никеля и кобальта	слабо разработан
	кварцевый геотермометр Деннена — на содержании алюминия в кварце	является приближенным, но на ряде объектов работает удовлетворительно; необходимо знать содержание структурного алюминия
	молибденитовый геотермометр — на содержании рения в молибдените	То же
	вольфрамитовый геотермометр — на соотношении железа и марганца в вольфрамите	„

Состояние минералогенетической среды, параметры	Индикаторы	Особенности применения индикаторов
	<p>Геотермометры на основе экспериментов с включениями минералогенетических сред:</p> <p>метод гомогенизации полифазных, чаще газовой-жидких включений (основан на допущении, что при кристаллизации минерала захватываются гомогенные порции среды, гетерогенизирующиеся при последующем падении <math>T</math> и <math>P</math>; при нагревании включения оно вновь гомогенизируется при температуре, соответствующей температуре кристаллизации)</p> <p>методы декрепитации (декрептофонический, декрептовакуумный) — фиксация звуковых, барических, гравитационных и других эффектов, связанных с разрывом включений при нагревании (основаны на допущении, что при температурах, несколько превышающих температуры кристаллизации, в результате скачка давлений происходит разрыв стенок включений)</p> <p>Термолюминесцентный геотермометр (основан на анализе кривых термолюминесценции минералов и их сравнении с соответствующими кривыми восстановленной облучением термолюминесценции)</p> <p>Индикаторы температуры, основанные на анализе окраски термических, электрических, магнитных, механических свойств, фотоупругого эффекта на границе кристалл—включения и др.</p>	<p>Применение требует доказательства сингенетичности минералу изучаемых газовой-жидких включений и отсутствия их метаморфизма:</p> <p>наиболее надежный метод; необходимо введение поправок на состав, концентрацию растворов с учетом кристаллизации части вещества на стенках вакуоли</p> <p>метод пригоден для приближенной оценки температур кристаллизации, так как на температуру декрепитации влияют многие неучитываемые факторы</p> <p>Пригоден для определения приблизительных температур метаморфизма термолюминесцирующих минералов</p> <p>Имеют частичное значение, приблизительны, разработаны плохо</p>

Состояние минералогенетической среды, параметры	Индикаторы	Особенности применения индикаторов
Давление	<p>Индикаторы температуры, основанные на анализе температурных зависимостей формы кристаллов</p> <p><i>Индикаторы давления (минералогические барометры или геобарометры)</i></p> <p>Почти все рассмотренные выше геотермометры являются одновременно и геобарометрами и используются для определения давления с введением поправок на температуру</p> <p>Геобарометр по соотношению железистых карбонатов</p> <p>Геобарометры на основе экспериментов с включениями минералогических сред:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>по давлению газа в вакуоли в момент гомогенизации или в пересчете на этот момент</li> <li>по величине газового пузыря и температуре гомогенизации</li> <li>по разности коэффициентов расширения жидкости включения и минерала-хозяина</li> <li>по степени заполнения вакуолей и <i>PT</i>-диаграммам <math>H_2O</math></li> <li>по объему газовой фазы и уравнению Бойля</li> <li>по экспериментально установленным зависимостям содержания газов от температуры кристаллизации</li> </ul>	<p>Дает приближенную оценку, применение ограничено наличием экспериментальных данных</p> <p>Работает удовлетворительно</p> <p>Эта группа геобарометров наиболее надежна и близка к прямой геобарометрии. Применение требует доказательства сингенетичности включений, отсутствия метаморфизма и введения серии поправок</p>
Глубина минералообразования	<p><i>Минералогические профундометры</i></p> <p>Минералогическими профундометрами являются все индикаторы давления для условий соприкасающихся с поверхностью Земли систем (для условий реализации гидростатического давления)</p>	

Состояние минералогенетической среды, параметры	Индикаторы	Особенности применения индикаторов
Время минералообразования	<p>Минералы-индикаторы глубины кристаллизации, для которых доказана кристаллизация их в определенных <i>PT</i>-условиях (сподумен <math>t=550-600^{\circ}\text{C}</math>, <math>P_{\text{min}} - 0,6</math> ГПа, глубина <math>\sim 20</math> км)</p> <p>Ортовый профундометр основан на зависимости соотношения редких земель от глубины минералообразования</p>	<p>Применяется в ограниченных условиях, оценки глубины приблизительные</p> <p>Разработан эмпирически на примере пегматитов и применим для них</p>
	<p><i>Минералогические «часы»</i></p> <p>«Часы», основанные на анализе соотношений содержания первичных радиоактивных элементов и продуктов их распада:</p> <p>калий-аргоновые «часы»  <math>\text{K}^{40} + e \rightarrow \text{Ar}^{40}</math></p> <p>калий-кальциевые «часы»  <math>\text{K}^{40} \rightarrow \text{Ca}^{40} + \beta</math></p> <p>рубидий-стронциевые «часы»  <math>\text{Rb}^{87} \rightarrow \text{Sr}^{87} + \beta</math></p> <p>уран-свинцовые «часы» и гелиевые <math>\text{U}^{238} \rightarrow \text{Pb}^{208} + 8\text{He}</math></p> <p><math>\text{U}^{235} \rightarrow \text{Pb}^{207} + 7\text{He}^4</math></p> <p>уран-ксеноновые «часы»  <math>\text{U}^{238} \rightarrow \text{Xe} + \text{M} + \text{нейтроны}</math></p> <p>торий-свинцовые «часы»  <math>\text{Th}^{232} \rightarrow \text{Pb}^{208} + 6\text{He}</math></p> <p>радиоуглеродные «часы»  <math>\text{C}^{14} \rightarrow \text{N}^{14} + \beta</math></p> <p>«Часы», основанные на анализе содержания радиоактивных элементов в минералах и связанных с ними изменений в структуре и свойствах минералов:</p> <p>метод треков от осколочного деления (возраст минерала определяется как функция отношения плотности треков естественного деления к плотности треков деления урана под воздействием нейтронного облучения)</p>	<p>Эта группа методов является наиболее хорошо разработанной и наиболее надежной: при использовании необходим учет возможной утечки из минерала радиогенного элемента или внедрения в него радиогенного элемента, генерированного посторонним источником</p> <p>Методы слабо разработаны и применяются ограниченно, разработки их перспективны:</p>
		<p>метод надежный, но недостаточно строго разработанный</p>

Состояние минералогенетической среды, параметры	Индикаторы	Особенности применения индикаторов
	<p>метод плеохроичных ореолов (основан на физических изменениях, которые возникают в веществе кристалла-хозяина вокруг включения радиоактивного минерала; по ширине и плотности ореолов изменения определяется время захвата радиоактивного включения)</p> <p>метод определения возраста по плотности радиогенной окраски (определяется содержание радиоактивных компонентов или интенсивность их излучения, записывается спектр поглощения, окраска снимается нагреванием образца, затем она восстанавливается облучением на искусственном источнике известной мощности в определенном отрезке времени, снова снимается спектр поглощения, рассчитывается время, необходимое для достижения естественной окраски минерала под действием естественной радиоактивности; это время соответствует возрасту минерала)</p> <p>термолюминесцентные методы, основанные на измерении потери минералом или агрегатом минералов светосуммы, накопленной в процессе кристаллизации</p>	<p>методически несложен, но применим к ограниченному кругу минералов, содержащих радиоактивные включения</p> <p>метод разработан схематически, на природных минералах испытан ограниченно</p> <p>минерал способен записать и сохранить при отсутствии внешних воздействий возрастную информацию в виде светосуммы в течение <math>10^3</math>—<math>5 \cdot 10^6</math> лет; метод наиболее надежен для молодых минералов</p>

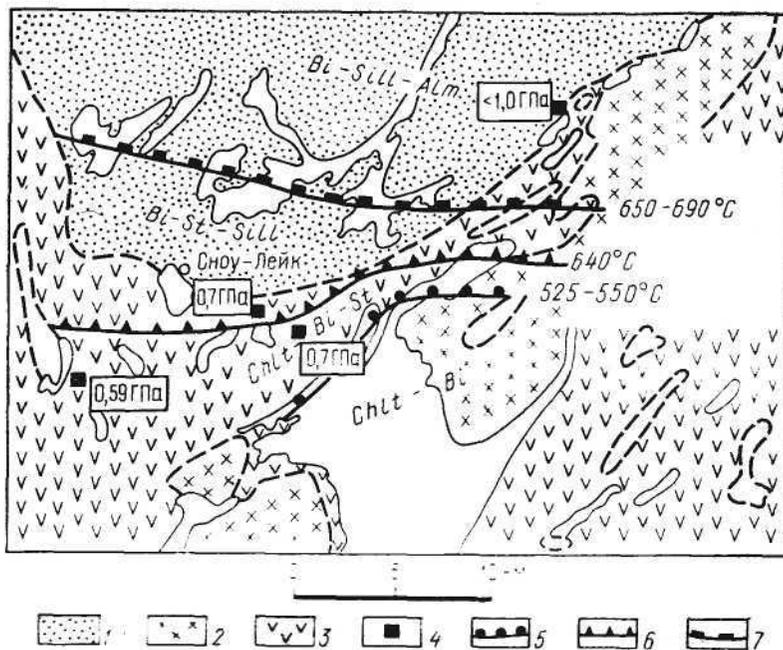
Ли́нералогенетические реконструкции — это пространственно-временные минералогические модели, в которые вводится генетическая информация, полученная в результате генетико-информационного анализа. Каких-либо строгих форм представления минералогенетических моделей пока еще не выработано. Эти модели, так же как и пространственно-временные, в настоящее время обычно выражаются в текстовой, табличной, диа-



граммной или картографической форме. В топоминералогических исследованиях картографическая форма пользуется преимуществом.

Минералогенетические модели, так же как и пространственно-временные, подразделяются на общие и частные, хотя резкой границы между ними провести нельзя. Общие модели дают максимально полное представление о развитии минерального мира всего объекта, частными отражаются какие-то определенные закономерности, какой-то один минералогенетический процесс или совокупность процессов. Пример частной модели был приведен на рис. 28 (температурная зональность Михалковского флюоритового месторождения в Болгарии).

Наиболее обычный способ представления минералогенетической информации, достаточно информационно емкий, компактный и наглядный, — это нанесение на диаграммы последовательности минералообразования данных о самых важных параметрах среды (температура, давление, химизм растворов и т. д.)



**Рис. 30.** Схематическая карта района Сноу-Лейк (США) с элементами палеотермометрии и палеобарометрии. По данным С. Д. Скотта.

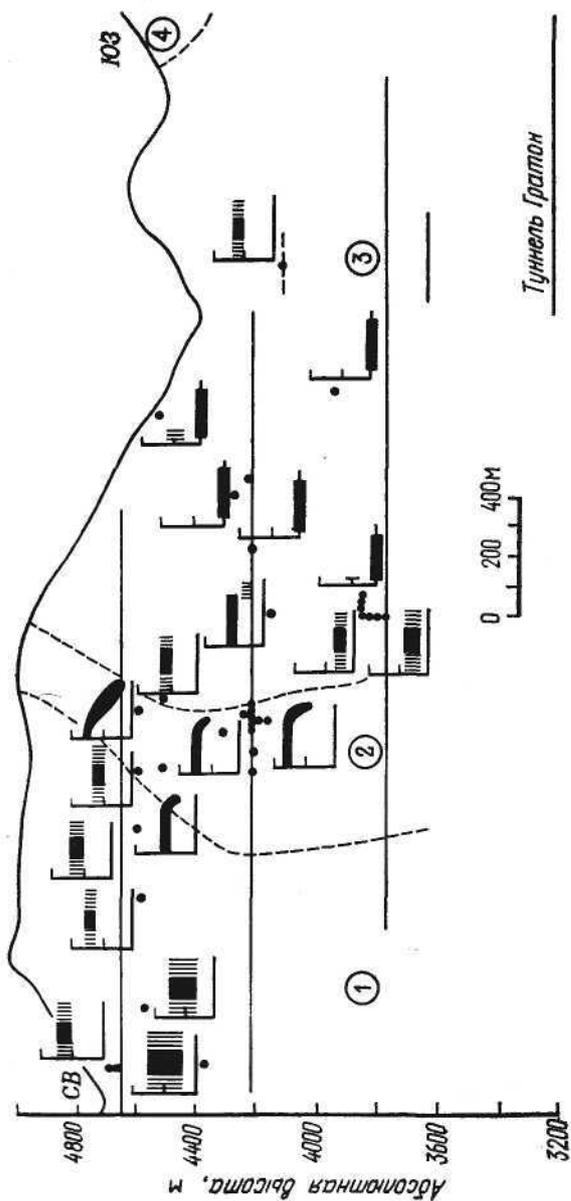
1 — гнейсовый комплекс; 2 — интрузивные породы (граниты, гранодиориты, диориты и габбро); 3 — метавулканические и метаосадочные породы; 4 — рудники; 5 — ставролит-биотитовая изограда ( $Bi+St+Q+H_2O/Chlt+Alm+Musk$ ); 6 — силлиманит-биотитовая изограда ( $Bi+Sill+H_2O/Chlt+St+Musk+Q$ ); 7 — силлиманит-биотит-альмандиновая изограда ( $Bi+Sill+Alm/St+Musk+Q$ ). Индексами на карте показаны различные формационные зоны

и их эволюции. Эти данные графически увязываются с кристаллизационной историей объектов и привязываются к известным возрастным рубежам. Сюда же может вводиться информация о тектоническом режиме топосов, периодах дробления, магматизма и других геологических событиях (рис. 29).

Обязательным этапом в обработке минералогенетической информации является синтез ее на пространственно-геологической основе, на основе минералогических или каких-либо других карт. Пока подобный синтез осуществляется весьма ограниченно, что связано с общим отставанием топоминералогических исследований. Можно показать лишь карты, на которых даются те или иные минералогенетические элементы, но, к сожалению, не весь комплекс важнейших параметров. Так, на приведенной на рис. 30 карте на основе сфалерит-пирит-пирротиновой геобарометрии метаморфизованных сульфидных руд района Сноу-Лейк в США показана величина давлений минералообразования в главнейших рудных полях. Здесь же на основе применения ряда геотермометров закартированы изограды метаморфизма. Карта дает отчетливое представление о взаимоотношении барического и температурного полей в процессе метаморфизма руд.

Другой пример представлен на рис. 31. Он иллюстрирует неравномерность режима минералообразования в объеме рудного тела полиметаллического месторождения Касапалка (Перу). Кинетическим показателем минералообразования является изменение концентрации ряда элементов по разрезу зерен тетраэдрита от центра их зарождения к периферии. По форме концентрационных кривых вырисовывается отчетливая зональность месторождения, коррелирующая с зональностью продуктивности оруденения. Следовательно, данные о характере распределения примесей внутри зерен можно использовать как для суждения о режиме минералообразования, так и для оценки и поисков полиметаллических руд. Подобные карты и разрезы, очевидно, должны стать основным видом представления обобщенной генетической информации в топоминералогических исследованиях.

Результаты минералогических исследований в конечном итоге их анализа, обработки и обобщения должны создать условия 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» [61] нами построена подобная схема для Пайхойско-Южноновоземельской провинции. Пространственно-временные ряды рудных формаций, определяющие минералогический облик провинции, увязаны на этой схеме с эволюцией осадконакопления в различных структурно-



**Рис. 31. Изменение содержания сурьмы в кристаллах тетраэдрита в процессе их роста на полиметаллическом месторождении Касапалка, Перу (продольный разрез). По И. Ву и У. Петерсон.**

Цифрами в кружках обозначены: 1 — андезитовые порфиры; 2 — андезитовые туфы, брекчи, агломераты; 3 — конгломераты; 4 — сланцы, песчаники, известняки. Точки на карте — места отбора проб. Графики показывают характер изменения содержания сурьмы в тетраэдрите во времени. Сплошными полями показаны наиболее установленные тенденции, штриховыми — менее надежные.

фациальных зонах, с колебаниями уровня седиментационных бассейнов, с тектоническим режимом, эффузивным и интрузивным магматизмом. Близкие эволюционные схемы приводятся и в ряде других топоминералогических обобщений [28], но опыт их создания еще мал.

## ГЛАВА IX

### МИНЕРАЛОГИЧЕСКОЕ КАРТИРОВАНИЕ

Главным методом топоминералогических исследований является минералогическое картирование.

Цель минералогического картирования заключается в систематическом пространственно-минералогическом изучении топоминералогических объектов, представляющих собой объекты картирования, с детальностью соответствующей масштабу картирования. В результате картирования составляются комплексная минералогическая карта объекта, являющаяся его пространственно-временной минералогической моделью, и серия частных карт, отражающих те или иные пространственные минералогические закономерности. На минералогической карте показываются нормальные минералогические поля [1] и минералогические аномалии, отражающие распределение минералов, минеральных ассоциаций и комплексов в пространстве, спроектированном на плоскость картирования (земная поверхность, горизонт горных выработок, плоскость разреза).

Минералогическая карта представляет собой важнейший документ, концентрирующий большой объем объективной топоминералогической информации. Это хранилище всего фактического материала топоминералогических исследований. На ее основе устанавливаются общий минералогический облик изучаемого объекта, его специфика, отличия от других одноранговых объектов; осуществляется прогноз рудоносности региона, планируются и проводятся минералогические поиски и оценка месторождений полезных ископаемых, дается горно-экономическая оценка всего объекта. Минералогическая карта, объективно отражает пространственные минералогические закономерности и их связь с геологической структурой; по ее данным устанавливается взаимосвязь эволюции минералообразования с геологическим развитием объекта.

Без минералогической карты теряется смысл топоминералогического исследования, оно превращается в составление обычного регионального кадастра минералов. Следовательно, минералогическое картирование необходимо рассматривать как главную стадию любого топоминералогического исследования, вкладывая в него основные затраты труда и средств.

## СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МИНЕРАЛОГИЧЕСКОГО КАРТИРОВАНИЯ

Минералогическое картирование в современных геолого-минералогических исследованиях, к сожалению, не получило широкого распространения и не стало систематическим, подобно геологическому, литолого-фациальному, геохимическому, хотя оно имеет давнюю историю и в ряде случаев эффективно использовалось для решения минерально-сырьевых задач.

Как известно, первыми картами, содержащими элементы геолого-минералогической информации, были минералогические карты. Они стали предшественницами современных геологических карт [54]. Примером древней минералогической карты является так называемый Туринский папирус, составленный в Египте около 1000 лет до н. э. [63]. На схематической карте показано распространение самородного золота в районе группы золотых рудников и даны сведения о некоторых вмещающих золото породах. Составление карт утилитарно важных минералов стало особенно широко практиковаться в средние века как в европейских странах, так и в России. В частности, на знаменитом «Большом чертеже» Русского государства 1570г. показаны главнейшие месторождения полезных ископаемых. Карты С. У. Ремезова, относящиеся к 1701 г., несут уже довольно детальную информацию о минеральных месторождениях, а позднее на подобные карты накладывается и геологический фон. Процесс эволюции древних минералогических карт в карты полезных ископаемых и в геологические карты проанализирован В. Г. Фекличевым [54], поэтому мы вернемся к истории собственно минералогического картирования.

Теоретические основы минералогического картирования в общих чертах были разработаны в 20-х годах А. Е. Ферсманом в его фундаментальных трудах по геохимии России и по геохимическим и минералогическим методам поисков полезных ископаемых [55]. Эти работы, а также методические разработки А. К. Болдырева и И. Ф. Григорьева возродили интерес к минералогическому картированию как к методу площадного изучения геологии минералов.

Я. Д. Готман, разработав специальную методику, составил минералогическую карту Коунрада, на которой показано распределение главнейших минералов в рудах. Н. В. Петровская [40] широко использовала минералогическое картирование при изучении колчеданных и золоторудных месторождений с целью приспособить этот метод для поисков и разведки рудных тел. В отличие от своих предшественников Н. В. Петровская в качестве элементов минералогического картирования использует не только отдельные минералы, но и минеральные комплексы и ассоциации, а также минералогические и структурные разновидности руд. Картирование ведется ею на геологической

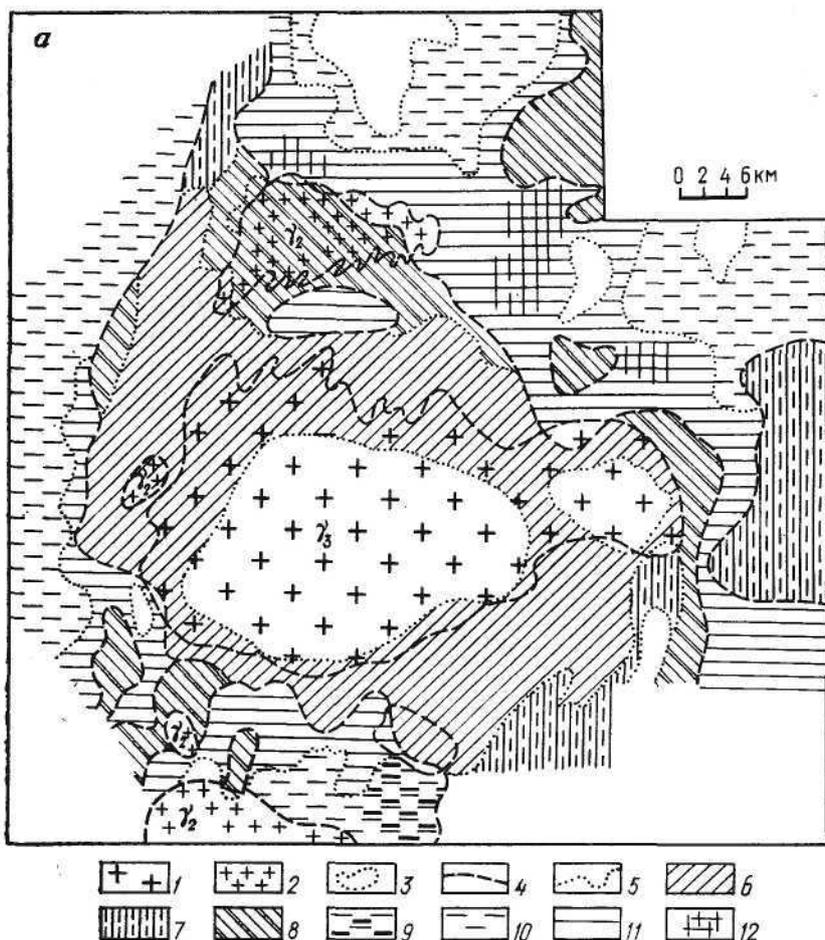


Рис. 32. Кварцметрические карты экзоконтакта Дзжабык-Карагайского массива. По Э. Ф. Емлину.

*a* — карта метаморфизма жильного кварца: 1 — микроклиновые граниты дзжабыкского типа ( $\gamma_3$ ); 2 — гранитоиды непостоянного состава ( $\gamma_2$ ); 3 — границы зоны, в которой жильный кварц отсутствует; 4 — границы зон кварцевых жил по типу структуры жильного кварца; 5 — границы подзон кварцевых жил по типу структуры жильного кварца; первая зона: 7 — гранулированный кварц с крупными гранулами, 7 — гранулированный кварц с мелкими гранулами, 8 — блокованный стекловидный кварц с реликтовой гигантозернистой структурой; вторая зона — 9 — «сахаровидный» гранулированный кварц с реликтами фрагментарной структуры, 10 — кварц фрагментарной структуры, 11 — крупнозернистый кварц со следами пластической деформации, 12 — гиганто-крупнозернистый кварц со следами пластической деформации.

*б* — карта содержания воды в газожидких включениях: 1 — среднее содержание воды в газожидких ( $1 \text{ см}^3/100 \text{ г}$  кварца) включениях в жильном кварце для элементарной площади сглаживания, 2, 3 — изолинии содержания воды, 4 — порфиридные микроклиновые граниты дзжабыкского типа, 5 — гранитоиды непостоянного состава неплюевского типа



основе, и топоминералогическая информация тесно увязывается с геолого-структурной. С. Д. Туровский и В. Ф. Ким [52] разработали один из методов крупномасштабного картирования, в основе которого лежат систематический отбор и анализ искусственных шлихов (протолочек). Метод особенно эффективен для выявления аномальных зон в областях развития магматических и петрографических пород, для площадей с жильной минерализацией. Б. М. Роненсон [44] успешно применил парагенетический анализ минералов при геологической съемке, вводя, таким образом, на геологическую карту обобщенную минералогенетическую информацию. Этот метод заслуживает широкого внедрения.

Важные методические и практические работы по минералогическому картированию различных объектов были выполнены в 60—70-х годах в Свердловском горном институте под руководством Г. Н. Вертушкова. В этой серии работ необходимо выделить топоминералогические исследования Б. В. Чеснокова [58 и др.], который провел детальное минералогическое картирование Березовского рудного района на Среднем Урале. Вторым эталонным объектом минералогического картирования, осуществляемого свердловскими минералогами, являются уральские месторождения жильного кварца. На них разработана эффективная методика кварцеметрической съемки, детально изложенная в серии подготовленных под редакцией Г. Н. Вертушкова сборников «Жильный кварц восточного склона Урала» [16]. Серия кварцеметрических карт Джабык-Карагойского гранитного массива, приведенная на рис. 32, дает прямое представление о методических особенностях этой съемки и характере получаемой в результате ее проведения информации.

Обобщая результаты минералогосъемочных работ своей школы, Г. Н. Вертушков [6] в специальной статье изложил общие теоретико-методические положения минералогического картирования, уделяя особое внимание крупномасштабному картированию. Он вообще считает составление минералогических карт более мелких масштабов, чем 1:200 000, малоэффективным и нецелесообразным. Может быть, для таких детально изученных районов, как Средний и Южный Урал, это и справедливо, но в целом с таким выводом трудно согласиться. В малоизученных районах, как показывает опыт исследований, наиболее эффективным на первых этапах минералогического изучения является среднемасштабное картирование. Г. Н. Вертушков обоснованно призывает к широкому использованию при обработке результатов картирования логико-математических методов, в частности метода ориентированных графов, а также к органическому сочетанию минералогического картирования с геохимическим и геологическим.

Минералогическое картирование проводится на ряде объектов и зарубежными минералогами. Еще в 1946 г. К. К. Ландес,

подобно А. К. Болдыреву, выдвигал необходимость развития исследований в области геологической минералогии. В. Эйлис [63] детально обсуждал проблему минералогических карт. В минералогических работах, особенно в работах по рудной минералогии и геологии, минералогическое картирование применяется как достаточно надежный метод. В качестве примера приведем один из составленных М. Эйнаути погоризонтных минералогических планов меднорудного скарнового месторождения Мэсон-Вели (рис. 33) и сделанное на их основе обобщение минералогической зональности скарнов и локализации в них халькопиритового оруденения (рис. 34).

В последние годы минералогическое картирование становится все более популярным и различные виды минералогических карт публикуются довольно часто, точно также как и методические разработки. В числе последних следует назвать работы В. Г. Фекличева [54] и Б. В. Бродина [4], в которых разрабатывается общая методологическая база минералогического картирования. Приведем несколько примеров конкретных исследований. Н. З. Евзикова на примере касситеритовых месторождений разработала метод картирования, элементами которого являются габитусные типы кристаллов, отражающие эволюцию процессов минералообразования [13]. Габитусные типы кристаллов киновари использовал в качестве элементов картирования В. И. Зубов. Составленные им разномасштабные карты (рис. 35) отражают общие закономерности изменения условий кристаллизации киновари как в крупных регионах, так и в отдельных рудных телах и имеют серьезное прогнозно-поисковое значение. В. Г. Фекличев провел оптико-минералогическое картирование Хибинского массива, измеряя оптические свойства породообразующего эвдиалита и устанавливая пространственные закономерности их изменения с помощью тренд-анализа. Серия минералогических карт того же Хибинского массива с данными распространения нефелина, полевых шпатов, пироксенов, амфиболов составлена Л. В. Козыревой и О. Е. Шемановской. Детальное комплексное минералогическое картирование редкометального месторождения Лянгар в Средней Азии было осуществлено А. А. Бабаджановым. Составленные им карты оказались весьма эффективными при прогнозировании скрытого оруденения. Этим и приводившимися в других главах примерами, конечно, не ограничивается опыт эффективного использования минералогической съемки в решении топоминералогических и поисково-оценочных задач. Под руководством автора в настоящее время проводится широкий комплекс опытных работ по минералогическому картированию рудоносных районов Урала и Тимана. Опыт этих исследований в полной мере использован и при работе над этой книгой.

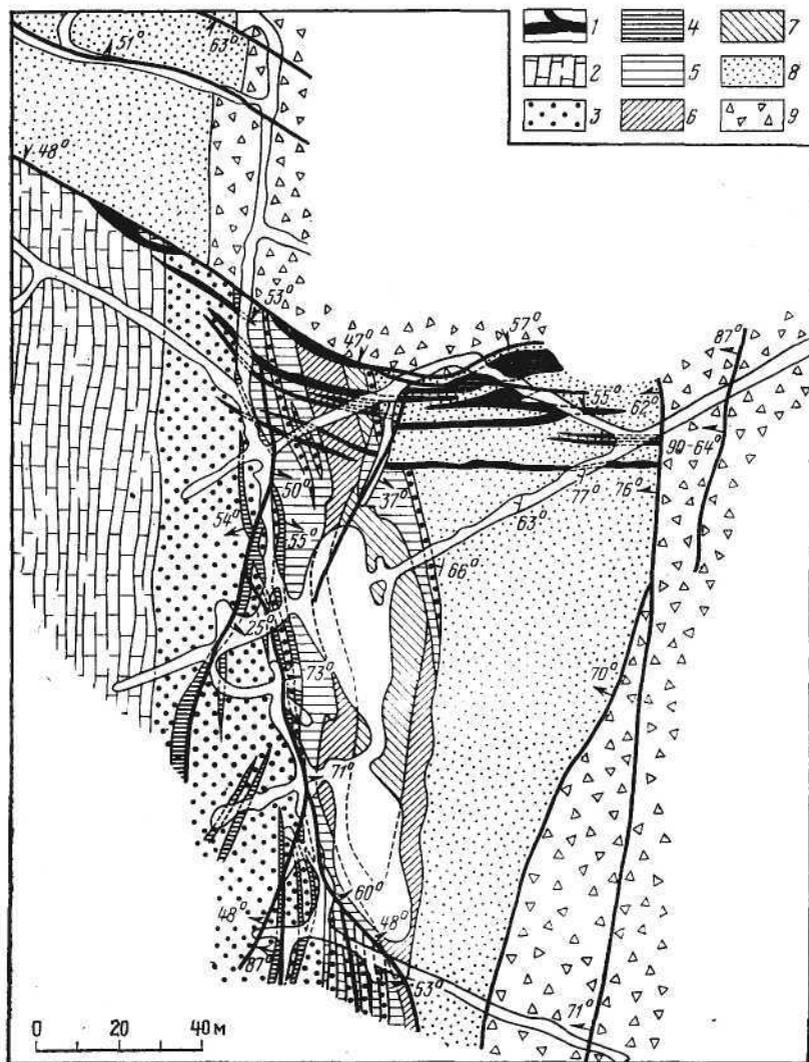


Рис. 33. Минералогический план горизонта 400 скарнового меднорудного месторождения Мэсон-Велл, Невада, США. По М. Эйнауди.

1 — базальты; 2 — известняки; 3 — доломит-кальцитовая зона; 4 — тремолит-талъковая зона; 5 — пироксеновая зона; 6 — зона  $Gr/Gr+Px=0,1-0,4$ ; 7 — зона  $Gr/Gr+Px=0,5-1,0$ ; 8 — гранатовая зона; 9 — туфы. Контакты между гранат-пироксеновыми зонами постепенные, между пироксеновой, тремолитовой и карбонатной — резкие.

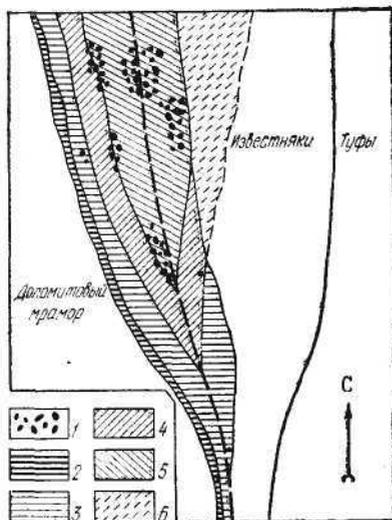


Рис. 34. Минералогическая зональность месторождения Мэсон-Вели. Протяженность скарна ~ 150 м. По М. Эйнауди.

1 — халькопиритовая минерализация; 2 — тримолит-талевая зона; 3 — пироксеновая зона; 4 — зона  $Gr/Gr+Px=0,1-0,4$ ; 5 — зона  $Gr/Gr+Px=0,5-1,0$ ; 6 — зона гранатовых жил.

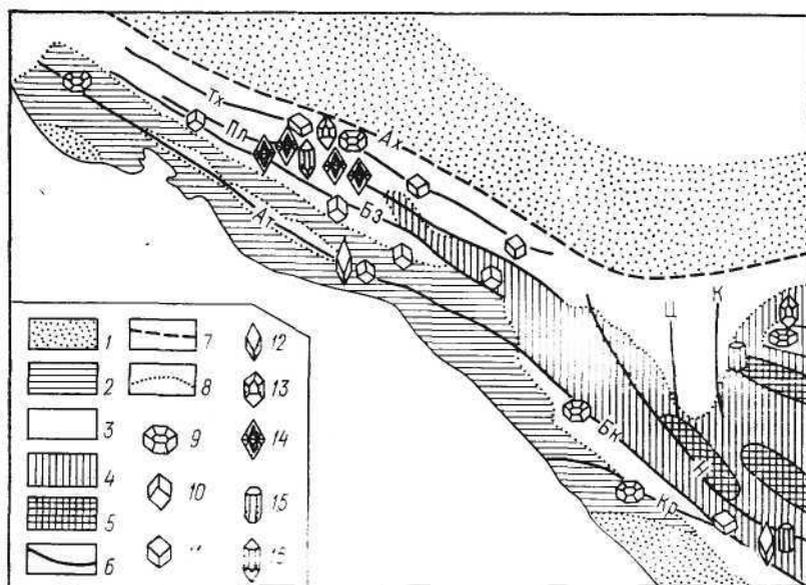


Рис. 35. Схема распределения габитусных типов кристаллов киновари на ртутных проявлениях Северо-Западного Кавказа. По В. Н. Зубову [23].

**Структурные этажи:** 1 — третичный, 2 — верхнемеловой, 3 — верхнеюрский—нижнемеловой; 4 — ниже-среднеюрский, 5 — палеозойский; 6 — прослеженные глубинные разломы; 7 — предполагаемые разломы; 8 — границы между структурными этажами. **Рудоконтролирующие разломы:** Ах — Ахтырский, Тх — Тхамазский; Пл — Плянченский, Бз — Безепский, Ат — Атакайский, Бк — Бекшеиский, Н — надвиг Главного Кавказского хребта, Кр — Краснополянский, Ц — Цининский, К — Курджипский. **Габитусные типы кристаллов киновари:** 9 — пинакоидальный, 10 — плоскоромбоэдрический, 11 — ромбоэдрический; 12 — остроромбоэдрический, 13 — призморомбоэдрический (простые кристаллы); 14 — двойники ромбоэдрического габитуса; 15 — призматический; 16 — призморомбоэдрические двойники

## ЭЛЕМЕНТЫ МИНЕРАЛОГИЧЕСКОГО КАРТИРОВАНИЯ

Любые объекты минералогического картирования являются объектами весьма сложными, которые слагаются минеральными системами различной структурной организации, различной физической и генетической природы. Поэтому в процессе подготовки и проведения минералогического картирования неизбежно встает вопрос о выборе элементов картирования, т. е. таких минеральных систем, которые в условиях поставленной перед картированием задачи можно бы было рассматривать как далее неделимые и принимать за элементарные. Эти системы являются объектами полевого и лабораторного изучения, и сведения о них составляют специальную нагрузку минералогических карт. Изучая даже относительно простое минеральное тело, например гидротермальную жилу или магматическую дайку, мы можем проводить картирование на разных уровнях: картировать распределение различных типов минеральных агрегатов, парагенетические соотношения минералов, распределение отдельных минералов или их разновидностей, изменение состава, структуры и свойств минералов. Можно, конечно, проводить и комплексное картирование по всем перечисленным элементам, если это позволяют время, силы и средства.

Выбор элементов картирования определяется принципами максимальной информативности, геолого-минералогической целесообразности, экономической эффективности и технической выполнимости. Система элементов минералогического картирования с общей их характеристикой приведена в табл. 10; на фрагментах минералогических карт, иллюстрирующих текст книги, содержатся примеры картирования почти всех перечисленных элементов.

Элементы картирования в пределах изучаемого объекта могут быть непрерывными или дискретными, и эти их особенности определяют методику картирования. Непрерывные системы, которыми являются обычно картировочные элементы высоких рангов (минеральные комплексы, формации, закономерные ассоциации минералов и т. п.), образуют крупные минеральные поля, и задачей картирования является прослеживание и оконтуривание этих полей. Дискретные системы распределены по определенным точкам или участкам картируемого объекта (распределение отдельных формаций, отдельных ассоциаций, минералов), и задачу картирования составляют поиски и определение пространственного положения каждой из таких систем, что, конечно, сложнее прослеживания систем непрерывных.

Главным фактором, определяющим выбор элементов минералогического картирования и его методику, является масштаб картирования.

## Элементы минералогического картирования и особенности их использования

Элементы минералогического картирования	Общая характеристика, использование в различных типах картирования, особенности картирования	Характер получаемой информации
Топотипы более низких рангов, чем объект картирования	Элементами картирования являются разномасштабные компоненты объектов картирования (например, минералогические районы в пределах минералогических провинций, минеральные комплексы и т. п.). Выбор элементов, особенности картирования определяются характером объектов и масштабом картирования	Минералогическая гетерогенность объектов картирования и общий минералогический облик
Минеральные комплексы	<p>Закономерные сочетания минеральных ассоциаций, сформированные в результате глобальных геологических процессов (осадконакопление, магматизм, метаморфизм, гипергенез)</p> <p>Используются преимущественно при мелко- и среднемасштабном картировании. Минеральные комплексы обычно соответствуют определенным типам пород и руд. Картирование проводится по визуальным данным с уточнением границ комплексов на основе лабораторного изучения минерального состава пород</p>	Геонсторическое развитие крупных минералогенетических событий и закономерности распределения их вещественных результатов в пространстве
Минеральные формации	Устойчиво повторяющиеся ассоциации минералов, являющиеся продуктами определенных минералогенетических процессов (однако установление природы взаимосвязей не обязательно). Выявляются на основе систематических определений количественного минерального состава объектов картирования. Имеют ведущее значение при среднемасштабном картировании	Главнейшие типы минерализации (в том числе и продуктивной), закономерности их пространственного распределения, взаимоотношения между ними

Элементы минералогического картирования	Общая характеристика, использование в различных типах картирования, особенности картирования	Характер получаемой информации
Закономерные (парагенетические) ассоциации минералов	Закономерные сообщества минералов, устанавливаемые по тому или иному характеру взаимоотношений (сокристаллизация, непрерывная последовательная кристаллизация, равновесное образование, равновесное сосуществование, корреляционные и другие взаимосвязи). Требуется установление наличия или отсутствия анализируемых взаимосвязей и их силы. Используются в качестве главных элементов среднemasштабного картирования	Закономерности пространственно-временного развития процессов минералообразования; условия минералообразования и их изменение
Минеральные тела	Тела горных пород, рудные и другие тела, сложенные определенными минералами, минеральными ассоциациями, сочетаниями ассоциаций. Картируются в их естественных границах преимущественно при средне- и крупномасштабном картировании	Распределение, форма и размеры минеральных тел (в том числе и рудных)
Морфологические типы минеральных агрегатов (структуры и текстуры минеральных тел)	Типы агрегатов устанавливаются на основе анализа взаимоотношений между минеральными индивидами с использованием частных или общих классификаций. Типизация — наиболее ответственная операция при картировании. Картируются при крупномасштабных и детальных исследованиях. Особое внимание уделяется директивным элементам агрегатов	Изменение условий минералообразования в объеме минеральных тел, направление и интенсивность массопереноса, распределение минералогических и технологических типов руд. Характер полей механических напряжений
Минералы, разновидности минералов	Картирование (обычно крупномасштабное), распространение отдельных минералов или разновидностей минералов в пределах объектов картирования. Проводится в качественных или количественных показателях	Закономерности распределения минералов в пространстве. Минеральная зональность объектов картирования. Минеральные месторождения и минеральные ореолы

Элементы минералогического картирования	Общая характеристика, использование в различных типах картирования, особенности картирования	Характер получаемой информации
Конституционные особенности и свойства минералов	Структурные параметры минералов, состав минералов, содержание элементов-примесей, изотопный состав элементов, морфологические особенности, анатомические особенности, включения в минералах, физические свойства минералов	Закономерности изменения конституции и свойств минералов в пространстве, пространственные закономерности развития процессов минералообразования
Генетико-информационные данные	Данные о <i>РТ</i> -условиях минералообразования, химизме среды, других ее физических и химических особенностях, направлении силы тяжести, глубине и других условиях минералообразования, полученные на основе различных генетико-информационных интерпретаций минералогических данных. Картируются при любых, но преимущественно при крупномасштабных и детальных исследованиях.	Закономерности изменения условий минералообразования во времени и в пространстве
Элементы экономической минералогии	Данные о промышленных типах минеральных месторождений, минералогические поисковые признаки, прогнозные данные о возможных источниках нового горнорудного и коллекционного сырья, минералоготехнологические данные, стоимость полезных минералов, содержащихся в элементарном объеме топоса	Возможность и пути эффективного использования минералов в народном хозяйстве, оценка горно-экономических перспектив объекта картирования

### Масштабы картирования

По степени детальности исследований, по масштабу картирования можно выделить следующие типы топо-минералогических работ: 1) мелкомасштабное картирование (масштаб мельче 1:200 000); 2) среднемасштабное картирование (масштаб 1:200 000—1:50 000); 3) крупномасштабное картирование (масштаб 1:25 000 и крупнее); 4) детальное картирование (масштаб крупнее 1:10 000).

Более крупные масштабы (около 1:500 и крупнее) используются, как правило, не столько в регионально-минералогических исследованиях, сколько при изучении отдельных минеральных тел или их частей; при их документации.

## Характеристика топоминералогических исследований различных масштабов

Масштабы карт	Целевое назначение	Ведущие элементы минералогического картирования	Главные методы картирования
Мельче 1:1 000 000	Установление общего минералогического облика крупных регионов (стран, суперпровинций и т. п.), выделение в их пределах минералогических провинций, определение их минералогической специфики и перспектив	Минеральные комплексы и мегакомплексы, минералогические регионы определенных типов	Анализ и обобщение данных геологических съемок средних и крупных масштабов, предшествующих специальным минералогическим исследованиям, маршрутных и площадных минералогических исследований по оптимальной схеме
1:1 000 000— 1:200 000	Установление закономерностей распределения минеральных ассоциаций и минералов в пределах минералогических провинций, определение топоминералогических и минералогенетических особенностей провинций, их минерально-экономического значения	Минеральные формации и минеральные ассоциации как дополнительная нагрузка других рангов, отдельные минералы и их разновидности	Комбинация методов пересечений, прослеживания минеральных формаций с площадными исследованиями на опорных объектах
1:100 000— 1:25 000	Установление топоминералогических закономерностей в отдельных районах минералогических провинций, рудных узлах, полях, месторождениях	Минеральные ассоциации (парагенезисы), минералы и их разновидности, свойства и конституционные особенности минералов	Маршрутные (пересечение, прослеживание) и площадные исследования
Крупнее 1:25 000	Исследование состава и строения минеральных тел, исследование взаимоотношений между минералами, установление закономерностей распределения минералов в минеральных телах	Типы минеральных агрегатов, минералы и их разновидности, свойства и конституционные особенности минералов	Площадное исследование (документация коренных выходов и горных выработок)

Задачи, характеристика и методические особенности топоминералогических исследований различных масштабов приведены в табл. 11. К настоящему времени больше всего по объему, пожалуй, сделано в области мелкомасштабной минералогии но все работы этого типа имеют специализированную металлогеническую направленность. Наиболее высоким методическим совершенством отличаются крупномасштабные и детальные топоминералогические работы. Наименее удовлетворительное положение создалось в области среднемасштабной топоминералогии.

Картирование в основном масштабе, определяющем общую детальность исследования, проводится на всей площади или во всем объеме объекта исследования. Цель картирования в дополнительных масштабах — уточнение сложных деталей минералогической структуры объекта, решение конкретных научных или практических задач, нерешаемых при детальности исследований соответствующей основному масштабу, проверка гипотез, возникающих в процессе исследования. Исследования в дополнительных масштабах подразделяются на следующие:

1) обзорные — масштаб мельче основного, целью их является или получение предварительных данных о минералогической структуре объекта картирования (в этом случае они опережают исследования в основном масштабе), или выяснение положения объекта исследования в структуре более крупного объекта (в таком случае исследования выходят за границы объекта картирования);

2) детализационные — масштаб крупнее основного, целью их является детализация отдельных сложных или особо интересных участков;

3) документационные — масштаб намного крупнее основного, целью их является получение информации о внутренней структуре элементов картирования, составляющих минералогическую нагрузку карты **основного масштаба**.

### **Картографическая основа**

Эффективность топоминералогического исследования в значительной степени зависит от правильного и полного подбора общего и специального картографического материала соответствующих масштабов.

Наиболее оптимальным является набор следующих карт:

1) топографическая карта-основа в масштабе по крайней мере вдвое более крупном, чем масштаб минералогического картирования;

2) геологическая карта-основа в масштабе более крупном, чем масштаб минералогического картирования, или соответствующем ему;

3) карта минеральных месторождений и минералопроявлений, в масштабе соответствующем масштабу минералогического картирования;

4) карты физических (магнитного, гравитационного, электрических) и геохимических (поэлементных) полей, в масштабах близких к масштабу картирования;

5) аэрофотоснимки масштаба близкого к масштабу минералогического картирования и космоснимки более мелкого масштаба.

Эти картографические материалы используются как рабочие документы в процессе минералогического картирования. На их основе целесообразно составить предварительную минералогическую карту-схему, в масштабе вдвое более крупном, чем масштаб минералогического картирования. На такой карте будут сконцентрированы все минералогеологические материалы предшественников. Они позволят выбрать наиболее разнолокальную методику, уточнить цели топоминералогических исследований и строго распланировать полевую работу.

### **Типы минералогического картирования**

В зависимости от выбора картировочных элементов (см. табл. 10), определяемого задачей топоминералогического исследования, все разнообразие методов минералогического картирования можно свести к трем главным типам:

1) комплексному картированию с максимально широким охватом всех возможных минералогических элементов картирования;

2) частным видам картирования по отдельным элементам картирования, наиболее информативным для решения поставленной задачи;

3) специальным видам картирования, методика которых определяется либо спецификой объекта исследования, либо специфическим сочетанием элементов картирования, либо особенностями целевой программы исследования.

В задачу комплексного минералогического картирования входит получение наиболее полного представления о пространственных минералогических закономерностях объекта картирования. В процессе картирования изучаются и наносятся на карту практически все минералогические элементы, которые можно отразить в соответствующем масштабе. Картируются поля распространения всех минеральных комплексов независимо от их геологической и генетической природы. В пределах этих комплексов прослеживается пространственное распределение минеральных формаций, парагенетических ассоциаций, морфогенетических типов минеральных агрегатов, отдельных минералов и их разновидностей, пространственное изменение конституции и свойств минералов; устанавливается

на основе генетико-информационных исследований изменение во времени и в пространстве условий минералообразования, дается по результатам минералого-экономического анализа прогнозная и экономическая оценка объекта картирования.

Комплексное картирование весьма трудоемко и дорого и в полном объеме осуществляется сравнительно редко. Известные примеры относятся к детальному исследованию рудных месторождений или отдельных рудных тел (например, крупномасштабное картирование тантал-ниобиевого месторождения, выполненное В. В. Матиасом). Автором проведено среднемасштабное комплексное минералогическое картирование Пайхойско-Южноновоземельской провинции [61]; этот опыт показал реальность осуществления комплексных исследований крупного и среднего масштабов для больших регионов, даже при отсутствии их детальной геологической изученности.

**Частные виды картирования.** Картирование минералогических регионов осуществляется по одному или нескольким элементам картирования, которые выбираются по принципу наибольшей информативности и операциональности (т. е. легкости и дешевизны изучения) для достижения цели исследования.

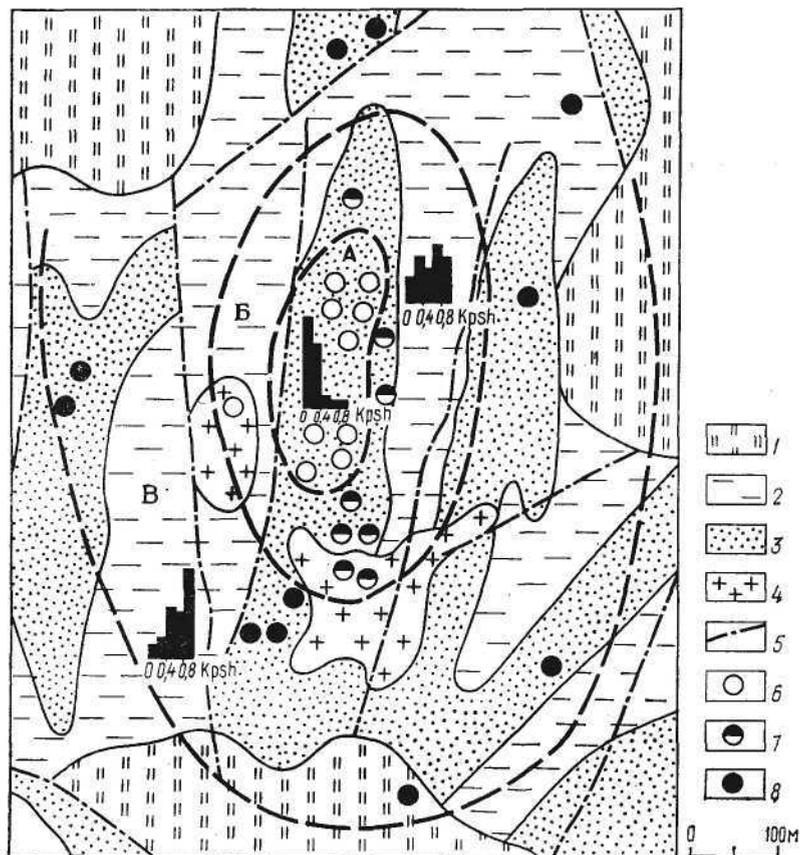
Частные виды картирования наиболее широко применяются на практике, и большинство помещенных в книге в качестве иллюстраций фрагментов минералогических карт относятся к этому типу.

Картирование по одному или ограниченному числу элементов — наиболее дешевый и оперативный вид картирования. По результативности и эффективности оно может совсем незначительно уступать комплексному картированию, если удачно выбраны элементы картирования. Поэтому выбор элементов картирования является весьма ответственной задачей, определяющей успех картирования, решению которой, как правило, предшествуют трудоемкие специальные исследования.

Б. В. Чесноков [58], например, для установления морфологии Березовского рудного поля на Среднем Урале и выяснения пространственных закономерностей распределения и формирования рудной минерализации выбрал в качестве элемента картирования блеклые руды, точнее, параметр элементарной ячейки, функционально связанной с соотношением сурьмы и мышьяка в составе блеклых руд. Использование в картировании именно этого показателя наиболее ярко раскрыло пространственную минералогическую структуру и эндогенную зональность Березовского рудного поля.

Так, при картировании Пайхойско-Южноновоземельской минералогической провинции наибольшая информация была получена при использовании в качестве картировочного элемента химического состава сфалерита, а также физических свойств флюорита, состава кальцита и кварца [61]. Эти минералы наи-

более распространены, относятся к «сквозным», а перечисленные свойства характеризуются наибольшей изменчивостью, отражающей изменчивость условий минералообразования. А при картировании хрусталеносных полей наиболее эффективно «работают» морфометрические характеристики кварца (особенно коэффициент псевдогексагональности, шаг скручивания и др.), а также данные о структурных дефектах. Одна из таких карт (соавтатели П. П. Юханов и С. К. Кузнецов), очень четко раскрывающая минералогическую зональность одного из хрусталеносных районов, приведена на рис. 36. Для установления



**Рис. 36. Кристалломорфологическая зональность одного из хрусталеносных полей Приполярноуральской провинции:**

1 — кварцитоесчанники и гравелиты тельпосской свиты (O, tp), 2 — слюды и мраморы маньинской свиты PR—(mn); 3 — кварциты и сланцы хобенинской свиты (PR—(hb)); 4 — гранитоиды; 5 — тектонические нарушения; месторождения и проявления с различными типами кристаллов кварца: 6 — цитриновый и цитриново-дымчатый типы, 7 — дымчато-цитриновый и дымчатый типы, 8 — слабодымчатый, цитриновый и радиационно-устойчивый типы; А, Б, В — зоны распространения соответствующих типов кристаллов кварца. Гистограммы коэффициента псевдогексагональности (Kpsh) дают обобщенную кристалломорфологическую характеристику кварца и каждой из зон

перспектив кварцевожильной минерализации на кварц для плавки наиболее информативно картирование текстурных типов жильного кварца (рис. 37).

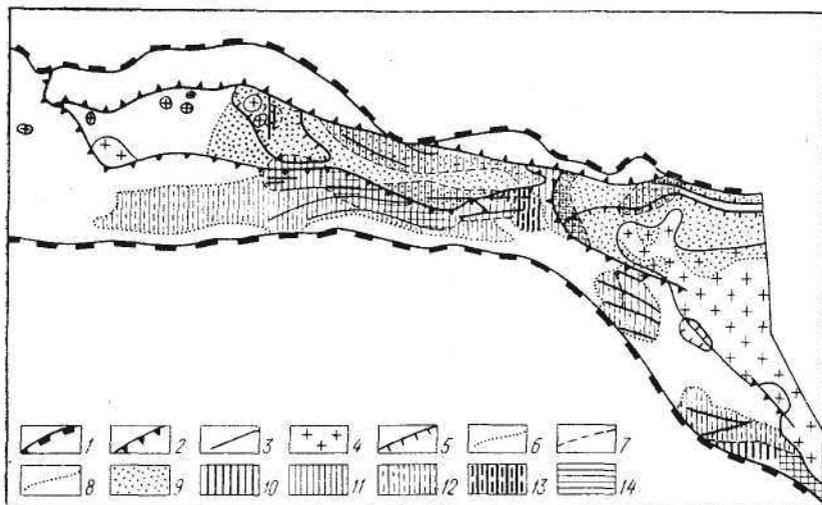
Специальные виды картирования. В их число входит довольно много различных видов минералогических съемок, отличающихся целевой направленностью. Мы остановимся только на некоторых из них.

*Картирование околорудных изменений* пользуется особенно широкой популярностью в районах развития гидротермального оруденения. Формирование месторождений многих полезных ископаемых сопровождается глубокой гидротермально-метасоматической переработкой вмещающих пород, и по характеру этих изменений во многих случаях можно делать обоснованные заключения о характере и месте рудной минерализации. Изучению измененных пород уделяется поэтому очень серьезное внимание, причем одним из ведущих методов их исследования является минералогическое картирование. С его помощью картируются зоны альбитизации, окварцевания, серицитизации, хлоритизации, карбонатизации, баритизации, каолинизации, турмалинизации, а также другие типы наложенной на материнские породы минерализации.

Минералогическое картирование широко использовалось автором при изучении олово-вольфрам-висмут молибденовой минерализации севера Урала. Формирование оруденения было многостадийным, причем каждой стадии соответствовали определенные типы изменений вмещающих пород. Вокруг рудных тел развиты отчетливые ореолы околорудных изменений, картирование которых позволяет определить положение скрытых рудных тел. Фрагмент нашей карты, иллюстрирующей зональность околорудных изменений вокруг жильной зоны с молибдошеелитом и новым иттриевым минералом — черновитом, показан на рис. 38.

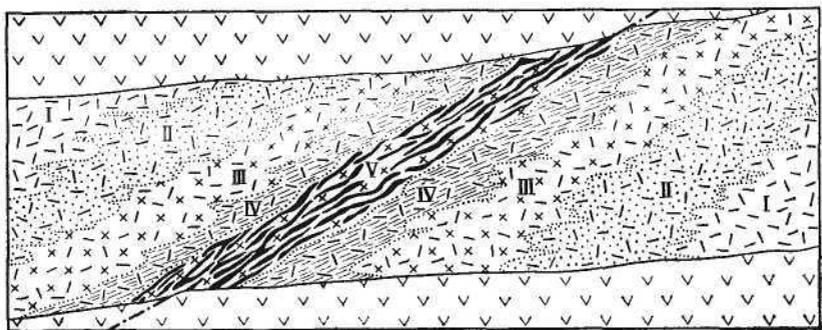
Цель *обломочно-валунной съемки* — поиски выходов минеральных тел по ореолам механического рассеяния минералов. Они объединяют два разных вида съемки — валунную и обломочную.

При валунной съемке имеют дело с обломками минералов или минеральных тел, перемещенных на довольно далекое расстояние от первоисточника посредством какого-либо транспортирующего фактора (ледники, постоянные и временные водные и водно-грязевые потоки, в результате эксплозивной вулканической деятельности и т. п.). В процессе валунной съемки решаются две задачи: во-первых, определяется распространение валунов с определенными минералами, во-вторых, устанавливаются возможные пути их перемещения. Валунная съемка как компонент съемки геологической широко применяется в Финляндии, а в СССР — на Кольском полуострове и в Карелии. С ее помощью был открыт целый ряд месторождений.



**Рис. 37. Распределение кварцевых жил по структурам жильного кварца.**  
По В. Е. Верхотурову.

1—региональные разломы—границы зоны Центрального Памира; 2—краевые разломы—границы нижнего структурного этажа; 3—послескладчатые разрывные нарушения; 4—гранитоиды мел-палеогенового возраста; 5—граница распространения пегматитовых жил; 6—границы зоны, в которой жильный кварц отсутствует; 7—границы зон по типу структуры жильного кварца; 8—граница подзон по типу структуры жильного кварца. *Типы структур жильного кварца:* 9—гранулированный разнозернистый, 10—гигантозернистый массивной структуры, 11—крупнозернистый массивной текстуры, 12—среднезернистый шестоватой текстуры, 13—совместное нахождение крупно-гигантозернистого кварца со среднезернистым, 14—участки с частично гранулированным крупно-гигантозернистым жильным кварцем



**Рис. 38. Минералогическая зональность в липаритовых порфирах вокруг кварцевожильной зоны с молибдошеселит-черновитовой минерализацией. Приполярный Урал:**

I—исходные липаритовые порфиры, испытавшие региональную альбитизацию; II—зона эпидотизации; III—зона раннего окварцевания; IV—зона мусковитизации; V—зона позднего окварцевания с молибдошеселит-черновитовой минерализацией

Обломочная съемка картирует поля распространения обломков пород и минералов, перемещавшихся от первоисточника в основном под действием силы тяжести при минимальном участии других, транспортирующих факторов. Удаление минеральных, обломков от первоисточника в таких условиях бывает не очень далеким. В этом виде съемки две названные выше задачи имеют одно решение; уже по форме поля распространения минеральных обломков легко устанавливается положение разрушающегося тела. По минеральным обломкам открыто большое число важных месторождений полезных ископаемых, например апатитовые месторождения Хибин. Этот метод широко применяется и в настоящее время, причем не только для относительно прочных минералов, но и для весьма хрупких. Например, картированием обломков самородной серы (рис. 39) в одном из районов Средней Азии нам удалось довольно быстро открыть коренной выход серного тела, как оказалось разрабатывавшегося древними рудокопами. Ореол рассеяния серных обломков оказался, таким образом, техногенным.

Обломочно-валунные съемки являются весьма эффективным средством топоминералогических исследований, но, к сожалению, в методическом отношении они слабо эволюционировали и остаются на уровне прошлого века.

*Шлиховая съемка* — самый древний и наиболее разработанный в методическом отношении вид минералогического картирования; до недавнего времени рассматривалась как единственный собственно минералогический метод. Методы шлиховой съемки детально излагаются в соответствующих учебниках, поэтому нецелесообразно разбирать их здесь подробно, а следует ограничиться лишь приведением серии фрагментов шлиховых карт (рис. 40, 41), дающих представление о различных способах картографического отражения результатов минералогического анализа шлихов.

Наиболее распространенными являются кружковые или колоночные карты, которые содержат информацию о составе тяжелой фракции в отдельных точках и представляют, по существу, карты фактического материала. Ленточные шлиховые карты строятся на основе карт фактического материала и представляют собой первый этап обобщения данных шлиховой съемки. Более высокий уровень обобщения отражен на картах шлиховых ореолов, как крупномасштабных, так и мелкомасштабных, а также на картах распространения определенных ассоциаций минералов. На их основе производятся минералогенетические реконструкции и осуществляются прогнозно-поисковые построения.

В последнее время шлиховой метод, очень долгое время остававшийся методически неизменным, весьма интенсивно модернизируется. Намечаются две тенденции в развитии шлихового метода.

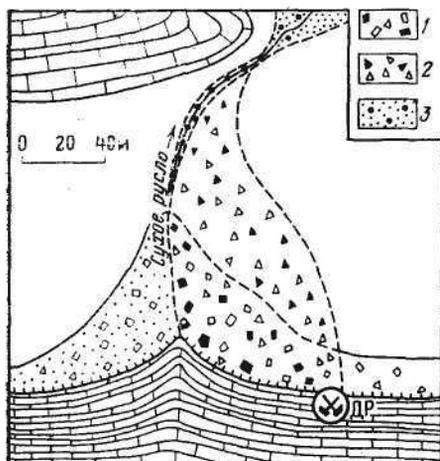


Рис. 39. Минералогическая карта ореола механического рассеяния обломков самородной серы. Район Шорсу, УзССР.

1 — крупноглыбовая (осыпная) зона ореола; 2 — мелкообломочная элювиальная зона; 3 — мелкообломочная пролювиальная зона; ДР — древний рудник, разрабатывавший серию северных жил

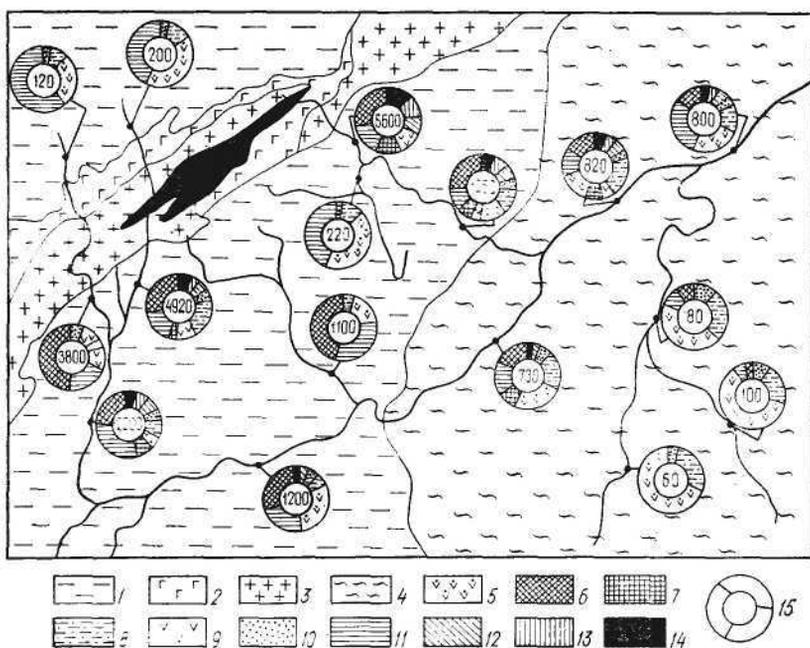
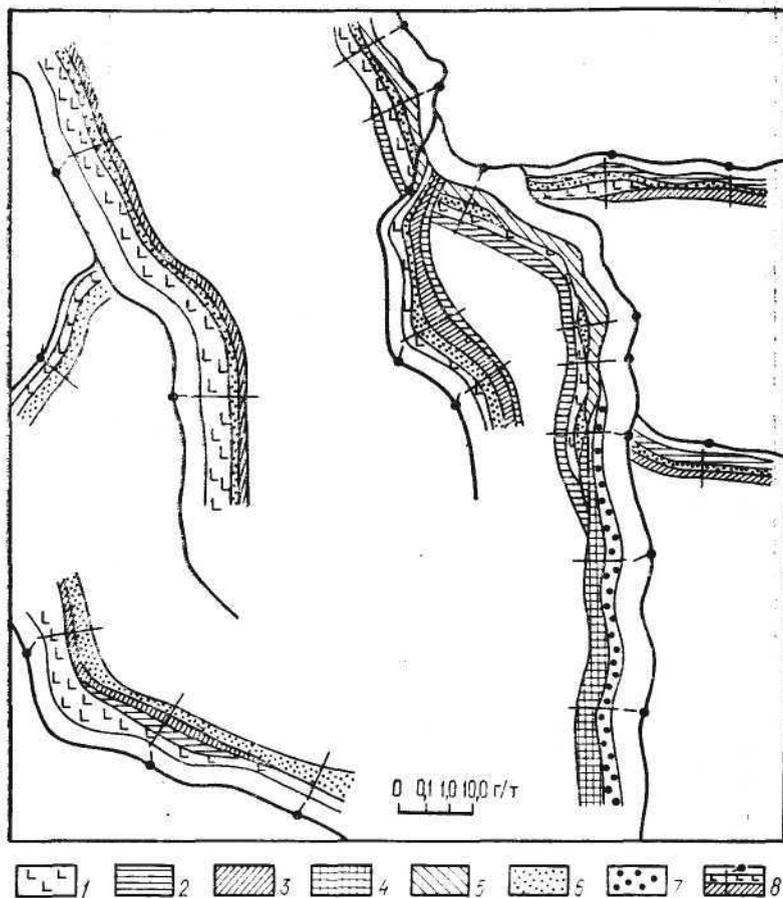


Рис. 40. Фрагмент шлиховой карты с отражением состава тяжелой фракции с помощью круговых диаграмм.

1 — сланцы; 2 — габброиды; 3 — граниты; 4 — глины и суглинки; 5—14 — минералы тяжелой фракции: 5 — эпидот, 6 — магнетит, 7 — ильменит, 8 — циркон, 9 — хромит, 10 — апатит, 11 — пирит, 12 — шеелит, 13 — флюорит, 14 — молибденит; 15 — диаграмма состава тяжелой фракции (в центре содержание тяжелой фракции, г/т)



**Рис. 41. Макет шлиховой карты с отражением состава тяжелой фракции в виде лент в логарифмическом масштабе:**

1 — пироксен моноклинический; 2 — магнетит; 3 — ильменит; 4 — гидрогётит; 5 — хромдиоксид; 6 — алмадин; 7 — пирит; 8 — места отбора шлиховых проб

Первая тенденция — это предельное упрощение метода с целью повышения его оперативности и снижения трудоемкости при максимальном сохранении получаемой информации. Отражением этой тенденции является шлихогеохимический метод А. В. Костерина [20]. Основное содержание этого метода заключается в том, что шлих или часть шлиха подвергается спектральному анализу и данные о содержании элементов в шлихах используются для установления топоминералогических закономерностей. В более сложных вариантах анализируются отдельные фракции шлиха и даже монофракции отдельных минералов

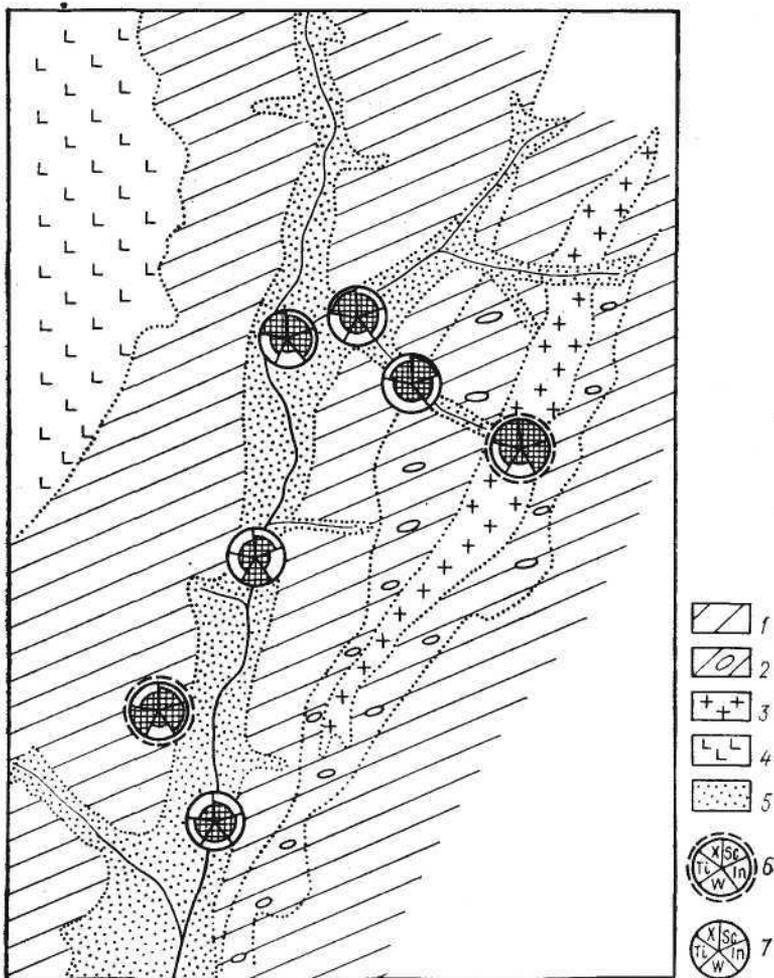
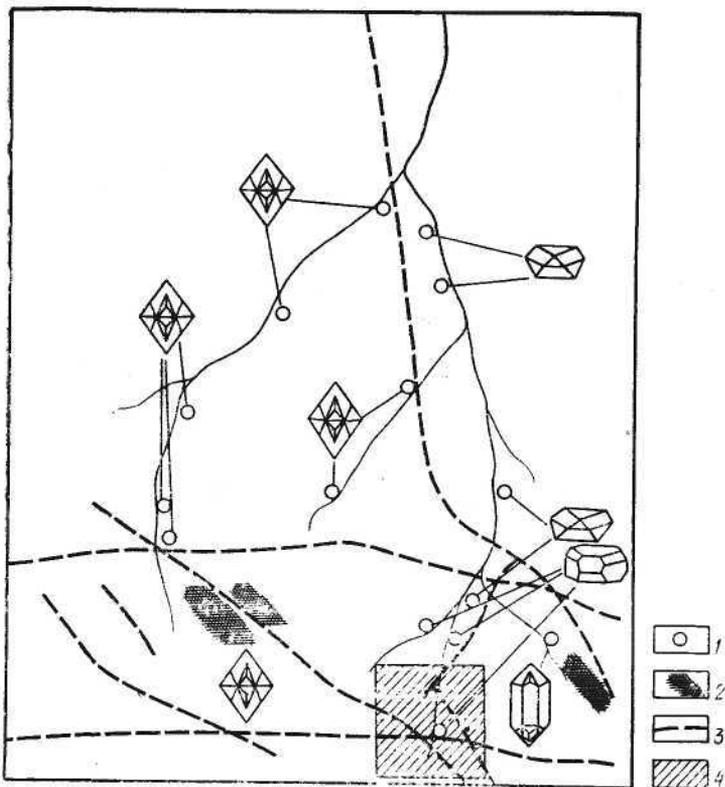


Рис. 42. Шлихо-геохимическая карта по касситериту. По А. В. Костерину [20].

1 — песчано-алевролитовая толща (мел); 2 — песчано-алевролитовая толща с прослоями кварца (юра); 3 — дациты (мел); 4 — палеогеновые эффузивы; 5 — четвертичные отложения; 6 — касситериты из месторождений; 7 — касситериты из россыпей

(рис. 42). Эффективность метода в этом случае намного повышается. Шлихогеохимический метод, конечно, более ограничен в прогнозных возможностях по сравнению со шлихоминералогическим. Его преимущество — дешевизна и оперативность, а также снижение уровня субъективных ошибок, связанных с диагностикой минералов. Наиболее эффективным является комплексирование этих двух методов.

Вторая тенденция в современном развитии шлиховых методов выражается в существенном увеличении количества полез-



**Рис. 43.** Кристалломорфологическая шлиховая карта по киновари (Северо-Западный Кавказ). Показаны габитусные типы кристаллов. По В. И. Zubovu.

1 — шлиховые пробы; 2 — ртутные руды; 3 — тектонические нарушения; 4 — рекомендуемый участок поисков. Условные обозначения кристаллов см. на рис. 35.

ной информации, извлекаемой из шлихов. В шлиховой анализ включаются не только диагностика минералов и определения их количественных соотношений, но и изучение морфологии, состава, свойств и типоморфных особенностей минералов. Все эти особенности в том или ином виде отражаются и на шлиховых картах (рис. 43). Разрабатываются методы определения дальности переноса по характеру и степени изменения зерен.

По типоморфным особенностям минералов россыпей можно уверенно определить генетический тип коренного месторождения и даже уровень его вскрытия эрозией. Для месторождений касситерита и ряда других минералов эта задача решается на основе кристалломорфологического анализа [13]. Имея комплексные данные о минералах шлихов, с помощью типоморфического анализа и современных статистических методов можно уверенно определять области сноса, даже если шлихи генетически весьма гетерогенны.

Очевидно, что в связи с резким повышением эффективности современных шлиховых методов встает задача повторного шлихового картирования наиболее перспективных районов.

*Картирование директивных элементов*, т. е. особенностей формы и строения минеральных индивидов, обусловленных анизотропией среды в моменты образования или изменения минералов, проводится с целью восстановления структуры десимметрирующего поля. Этот вид картирования, более известный как структурный анализ, очень широко применяется в минералогии. Обычно картирование директивных элементов осуществляется для расшифровки структур вязкого течения кристаллизующейся магмы и для восстановления полей механических напряжений.

Структуры течения картируются по данным замеров ориентировки удлинённых кристаллов любых минералов, если известно, что кристаллы ориентировались по струям потока. Поля деформаций восстанавливаются как по данным ориентировки минеральных индивидов, так и по относительной степени развития и ориентировке систем механического двойникования, плоскостей спайности, плоскостей трансляционного скольжения, полос деформаций и т. п.

Процедура картирования довольно проста. В поле или непосредственно измеряется ориентировка директивных элементов, если это возможно (например, ориентировка минеральных индивидов), или отбираются ориентированные образцы для лабораторных исследований. Наиболее распространенными методами изучения ориентированного материала с давних пор являются оптические. С помощью поляризационного микроскопа с федоровским столиком в ориентированных шлифах измеряется ориентировка самих индивидов, а также блоков деформации или других деформационных структур. В последнее время все шире применяются рентгеновские методы, в частности дифракционное изучение тектонитов. Для изотропных минералов, ориентировку которых трудно определить традиционными методами, нами предложен и применен на ряде объектов метод регенерации шаров. Смысл его заключается в следующем. На площади изучаемого участка, как и при обычном структурном картировании, отбираются ориентированные образцы, из которых выпиливаются шары с сохранением ориентационных меток. Поверхность шаров регенерируется с помощью подходящих приемов кристаллосинтеза, например, в автоклавах и приобретает кристаллическое строение. Путем фотогониометрии или гониометрии устанавливается ориентировка регенерированных субиндивидов, отражающая директивную структуру.

Структурные диаграммы, изображающие результаты измерений на стереографической или какой-либо другой подходящей проекции, представляют собой основной документ наблюдения при минералогическом картировании директивных элементов. Они или снятая с них статистическая информация наносятся

на карты, по ним устанавливается структурная анизотропия объектов картирования и осуществляется реставрация полей механических напряжений или других факторов, вызвавших появление директивных структур.

*Минералого-технологическое картирование* проводится на эксплуатируемых или подготавливаемых к освоению месторождениях полезных ископаемых, конечная цель которого — выделить и пространственно оконтурить промышленные типы руд по минералогическим данным. Минералого-технологическое картирование — одно из заключительных этапов топоминералогического изучения месторождения. Ему предшествуют геологическое и минералогическое картирование, изучение состава и текстурно-структурных особенностей руд, проведение технологических испытаний. Только после установления основных минералогических факторов, определяющих технологические свойства руд (содержание «полезных» и «вредных» минералов, морфология и размер зерен, химический состав и свойства индивидов, характер сростаний, типы минеральных агрегатов, вторичные изменения и т. п.), можно выбрать ведущие элементы минералого-технологического картирования, по которым затем можно выделять технологические сорта руд.

Интересный опыт минералого-технологического картирования осуществлен В. В. Матиасом (ВИМС) на одном из редкометальных месторождений.

### **Вопросы организации минералогического картирования**

Минералогическое картирование, как уже отмечалось, находится в стадии методической разработки и испытания различных методических подходов; проводится различными организациями и исследовательскими группами в опытном порядке. Поэтому еще нет общей методики, нет и установившейся организационной структуры.

Особенности организации минералогического картирования зависят не только от его цели, масштаба, геолого-минералогической сложности и экономических условий региона, но и от характера взаимосвязи с геологическими исследованиями, от геологической изученности региона. Последнее обстоятельство, пожалуй, определяющее.

Минералогическое картирование может осуществляться или как компонент геологического картирования одновременно с ним, или проводиться специально, независимо от других типов региональных исследований. Конечно, в каждом из этих случаев организация работ специфична.

При комплексировании минералогического картирования с геологическим не нужно организовывать специальных минералогических отрядов и партий, а группы минералогов включаются в геологические отряды. Это позволяет постоянно коор-

динировать минералогические наблюдения с геологическими и оперативно учитывать все новые геологические данные. Кроме того в случае комплексирования детальность собственно минералогических исследований можно несколько снизить, так как собирать определенную минералогическую информацию и проводить минералогическое опробование могут и геологи-съемщики. Однако нужно предостеречь от чрезмерной передачи функций полевого минералога геологам других специальностей: опыт показывает, что неудачи в минералогическом картировании, как правило, связаны с непрофессиональным его проведением на этапе полевых работ.

Автономное минералогическое картирование проводится в условиях различной геолого-минералогической изученности региона. Оно может следовать за геологическим картированием того же масштаба и дополнять его или, наоборот, опережать геологическое картирование, проводится на менее детальной геологической основе. Очевидно, в этих условиях наиболее оптимален первый вариант, но на практике очень часто приходится проводить и опережающее минералогическое картирование; объем работ при этом сильно возрастает.

Автономное минералогическое картирование проводится специализированными минералогическими отрядами и партиями. В настоящее время эти работы, как правило, проводятся силами минералогических коллективов научно-исследовательских институтов на хозяйственных отношениях с производственными организациями. Это и тормозит их широкое распространение. Минералогическое картирование необходимо проводить самим геологическим управлениям и производственным объединениям, а для этого целесообразна организация при них опытно-методических минералогических партий.

Эффективность минералогического картирования в значительной степени зависит от подготовки к его проведению. Главная задача подготовительного периода заключается в том, чтобы максимально полно собрать и удачно обобщить весь минералогический материал, полученный предшествующими работами, и правильно разработать методику картирования.

Когда минералогическое картирование проводится вслед за геологическим, необходим особенно тщательный анализ предшествующих материалов. Если геологическая съемка проведена в масштабе соответствующем масштабу картирования, то на основе ее материалов можно еще до выезда в поле составить вполне удовлетворительную минералогическую схему, отражающую общий минералогический облик объекта картирования. При составлении этой схемы выявятся основные элементы картирования, будет выработана легенда, намечены участки для детализации. Если же масштаб геологической изученности крупнее масштаба минералогического картирования (такое соотношение преобладает при среднемасштабном картировании), то по ма-

териалам геологических съемок, как правило, удается составить не только схему, но и предварительный макет минералогической карты, а специальные минералогические маршруты планировать как уточняющие. Конечно, знакомство с предшествующими материалами нельзя ограничивать проработкой отчетов и литературы; необходимо извлечь минералогическую информацию, из документационных материалов и из данных лабораторных исследований, изучить коллекции и минералогические пробы, проверить диагностику минералов и т. д.

Следующая важная задача при подготовке к полевым исследованиям — это создание полевой минералогической лаборатории, позволяющей проводить полевую обработку проб и выделение монофракций минералов, диагностику минералов, изучение и измерение некоторых свойств минералов, используемых в качестве картировочных элементов. Комплектация полевой лаборатории выполняется в зависимости от специфики объекта и методики картирования. Во Всесоюзном научно-исследовательском институте минерального сырья под руководством В. В. Маггаса создан ряд полевых лабораторий на автомашинах. Наиболее известна лаборатория ПМАЛ-1А, в которую входят: электростанция мощностью 4 кВт, дробильное оборудование (щекковая и валковая дробилки), стиратели, малый гравитационный стол, прибор для механической расщипки, винтовой сепаратор, сушильная печь, электромагниты УЭМТ-1 или СИМ-1, рентгеноструктурная камера Рада-2 или Марс-10, бинокулярные и поляризационные микроскопы, ядерно-физические приборы «Гагара» и «Минерал-3». Кроме создания полевых лабораторий необходимо организовать надежную взаимосвязь со стационарными лабораториями с тем, чтобы без задержки передавать пробы и оперативно получать результаты.

### **Методика полевых наблюдений при минералогическом картировании**

В связи с разнообразием задач и спецификой объектов минералогического картирования какой-либо универсальной и строго регламентированной методики полевых наблюдений не существует. В каждом отдельном случае полевые наблюдения проводятся с учетом конкретных особенностей объектов картирования. Однако в любом случае полевые наблюдения должны обеспечивать выполнение следующих принципов, составляющих основу минералогического (как, впрочем, и любого другого) картирования: объективности и документальности наблюдений, их геодезической точности, количественной оценки или измерения наблюдаемых объектов и явлений, полноты и непрерывности изучения объекта картирования, получения глубинной информации, графичности и картографичности результатов наблюдений.

Наиболее сложно достигаются полнота и непрерывность изучения картируемого топоса. Это можно обеспечить только рациональным распределением точек наблюдения, учитывающим минералогическую структуру объекта картирования. Существует ряд общих методов полевых минералогических исследований, регламентирующих прокладку минералогических маршрутов и распределение точек наблюдения.

Метод опорных и выборочных точек наблюдения. Состоит в том, что в процессе подготовки к полевым работам на площади картирования намечается система опорных точек, на которых и концентрируются минералогические наблюдения. Система эта может быть или чисто геометрической (геометрическая сеть определений плотности), или строится с учетом геолого-минералогической структуры региона (например, одинаковое число точек на каждый элемент структуры района), или охватывать только наименее изученные участки либо более интересные пункты, например проявления определенных типов рудной минерализации. Метод опорных и выборочных точек целесообразно применять при минералогическом картировании относительно хорошо изученных площадей, для которых уже имеются геологические карты существенно более крупных масштабов, чем масштаб минералогической съемки, и на основе которых можно составить достаточно детальную предварительную минералогическую карту. Полевые работы в такой ситуации проводятся с целью корректировки этой карты и минералогического опробования. Сеть точек полевых наблюдений может быть намечена вполне определенно.

Метод пересечений. Предусматривает непрерывные минералогические наблюдения, документацию и минералогическое опробование по маршрутам, прокладываемым параллельно друг другу в направлении наибольшей изменчивости минералогической структуры изучаемой площади (вкрест простираения пород, мастовых тел, жил и т. п., поперек контактов интрузивных массивов). Расстояние между параллельными маршрутами определяется масштабом картирования с таким расчетом, чтобы на карте линии соседних маршрутов находились на расстоянии не более 1 см. Метод пересечений обычно применяется при мелко- и среднемасштабном картировании.

Метод прослеживания границ минералогических полей. Если в процессе съемки удастся без особых затруднений выделять сплошные минералогические поля (распространение определенных минеральных комплексов, минеральных тел и т. п.), то их картирование целесообразно проводить путем прослеживания границ. Прослеживаются и другие линейные элементы—жилы, тела, опорные горизонты, минерализованные зоны. Метод прослеживания рекомендуется использовать в комбинации с другими, в частности с методом пересечений.

Метод прослеживания полей. От охарактеризованного выше он отличается тем, что в процессе съемки основное внимание уделяется не столько границам полей, сколько самим полям; они прослеживаются во все стороны до их естественных границ, оконтуриваются и наносятся на карту. Метод используется также в комбинации с другими методами и особенно популярен при крупномасштабном картировании.

Метод поисков элементов картирования. Используется при картировании дискретных элементов (очень мелких минеральных тел, размеры которых не укладываются в масштаб карты, например жеод, находок отдельных минералов в осыпях, валунов и т. п.). Короткими параллельными, радиальными или концентрическими маршрутами внимательно изучается какой-то элементарный участок картируемой площади для обнаружения в нем объектов, используемых в качестве элементов картирования. При этом используется совокупность прямых и косвенных признаков, указывающих на возможности обнаружения такого объекта. Все находки фиксируются и наносятся на карту, после чего таким же образом изучается соседний элементарный участок и т. д.

Метод элементарных квадратов. Картируемая площадь разбивается на элементарные квадраты с размером стороны определенным таким образом, чтобы он был не более 1 см при нанесении на карту. Затем детально исследуется каждый квадрат и дается его обобщенная характеристика по программе, предусмотренной в зависимости от характера поставленной перед картированием задачи. Такая программа — это обычно серия вопросов о наличии или отсутствии тех или иных признаков. На эти вопросы необходимо ответить «да» или «нет», а в случае наличия признака — дать его количественную оценку. Наиболее простая карта, составленная по методу элементарных квадратов, показана на рис. 44. Здесь показано распространение различных типов жеод, представляющих интерес как коллекционный материал, и вмещающих их пород.

Этот метод целесообразно использовать в том случае, если предусматривается машинное составление карт или обработка информации на топокартах, а также во всех других случаях, когда возникает необходимость обобщения данных по элементарным площадкам (например, подсчет количества обломков минерала на элементарной площадке при обломочно-валунном картировании). Этот метод очень удобен при минералогическом картировании относительно однородных объектов, например гранитоидных массивов, конусов выноса, делювиальных полей и т. п.

Метод применялся нами для выявления зон гидротермального минералообразования в монотонных толщах ордовикско-силурийских карбонатных пород в одном из районов Новой Земли. Эти толщи литологически очень сходны друг с другом,

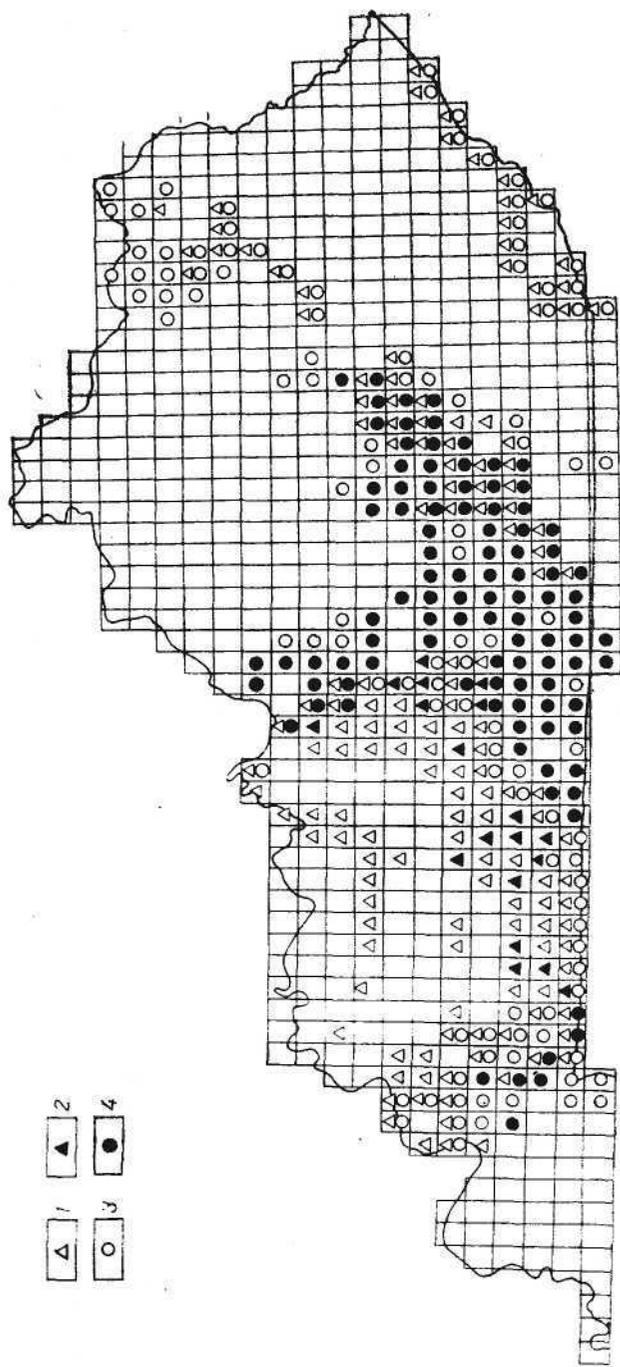
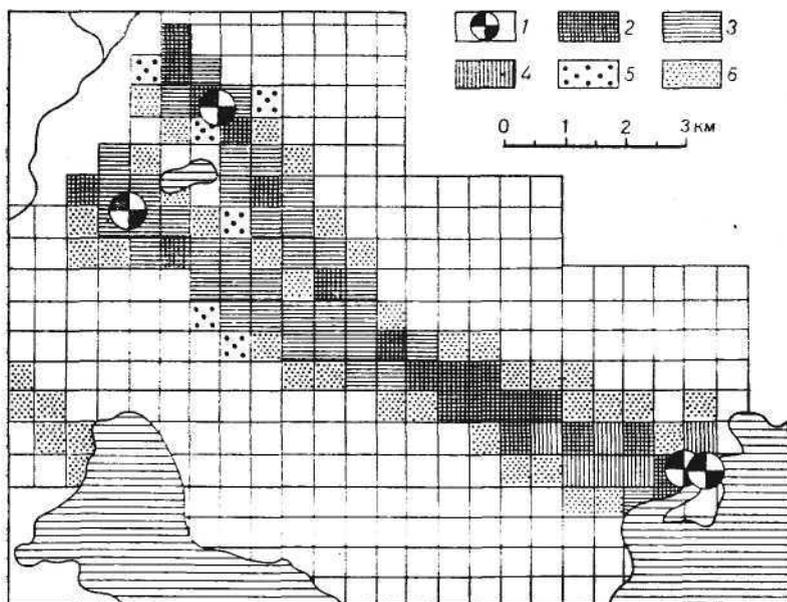


Рис. 44. Схема распространения пород миссисипской серии и кварцевых жезод. Штат Кентукки, США. По И. Фишеру.  
 1 — породы верхнемиссисипской серии; 2 — жезоды позднемиссисипского возраста; 3 — породы нижнемиссисипской серии; 4 — жезоды ранне-миссисипского возраста

подвергались неоднократной локальной гидротермальной перекристаллизации, причем с одним из этапов перекристаллизации связана галенит-сфалеритовая минерализация. В условиях полярного климата карбонатные породы интенсивно разрушаются и их выходы представляют собой слабохолмистое плато, покрытое чехлом элювиально-солифлюкционного материала. Выделить визуально в этой массе зоны гидротермальной, полиметаллической минерализации очень трудно. Наиболее эффективным в этих условиях оказался метод квадратов. С площади каждого элементарного квадрата набиралась сборная протолочная проба, из которой после дробления отмывался искусственный шлик. По наличию в шликах рудных (галенит, сфалерит) и парагенных им минералов (барит, флюорит) минерализованные зоны удалось проследить довольно уверенно (рис. 45) и завязать два удаленных друг от друга рудопроявления в одно рудное поле.

Важное значение в минералогическом картировании имеет детальность наблюдений, т. е. число точек наблюдения на единицу картируемой площади.



**Рис. 45.** Распространение рудных минералов и минералов-спутников в известняковом элювии, раскрывающее положение рудоносной зоны гидротермальной переработки известняков. Новая Земля. По данным минералогической протолочной съемки.

1 — коренные выходы галенит-сфалеритовых тел; присутствие в пробах минералов: 2 — галенита и сфалерита, 3 — галенита, 4 — сфалерита, 5 — эпигенетического пирита, 6 — эпигенетического кварца; пирит и кварц присутствуют и в условных знаках 2, 3, 4 совместно с галенитом и сфалеритом

Если минералогическое картирование проводится на площади, покрытой геологической съемкой того или иного масштаба, или параллельно со съемкой, то плотность должна быть не менее одной точки наблюдения на 1 см<sup>2</sup> карты соответствующего масштаба (для районов с минералогической структурой средней сложности). Если минералогическое картирование проводится в масштабе более крупном, чем масштаб предшествовавшего геологического картирования, при сохранении всех других условий, то плотность наблюдений должна быть увеличена не менее чем в 4 раза и составлять четыре точки на 1 см<sup>2</sup> карты.

При мелко- и среднемасштабном минералогическом картировании детально изученных в геологическом отношении площадей в зависимости от масштаба геологической съемки плотность наблюдений можно уменьшить в 4—8 раз;

### **Минералогическое опробование в процессе картирования**

Для минералогического картирования характерна неполнота минералогической информации, получаемой путем прямых полевых наблюдений и измерений. Поэтому необходим отбор большого числа проб для дальнейшего их лабораторного исследования. Минералогические наблюдения в поле включают как необходимый элемент минералогическое опробование, и в этом отношении минералогическое картирование методически сближается с геохимическим.

Минералогическое опробование проводится для инструментальной диагностики минералов, определения количественного минерального состава, изучения взаимоотношений между минералами и восстановления кристаллизационной истории объектов, выделения отдельных индивидов и монофракций минералов для изучения их конституционных особенностей и свойств. Для решения этих задач в каждой точке наблюдения отбираются:

— минералогические штупы для изучения взаимоотношений между минеральными индивидами и для подготовки специальных препаратов (распилов, пластин, полировок и т. п.);

— образчики для изготовления прозрачных шлифов, необходимых для микроскопического изучения прозрачных минералов;

— образчики для изготовления полированных шлифов (аншлифов), необходимых для микроскопического изучения непрозрачных и прозрачных минералов в отраженном свете, а также другими физическими и химическими микролокальными методами (электронно-зондовый и лазерный микроанализ, определение физических свойств, структурное проявление и т. п.).

— минералогические пробы для определения минерального состава и оценки количественных соотношений между минералами;

— первичные концентраты минералов для последующего их обогащения и выделения мономинеральных фракций.

Методика отбора перечисленных видов образцов и проб, как и их предварительная подготовка, не требует пояснений: они достаточно детально характеризуются в руководствах по соответствующим методам исследований. Необходимы некоторые пояснения лишь по минералогическим пробам.

В настоящее время количественный минеральный состав различных объектов определяется главным образом с помощью иммерсионного анализа гранулометрических и гравитационных фракций под микроскопом и минералогического анализа искусственных шлихов. В качестве универсального метода опробования начинает выступать метод протолочек. Вначале он применялся при изучении изверженных горных пород, затем распространился на руды, метаморфические и осадочные породы, а сейчас используется при изучении практически всех минералогических объектов (за исключением очень тонкодисперсных).

Процедура метода протолочек сводится к следующему: в точке минералогического наблюдения отбирается одним из подходящих способов (точечным, бороздовым, задирковым, объемным и др.) проба (или пробы) интересующего минерала. Проба диспергируется механическим, ультразвуковым дроблением или каким-то другим способом до размера зерен, обеспечивающего максимальное разделение минерала на индивидуиды. Из раздробленной пробы отбираются навески на иммерсионный, химический, спектральный и другие виды анализов, а оставшаяся основная часть разделяется на ряд фракций. Наиболее простой способ разделения — отмывка серого шлиха и фракционирование его с помощью магнитов, электромагнитов и в тяжелых жидкостях. В каждой фракции определяется содержание минералов, а затем все результаты пересчитываются на исходную пробу с учетом потерь при дроблении и фракционировании. Результаты корректируются данными иммерсионного анализа и результатами изучения шлифов и аншлифов. Выделенные фракции представляют собой концентрат для отбора мономинеральных зерен.

Методические вариации при опробовании и обработке протолочек определяются особенностями объекта исследования и техническими средствами. Наибольшие затруднения связаны с выбором массы проб и предела измельчения. Они могут быть определены или аналитическими методами (детально разбираемыми в курсах опробования), или эмпирически, по воспроизводимости результатов. Нами проведено очень много таких эмпирических оценок и были обработаны пробы массой от многих тонн до нескольких граммов. Этот опыт убедил нас, что наиболее оптимальными при проведении минералогического картирования любых масштабов являются небольшие пробы (0,8—1,2 кг). Их обработка не очень трудоемка, а воспроизводимость

результатов вполне обеспечивает требуемую точность. Более крупные пробы, конечно, повышают воспроизводимость, но ограничивают массовость опробования; кроме того в большом количестве концентрата часто «теряются» зерна некоторых акцессорных минералов. Дробление целесообразно проводить до размера 1—0,25 мм. Эти рекомендации относятся лишь к массовому (картировочному) опробованию, а не к специальным его видам. В целом метод протолок детально разбирается в пособии В. В. Ляховича [26].

Метод протолок, как видно, довольно прост, но весьма информативен. Современные полевые минералогические лаборатории разрабатываются с ориентировкой именно на этот метод, как ведущий при региональных минералогических исследованиях.

Первичные концентраты минералов для выделения мономинеральных фракций набираются либо вручную, если минералы доступны для визуальной диагностики и селективного отбора, либо с применением простейших операций обогащения: отмывки в воде и тяжелых жидкостях, магнитного и электромагнитного разделения, флотации и т. п.

### **Особенности минералогического картирования в различных геологических условиях**

Геолого-минералогические особенности объекта картирования существенно влияют на его методику. При проведении топоминералогических работ в различных геологических условиях надо учитывать следующие важнейшие факторы.

Картирование в областях развития осадочных минеральных комплексов. Наиболее эффективным оказывается минералогическое картирование в областях развития терригенных пород или других пород, содержащих терригенные минералы. Методика картирования разработана довольно хорошо, а составление карт распространения терригенного материала является одним из компонентов палеофациального анализа.

Элементами картирования являются терригенные минералы, для которых на основе минералогического анализа устанавливается их содержание, изучаются морфологические особенности, некоторые свойства, главным образом оптические, иногда состав. Наиболее популярные минералы, распространение и свойства которых в геологическом пространстве обычно наносятся на карты.— это кварц, гранат, циркон, эпидот, титанит, турмалин, анатаз, рутил, слюды, шпинели, хромит, магнетит, ильменит, пироксен, амфиболы, ставролит, пирит и др.

Картирование проводится с целью выделить терригенно-минералогические провинции, понятие о которых было впервые сформулировано В. П. Батуриным в 1937 г. Терригенными про-

винциями он называет современные или ископаемые области, седиментации, охарактеризованные определенным комплексом легких и тяжелых минералов. Если формирование комплекса связано с поступлением терригенного минерала из одной области, провинция называется простой, если из нескольких, — сложной.

Впоследствии было введено понятие аутигенно-минералогической провинции, а минералогическое картирование было распространено на весь комплекс осадочных образований.

В процессе картирования проводится детальное минералогическое опробование, плотность которого определяется степенью обнаженности пород и наличием зерна скважин. По пробам изучаются состав отдельных фракций (песчаной, алевролитовой, глинистой, карбонатной) и свойства минералов. На основе этих данных составляются карты распространения и изменения свойств определенных минералов и проводится генетико-информационный анализ этих карт с учетом не только распространенности, но и типоморфных и индикаторных свойств минералов. Анализируются корреляционные связи между минералами, прослеживаются их пространственно-временные изменения, выясняется генетическая природа. Результаты этого анализа составляют основу для выделения терригенно-минералогических или аутигенно-минералогических провинций и субпровинций и составления генерализованной минералогической карты (рис. 46). Поминеральные и генерализованные карты позволяют надежно определить источники сноса отдельных минералов и ассоциаций минералов и представляют собой важный источник информации для палеогеографических построений. Так, поминеральные карты, положенные в основу карты на рис. 46, свидетельствуют о сложной структуре питания: минералы группы эпидота поступали с юго-востока и частично с севера; циркон, гранаты и другие рудные минералы — с севера, северо-востока и юго-запада; апатит — с запада, северо-запада.

В качестве другого примера приведены две минералогические карты, составленные А. С. Девдариани и В. А. Гроссгеймом [11] для подошвы и кровли одного из элементов ритма «Аврора» верхнемеловой флишевой толщи Северо-Западного Кавказа (всего авторами составлено около 100 карт) и обработанные с помощью генетико-информационного анализа. Использован широко применяемый в теории информации метод накопления сигналов.

Одним из сигналов, выделенных для подошвы элемента ритма, оказался сигнал, характеризуемый системой связи (пирит 5,0 + циркон 4,7 + фракция  $> 0,2$  мм — (бурые окислы 3,6—4,4)+анатаз 3,9+фракция 0,2—0,01 мм), где (+) и (—) означают положительный и отрицательный сигналы, а к минералам приписаны значения их плотности. Эти данные нанесены на карту (рис. 47, а), где сгущенная штриховка отражает воз-

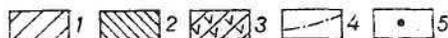
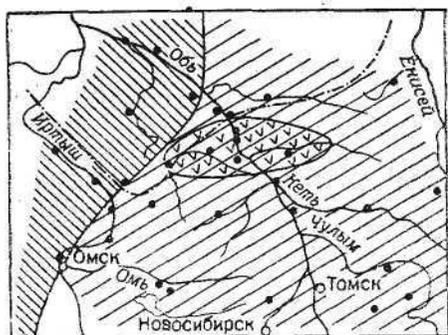


Рис. 46. Терригенно-минералогические провинции готеривбарремских отложений Западно-Сибирской низменности. По Ф. Т. Биккенцой.

Провинции: 1 — гранат-апатит-циркон-эпидотовая; 2 — эпидот-циркон-гранат-апатитовая, 3 — апатит-эпидотовая; 4 — границы сероцветных прибрежно-морских отложений на северо-западе и пестроцветных лагунных отложений на юго-востоке; 5 — местоположение скважины

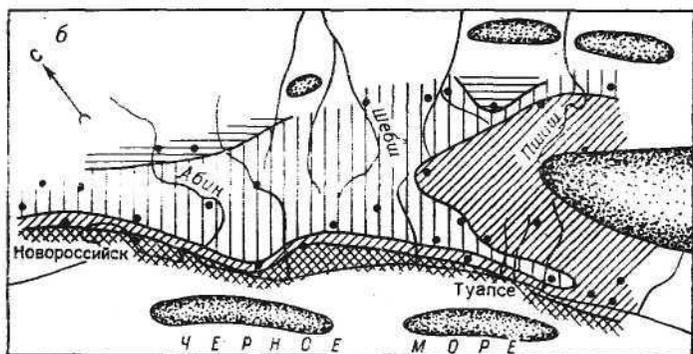
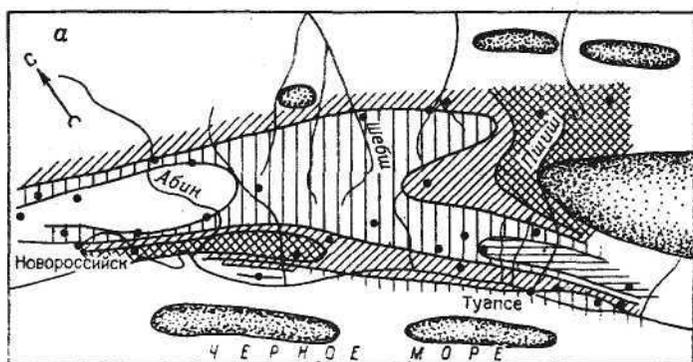


Рис. 47. Палеогеографическая обстановка в районе северо-западного окончания Главного Кавказского хребта для рубежа 80 млн. лет, восстановленная по данным минералогического анализа пород. По А. С. Девдариани [11]:

а — рельеф дна древнего моря; б — зоны относительной интенсивности переноса материала.

Сгущение штриховки на схеме а указывает уменьшение глубин, на схеме б — увеличение интенсивности сноса с древней Черноморской суши и Кавказского острова и уменьшение интенсивности сноса с древней Северо-Кавказской суши. Точками показаны места отбора проб. Закреплены контуры древних островов

растание значений полезного сигнала. Смысл его расшифровывается как увеличение гидравлической крупности материала вследствие возрастания активности среды, связанной с уменьшением глубин бассейна. Эту карту, следовательно, можно интерпретировать как карту рельефа дна флишевого трога в начале накопления ритма.

Второй выделенный для подошвы сигнал: (рутил+другие минералы титана) — (рудные минералы). Близкий сигнал выделен также и для кровли ритма: (рутил + другие минералы титана + ксенотим + циркон + анатаз + слюда) — (рудные минералы+бурые окислы+гранаты+ставролит). Эти сигналы рассматриваются как передающее сообщение о соотношении интенсивности питания из двух областей сноса (рис. 47, б). Возрастание сигнала отражает увеличение сноса с Черноморской суши и Кавказского острова (рутил, минералы титана, а затем ксенотим, циркон, анатаз, слюды); убывание — увеличение сноса с Северной суши (рудные минералы, затем бурые окислы, гранаты, ставролит). Совместный анализ этих двух карт указывает на зависимость распределения материала от рельефа дна трога: обтекание выступов и затекание языками во впадины.

Минералогические карты осадочных комплексов могут быть источниками и другой генетической информации: о химизме и температуре среды, об органической жизни в бассейне, климатических условиях, о динамике и кинетике осадконакопления, о процессах последующего преобразования осадков.

При минералогическом картировании осадочных минеральных комплексов, рекомендуется обращать больше внимания на глинистые минералы, являющиеся очень чуткими индикаторами условий минералообразования; их роль сейчас недооценивается. В областях развития карбонатных пород и хемогенных осадков большой интерес представляет картирование зон перекристаллизации и эпигенетических измерений, которые могут оказаться рудоносными или рудогенерирующими. Большой интерес представляет конкреционный материал, генетическая и практическая роль которого еще не совсем ясна.

Картирование в областях развития магматических комплексов. В процессе минералогического картирования магматических комплексов решается множество вопросов, среди которых основными являются вещественная и возрастная дифференциация магматических образований по минералогическим данным, возрастная корреляция различных магматических тел, определение генетической природы, условий и режима формирования магматических пород, установление связи магматизма и рудообразования, минералогических критериев рудоносности, решение вопросов о возможности использования магматических минеральных комплексов или отдельных слагающих их минералов как полезных ископаемых. Очевидно,

что для решения всех этих задач наряду со сбором стандартной минералогической информации особенно важное значение приобретает детальное всестороннее изучение порообразующих и аксессуарных минералов. Устанавливаются типоморфные и индикаторные особенности минералов, на основе которых современный методический аппарат минералогической науки позволяет делать надежные геологические, минералогенетические и практические выводы.

Картирование в областях развития метаморфических комплексов. При изучении метаморфических толщ с помощью минералогических методов решаются многие вопросы. Главнейшие из них:

- установление природы первичного субстрата (по реликтовым минералам, реликтовым текстурам минеральных агрегатов, по внутреннему строению минеральных индивидов, например по наличию окатанных ядер в цирконах и т. д.);

- расчленение и корреляция метаморфических толщ (по минеральному составу с учетом типоморфных особенностей минералов);

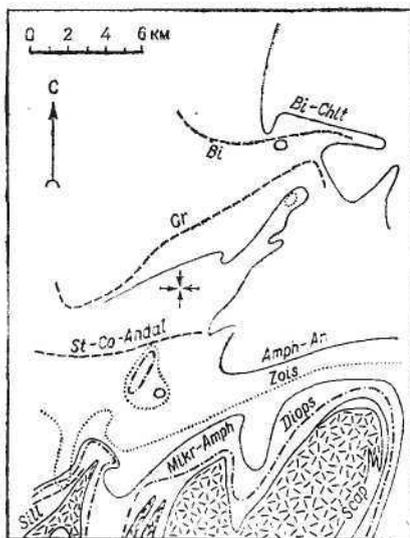
- определение структуры метаморфических толщ (главный метод — микроструктурный анализ минералов);

- выделение фракций метаморфизма (на основе изучения минеральных ассоциаций и парагенетического анализа);

- выяснение термодинамических условий метаморфизма (базируется на методах минералогической термометрии и барометрии и других генетико-информационных методах);

- установление закономерностей перераспределения и концентрации вещества при метаморфизме, закономерностей формирования метаморфогенных месторождений полезных ископаемых (по данным о пространственном распределении минералов).

Минералогическое картирование должно включать как необходимый элемент сбора информации для решения этих задач, но не в обобщенном виде, а в пространственно-временной структуре. Важнейшими документами минералогического картирования являются



**Рис. 48. Фрагмент схемы метаморфизма района Ватервилл-Виссалборо.**

Заштрихованная площадь — синметаморфический гранитный шток. Различными линиями показаны изогорды, полученные разными авторами

генеральные и **специальные карты метаморфизма**, на которых отражаются минералогический состав метаморфических комплексов и условия метаморфизма (рис. 48).

Картирование месторождений полезных ископаемых. Подавляющее большинство работ по минералогическому картированию, выполненных к настоящему времени, относятся к минеральным месторождениям или рудным полям. Методика картирования полезных ископаемых в целом не отличается от картирования других минеральных комплексов.

Минералогическое картирование минерального месторождения проводится, как правило, в крупном основном масштабе с использованием широкой гаммы масштабов для детализации отдельных элементов и большого объема документации. Поскольку процессы рудообразования весьма сложны и длительны, нередко многостадийны и многоэтапны, а рудные месторождения претерпевают неоднократные изменения вплоть до разрушения и регенерации, одна из важнейших задач их изучения — установление кристаллизационной истории руд.

Утилитарная ценность объектов картирования выдвигает три основные задачи: 1) определение масштабов оруденения, прогнозирование и поиски рудных тел; 2) изучение конституции и свойств полезных минералов с целью их максимального эффективного использования; 3) изучение минерального состава и структурно-текстурных особенностей рудных тел для разработки наиболее рациональных технологических процессов добычи и переработки руд.

## **МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ КАРТЫ**

В результате минералогического картирования составляется серия частных минералогических карт и обобщающая комплексная минералогическая карта. Типы минералогических карт настолько разнообразны, насколько разнообразны цели и объекты картирования. Мы остановимся лишь на главнейших типах карт.

1. Карта фактического материала содержит нанесенные на геологическую или топографическую основу полевые минералогические маршруты, положение точек наблюдения, расположение горных выработок и скважин, места отбора различных проб, некоторые элементы минералогической информации (находки экзотических минералов, распространение главнейших минеральных комплексов и т. п.).

2. Карта топотипов более низкого ранга, чем объект картирования, представляет собой объединенные карту минералогического районирования и карту минеральных полей; на ней отражены границы минералогических провинций, субпровинций,

районов, зон, области распространения минеральных комплексов.

3. Карта (или карты) минеральных ассоциаций, построенная на основе парагенетического анализа для каждого минерального комплекса" или группы комплексов.

4. Поминеральные карты, отражающие распространение отдельных минералов по площади объекта картирования.

5. Карты типоморфизма минералов, на которых показывается изменчивость в пространстве конституционных особенностей и свойств минералов, отражаются типоморфные и генетико-информационные особенности, некоторые генетические данные.

6. Карты информационной энтропии, построенные путем «сжатия» разнородной минералогической информации и приведения ее к единой информационной мере [60]; они отражают суммарную сложность минералогической структуры объекта картирования и раскрывают его генетическую неоднородность, так как информационная энтропия является функцией развития.

7. Карты-врезки (комплексные и специальные) отдельных участков детализации, отдельных минеральных тел, выполненные в более крупных масштабах, и обзорная минералогическая карта более мелкого масштаба.

8. Генеральная комплексная минералогическая карта, суммирующая в обобщенном виде всю топоминаралогическую информацию и отражающая общие закономерности распределения минералов и эволюцию процессов минералообразования (опыт показывает, что наибольшую трудность при генерализации топоминаралогических данных представляет определение такого уровня обобщения, при котором были бы обеспечены и минимальные потери информации и читаемость карты).

9. Интерпретационные минералогические карты, отражающие определенные топоминаралогические закономерности, которые вскрываются в результате анализа частных, специальных и комплексных минералогических карт (минералогическая зональность, аномалии, фации метаморфизма и т. п.), или показывающие изменение условий минералообразования в различное время, т. е. раскрывающие любые следствия, вытекающие из результатов минералогического картирования.

10. Прогнозные карты, предсказывающие на основе результатов минералогического картирования и установленных топоминаралогических закономерностей не наблюдаемые, но вероятные объекты и явления и определяющие их возможное пространственное положение (к этой категории относятся и прогнозные карты полезных ископаемых).

В основу методики и техники составления минералогических карт положены принципы, которыми определяется содержание геологических карт [7, 39].

На разреженной до максимально возможной степени топографической основе цветом или крапом отражается распространение минеральных комплексов и других, непрерывных элементов картирования, линиями — положение границ минералогических полей и линейных минералогических элементов. Дискретные элементы обозначаются точечными условными знаками, если они не разрешаются масштабом карты, или отрисовываются их собственные контуры, если это позволяет масштаб карты. Каким-то образом (цветом, штриховкой, знаками) показывается возрастное соотношение различных элементов. Цифрами в абсолютных или относительных величинах дается количественная оценка картируемых объектов или явлений, а изолиниями может быть показано пространственное изменение некоторых наиболее важных характеристик. Дополнительными контурными линиями или наложенным крапом, штриховкой можно показать и некоторые результаты обработки топоминералогических наблюдений, и прогнозные данные: минералогическую зональность, структуру палеотемпературных полей, перспективные на определенные виды минерального сырья площади и т. п.

Содержание и структура минералогических карт определяются четырьмя главными факторами: 1) общей целью минералогического картирования; 2) особенностями минералогической структуры объекта картирования и степенью его сложности; 3) степенью обнаженности региона, плотностью горных выработок и скважин, детальностью полевых наблюдений; 4) масштабом минералогической карты.

При создании минералогических карт, к сожалению, пока почти не используются немасштабные построения, за исключением детализационных карт-врезок. Немасштабные топологические схемы, позволяющие наилучшим образом подчеркнуть выявленную закономерность, должны стать таким же обязательным элементом минералогической карты, как ее легенда. Весьма перспективным считается использование графов — топологических схем, фиксирующих все связи объектов. Примером их являются ряды минералов с указанием генетических связей между ними, т. е. простые списки минералов замещаются частично упорядоченными множествами. Эта тенденция находит отражение и при составлении диаграмм последовательности кристаллизации минералов (см. рис. 24, 29). Перспективностью использования ориентированных графов при минералогическом картировании особенно убедительно показана Г. Н. Вертушковым [6].

Одной из актуальнейших проблем развития топоминералогических исследований является стандартизация минералогической съемки и минералогического картирования, создание кодекса соответствующих инструкций.

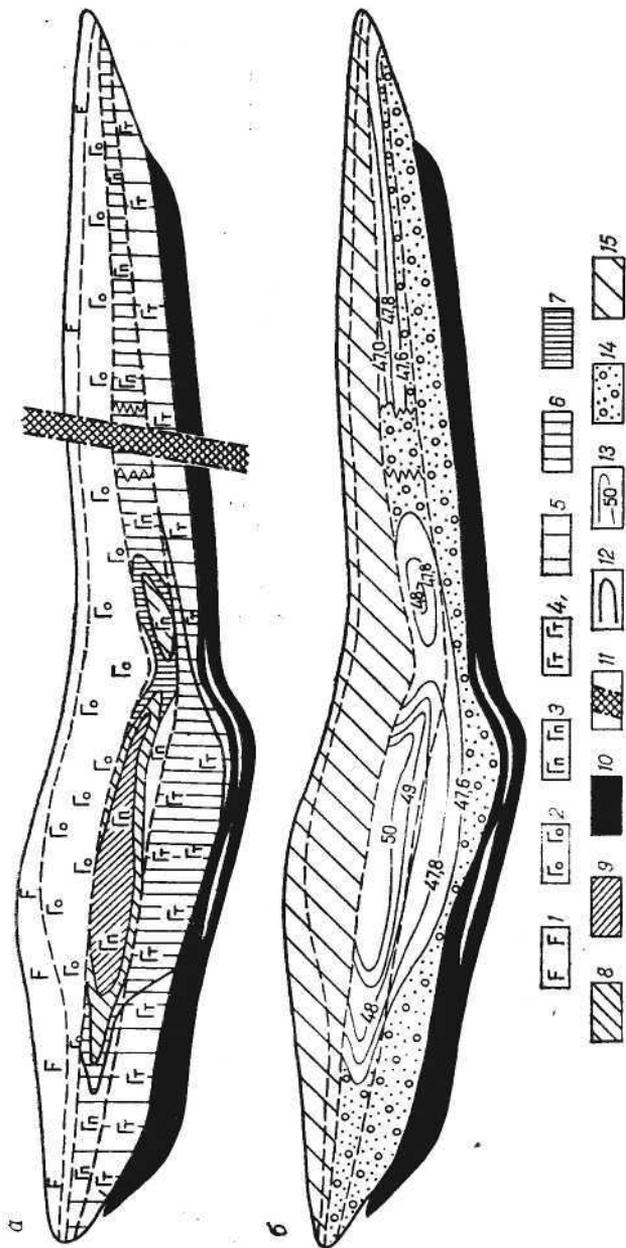
## Анализ пространственных минералогических закономерностей

Одним из требований, предъявляемых к минералогическим картам, является наглядное отражение общих закономерностей изменения пространственной минералогической структуры объекта картирования. Как правило, карты отвечают этому требованию, однако не всегда пространственная минералогическая изменчивость вырисовывается явно и сама по себе. Для ее раскрытия требуются специальные приемы, специальные методы анализа.

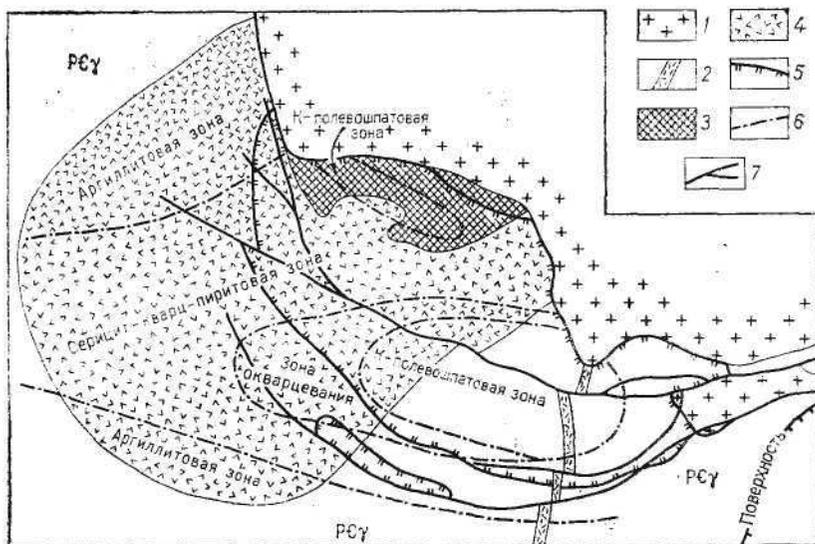
Наиболее простой и широко применяемый путь отражения на карте пространственной минералогической структуры объекта картирования — это картирование минералогической зональности. Оно осуществляется прослеживанием и оконтуриванием полей однородных совокупностей признаков. Если поля закономерно сменяют друг друга в пространстве, то они трактуются как зоны и соответствующим образом выделяются на карте. Чаще всего зональность выделяется по полям распространения различных минералов или по ассоциациям минералов (например, баритовая, флюоритовая, галенит-сфалеритовая зоны и т. п.). Иногда фиксируется зональное изменение структуры, состава и каких-то свойств минералов (рис. 49).

При топоминералогических исследованиях имеют дело с зональностью различных масштабов: от зональности отдельных минеральных индивидов и их агрегатов (микротопоаномия) до минералогической зональности планетарного масштаба. В крупном масштабе для небольших тел или участков тел отрисовывается зональное распределение почти каждого минерала. При крупномасштабном картировании крупных минеральных тел предпочтение отдается нанесению на карту зон распространения различных типов минеральных агрегатов, хотя это не исключает и показа отдельных минералов. В пределах полей месторождений полезных ископаемых зональность вырисовывается либо по изменению минерального состава руд и пород (рис. 50), либо по проявлению различных этапов развития рудной или нерудной минерализации (рис. 51). На мелкомасштабных картах обычно показывается зональное распределение минеральных комплексов, формаций, ассоциаций, парагенезисов.

Минералогические зоны только в идеализированном виде представляются гомогенными. Они, как правило, внутренне неоднородны, и любой признак, принятый за главный при выделении зон (наличие определенного минерала, его содержание и т. п.), закономерно изменяется в пределах зоны. Более того, само выделение зон осуществляется нередко не по исчезновению или появлению того или иного признака, а по изменению его количественной характеристики (например, по количественным соотношениям ряда минералов). Поэтому важное значение при



**Рис. 49. Минералогические разрезы Талнахского полностью дифференцированного интрузива. По данным В. В. Дистлера и др.**  
*a* — распределение парагенетических ассоциаций сульфидов; *b* — изменение состава моносульфидного твердого расплава.  
*1* — диориты, габбро-диориты, габбро и базальтовые габбро-долериты; *2* — оливинсодержащие и оливиновые габбро-долериты; *3* — пикриты и троктолитовые габбро-долериты; *4* — такситовые и равномернопозернистые габбро-долериты; ассоциации высокозернистого парагенезиса: *Pent*<sup>1,0-1,13</sup> + *Pyrr*<sup>m</sup> — *Pent*<sup>1,00-0,80</sup> + *Chalc* + *Pyrr*<sup>h</sup> — *Chalc* + *Pyrr*<sup>h</sup> — *Chalc* + *Tr* + *Pyrr*<sup>h</sup> — *Chalc* + *Pyrr*<sup>h</sup> — *Pent*<sup>1,05-1,13</sup> + *Sub* + *Chalc* + *Tr* + *Pyrr*<sup>h</sup> — *Chalc* + *Pyrr*<sup>h</sup> — *Pent*<sup>1,0-1,13</sup> + *Sub* + *Chalc* + *Tr* + *Pyrr*<sup>h</sup> — *Chalc* или *Chalc*<sup>h</sup> + *Sub* + *Tr*; *10* — тела сплошных сульфидных руд; *11* — разрывные нарушения; *12* — границы горизонтов стратифицированного интрузива; *13* — изольини состава моносульфидного расплава, ат. %  $\Sigma$  Me; *14* — участок моносульфидного расплава менее 47,6 ат. %  $\Sigma$  Me; *15* — бессульфидные горизонты интрузива



**Рис. 50.** Минералогическая карта горизонта молибденового рудника Урад, показывающая взаимоотношение зон гидротермальной переработки с контуром рудного тела и телами магматических пород. По С. В. Элледжу.

1 — порфиры; 2 — риолитовые порфиры; 3 — кварцевые порфиры; 4 — брекчия, сцементированная кварцевым порфиром; 5 — контур молибденовой минерализации >0,20 % Mo Sg; 6 — границы минеральных зон гидротермальной переработки; 7 — разломы; РСУ — докембрийские граниты



**Рис. 51.** Схема горизонтальной зональности месторождения Караобинского. По Е. А. Денисенко.

Зоны развития минерализации: 1 — молибденовой (I этапа); 2, 3, 4 — соответственно вольфрамовой, олово-висмут-редкометалльной и молибденовой (III этапа), 5 — вольфрамовой (IV этапа)

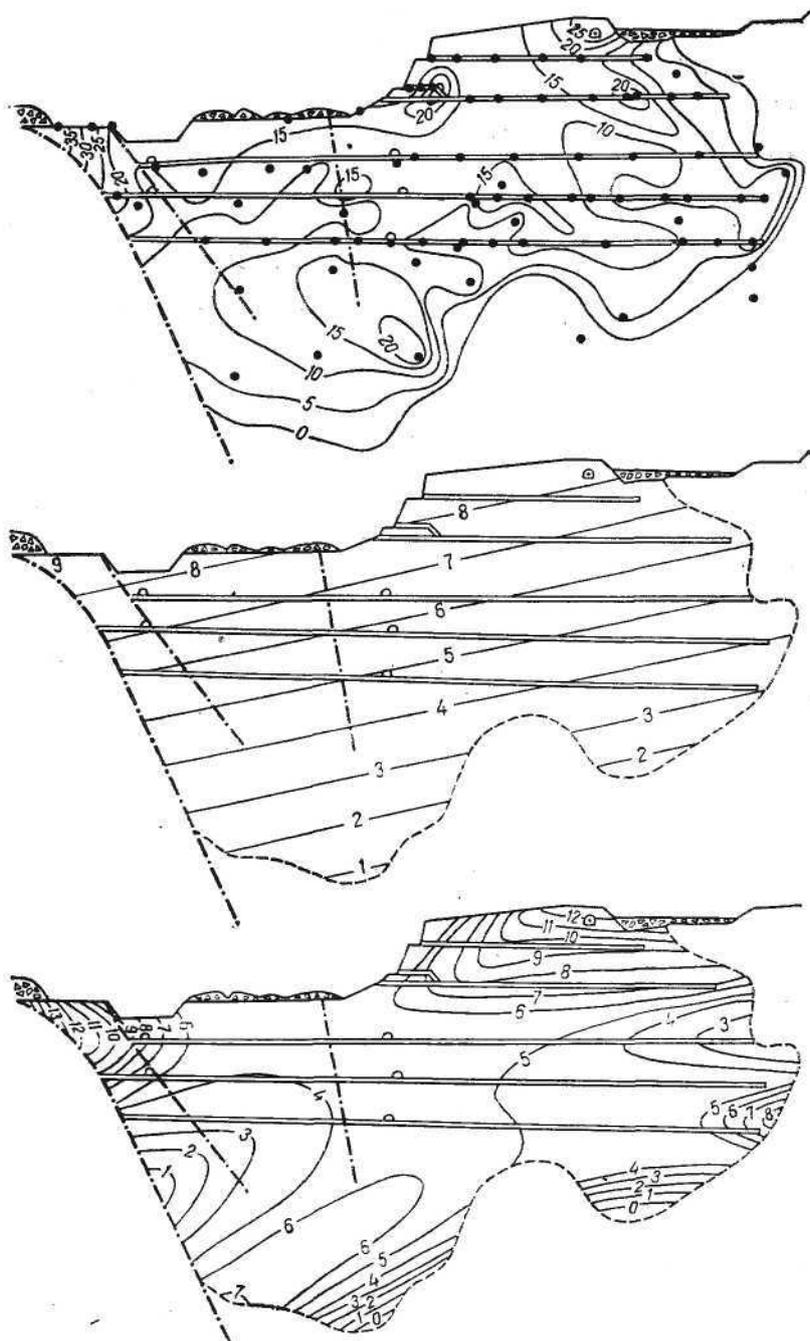
создании минералогических карт и их использовании имеет анализ пространственной изменчивости минералогических характеристик. Он обычно выполняется графическими или аналитическими методами [37].

Графические методы описания минералогической изменчивости наиболее популярны среди минералогов. Особенно широко применяется топографический метод, смысл которого заключается в том, что точки с одинаковыми значениями изучаемого признака (или вероятные положения этих точек, установленные экстраполяцией или интерполяцией) соединяются на карте изолиниями, совокупность которых отражает неоднородность картируемого объекта по данному признаку. Таким способом строятся системы изоконцентраций отдельных минералов, изобары и изотермы условий минералообразования, определенные с помощью минералогических термометров и барометров и др. Топографический метод наиболее прост и нагляден, но в условиях крайней изменчивости исследуемого признака, особенно сопровождающейся прерывистостью, его применение весьма затруднительно. В этих случаях приходится как-то искусственно «сглаживать» изменчивость и сосредоточивать внимание на выявлении тенденций пространственного изменения [37, 45].

Аналитические методы исследования минералогической изменчивости заключаются в выводе функций, наиболее удовлетворительно описывающих эту изменчивость. Аналитические функции в графическом виде выносятся на карты. Это могут быть системы уравнений изменчивости исследуемого признака в пространстве или системы уравнений «рельефа» изоповерхностей (изоконцентраций, изохор, изотерм и т. п.).

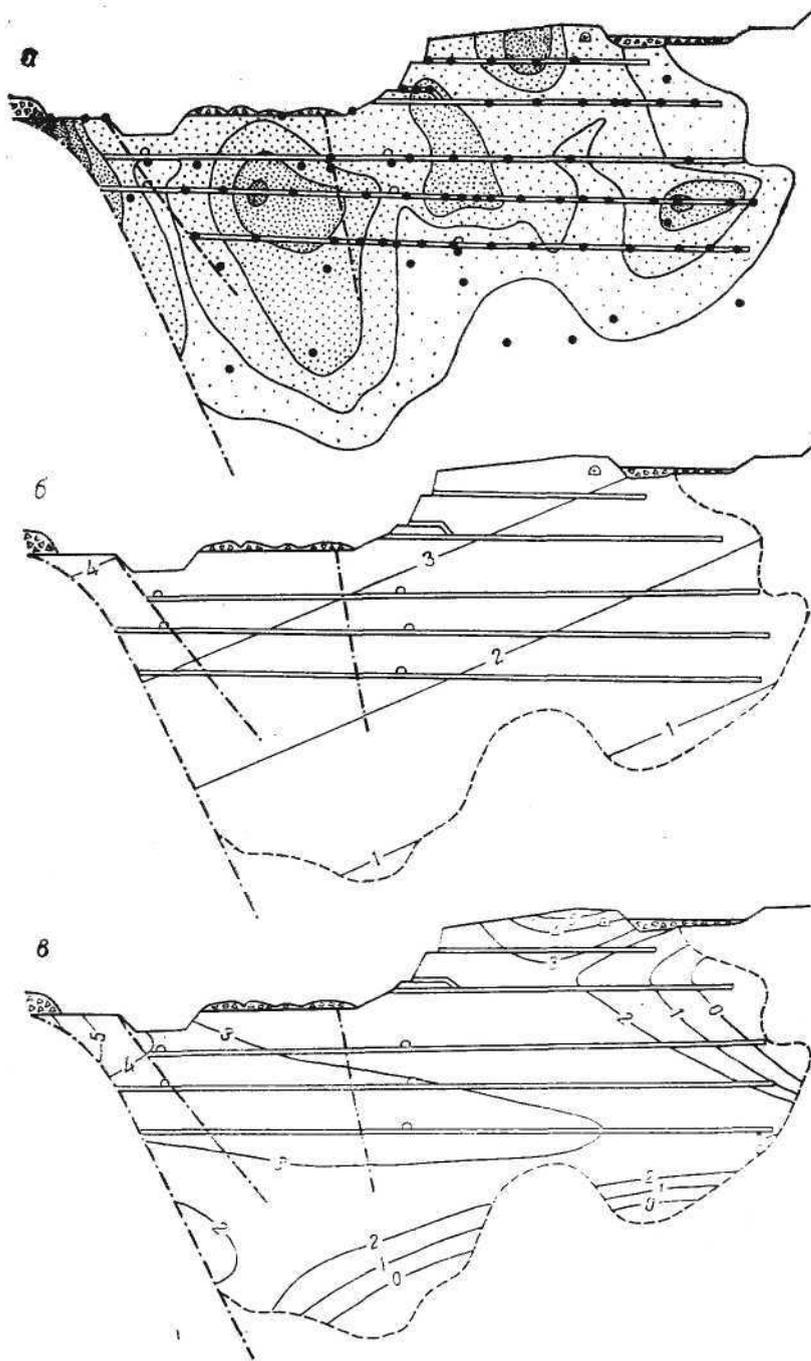
Очень перспективен для пространственно-минералогических построений метод трендов, который эффективно опробовался большим числом специалистов-минералогов в различных условиях. Поверхности тренда представляют собой модели изменчивости минералогических характеристик, построенные на анализе регрессии путем нелинейной интерполяции с учетом дисперсии признака. Поверхность тренда не проходит через точки определенных значений признака, а сглаживает изменчивость; по сути дела, она сама задается уравнением. Сила тренда характеризует степень приближения поверхности тренда к реальной картине изменения признака. Для поверхностей различной формы (т. е. для трендов разного порядка) сила связи, естественно, будет неодинаковой. Важное достоинство тренд-анализа — это нивелирование «скачков» в изменении признаков, установление общих тенденций изменчивости и, следовательно, большие прогностические возможности.

Тренд-анализ применялся автором совместно с М. А. Урасиным, например, для изучения закономерностей распределения полезных минералов в рудных залежах Шорсуйского серного месторождения, которые сформированы в результате метасома-



**Рис. 52. Тренды изменения содержаний серы (слева) и продуктивности месторождения.**

*a* — изолинии концентрации серы (%) и продуктивности (густота крапа отражает 4-го порядка (цифры — значения изолиний тренда). Точками указаны линии



оруденения (справа) в продольном разрезе залежи «к» Шорсуйского серного

относительную величину продуктивности); б — тренды 1-го порядка; в — тренды опробования.

тического замещения сульфатных пород серой и парагенными ей минералами. Залежи имеют форму неправильных линз, согласных с вмещающими породами и имеющих крутое (около 60°) падение. Распределение самородной серы и других эпигенетических минералов весьма неравномерно, и анализ изоконцентраций минералов не раскрывает отчетливо каких-либо пространственных закономерностей (рис. 52, а). То же относится и к мощности, и к продуктивности залежей. Для выявления тенденций пространственной изменчивости каждого из этих показателей (содержание минералов, продуктивность, мощность) во всех залежах месторождения были выведены уравнения и построены поверхности тренда от 1-го до 5-го порядков. Наиболее удовлетворительными оказались тренды 4-го порядка, сила которых для разных показателей и разных залежей варьирует от 33 до 64 %, в то время как сила трендов 1-го порядка очень низка (6—10 %) и только в отдельных случаях достигает 36 %. Однако все тренды, даже очень слабые, отчетливо вырисовывают единую пространственно-минералогическую закономерность — горизонтальную зональность минерализации и постепенное снижение как содержания самородной серы, так и продуктивности минерализации от земной поверхности на глубину. Эта зональность несколько искажается склонением вектора максимальной изменчивости на восток, что связано с влиянием диагонального сбросо-сдвига и опережающих его нарушений, игравших активную роль в минералообразовании. Особенно четко эта тенденция проявляется в строении залежи «*k*», локализованной в известняках (рис. 52, б, в). Минералогическая структура серных залежей, описываемая поверхностями тренда, отражает топологию минералообразующего процесса: самородная сера кристаллизуется в результате взаимодействия поступающего с глубины и по дизъюнктивным нарушениям сероводорода совместно с хлоридными щелочноземельно-натриевыми рассолами («нефтяными» водами) и кислорода, инфильтрующегося с поверхностными водами. Изолинии поверхностей тренда вырисовывают динамическую картину смещения этих двух геохимических систем и топографируют условия, в которых протекает окислительная реакция  $2\text{H}_2\text{S} + \text{O}_2 = \text{S}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ , реализующаяся при участии тионовокислых бактерий.

На рис. 53, по данным В. Л. Лось и М. Д. Исаева, показаны тренды, отражающие степень гидротермального изменения среднедевонских пород в пределах Лениногорского грабена на Алтае, выраженную в относительных показателях  $M$  и  $M'$ . Показатель  $M$  определяет интенсивность гидротермального выщелачивания в фиксированной части разреза:

$$M = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{M_i m_i}{m}$$

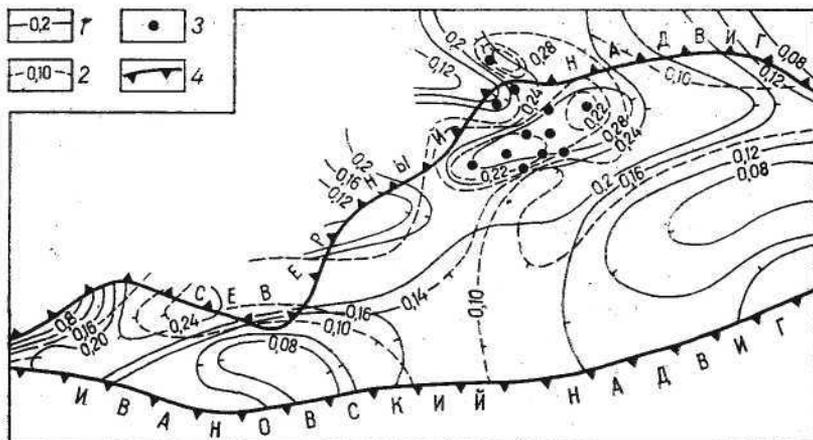


Рис. 53. Карта тренда 7-го порядка распределения величин  $M$  и  $M'$  для площади Лениногорского грабена:

1 — изолинии  $M$ ; 2 — изолинии  $M'$ ; 3 — рудные залежи; 4 — линии тектонических нарушений

где  $M_i$  — стандартная степень изменения, балл;  $m_i$  — мощность гидротермального изменения пород  $i$ -й степени интенсивности;  $m$  — мощность фиксированной части разреза. Показатель  $M$  оценивает предрасположенность той или иной породы к изменению путем введения поправочного коэффициента  $b$ , характеризующего отношение интенсивности среднего изменения данной породы к интенсивности изменения всех пород:

$$M' = \sum_{i, j} \frac{M_i b_j m_{i, j}}{m},$$

где  $b_j$  — поправочный коэффициент для  $j$ -й породы;  $m_{i, j}$  — мощность гидротермального изменения пород  $i$ -й степени интенсивности по  $j$ -й породе. Тренд-анализ подтверждает взаимосвязь полиметаллической минерализации и гидротермального изменения: максимум интенсивности гидротермального выщелачивания совпадает с полем известного Риддер-Сокольного месторождения. Этот подход можно рекомендовать для прогнозирования полиметаллической минерализации.

Очень важные прогнозные данные были получены при обработке результатов объемного минералогического картирования с помощью тренд-анализа, выполненного Б. В. Чесноковым [58] в Березовском районе (см. гл. X).

Приведенные примеры показывают, что методом тренда можно и целесообразно анализировать не только пространственные изменения наблюдаемых или измеряемых в процессе минералогического картирования показателей, но и «привязан-

ные» пространственно результаты предварительной обработки этих показателей в соответствии с какой-то гипотезой, результаты их вещественной или генетической интерпретации.

Большой теоретический и практический интерес могут представить карты энтропийных трендов, так как информационная энтропия, о которой уже неоднократно говорилось, наиболее обобщенно выражает генетическую природу характеризуемых ею объектов и тенденция изменения энтропии в пространстве раскрывает наиболее общие (и, очевидно, наиболее важные) черты эволюции минералообразования.

Пространственная трансформация в виде трендов результатов факторного анализа минералогических данных позволяет проследить по минералогической карте действие главных факторов, определяющих ту или иную минералогическую изменчивость. Как показал опыт такого анализа, выполненного по типоморфным особенностям сфалеритов Пайхойско-Южноновоземельской провинции [61], удастся довольно надежно реставрировать термодинамическую обстановку и химизм минералообразующей среды и выделять генетически различные минералогические объекты.

Мы смогли здесь остановиться лишь на общих принципах анализа пространственной минералогической изменчивости и охарактеризовали только наиболее эффективные и испытанные методы анализа. Конечно, ими не ограничиваются возможности и перспективы пространственной графоаналитической обработки и интерпретации результатов минералогического картирования. В этом отношении может оказаться полезным опыт региональной и поисковой геохимии, где давно и плодотворно применяют математический аппарат для построения и описания геохимических полей и аномалий. Правда, здесь мы имеем дело с естественными ограничениями, связанными со значительно большей сложностью минералогических объектов по сравнению с геохимическими и большей трудностью решаемых в процессе минералогического картирования задач.

### **Автоматизация процессов составления и анализа минералогических карт**

Разрабатывая методику минералогического картирования (а именно эта проблема — одна из наиболее актуальных в современной топоминералогической методологии и наиболее энергично прорабатывается), нельзя не учитывать близкую перспективу неизбежной автоматизации наиболее трудоемких этапов, а может<sup>4</sup> быть, и всего процесса обработки топоминералогической информации, составления минералогических карт и их анализа с применением ЭВМ и специальной аппаратуры. Только такой путь обеспечит широкое и эффективное внедрение мине-

ралогического картирования в геологосъемочную и поисково-разведочную практику.

Нам неизвестны удачные попытки автоматизации главных операций в области минералогического картирования, но в геологическом и геохимическом картировании и в металлогенических исследованиях достигнут довольно серьезный прогресс в создании автоматических систем на базе ЭВМ. Разработаны довольно надежные системы автоматического составления многоцветных геологических карт крупных масштабов с погрешностью в проведении границ не более 0,25 мм. В ряде стран, например в Канаде, машинная обработка составляет значительный объем в процессе картирования и осуществляется по единой системе [27]. В ряде геологических организаций СССР, например во Всесоюзном производственном объединении (ВПО) «Аэрогеология», приняты и используются ведомственные системы обработки данных геокартирования. Существуют действующие фактографические информационно-поисковые системы минералого-геохимических данных, например, во ВСЕГЕИ. Они используются для составления геохимических и прогнозно-металлогенических карт.

Для перехода на автоматические системы обработки топо-минералогических данных необходимо обеспечение двух условий. Первое — это разработка самой системы накопления, обработки и картирования данных на базе ЭВМ с достаточно большой памятью и операциональными возможностями, разработка логики решения и программ решения комплексных и частных топо-минералогических задач. Второе — это соответствующая реорганизация методики и техники полевых минералогических исследований, максимальное упорядочение сбора данных в систему, наиболее полную и наиболее приспособленную для машинной обработки. Имеется в виду унификация комплекса наблюдаемых признаков, создание единой системы их обозначения, привязки полевых наблюдений к единой системе координат, обеспечение площадной равномерности наблюдений и т. д. Однако при этом ни в коем случае нельзя принимать за основу требования машинной системы обработки или увлечься формализацией исходных данных в ущерб сбору минералогической информации. Наоборот, система обработки должна приспособливаться к методике полевых минералогических исследований, определяемой в первую очередь требованием полноты сбора и достоверности минералогической информации.

Довольно эффективная и оперативно действующая система минералогического картирования может быть создана и без ЭВМ, на базе перфокарт ручной или машинной сортировки (с краевой перфорацией или просветных, или тех и других). Методика работы с перфокартами довольно проста, многие операции можно проводить прямо в поле, имеется и достаточно большой опыт применения перфокарт в геокартировании.

Основу автоматической системы минералогического картирования составляет банк данных, содержащий полную минералогическую информацию по каждой точке наблюдения, пространственно фиксированной системой координат. Данные хранятся во внешней памяти ЭВМ на магнитной ленте или машинных перфокартах (перфолентах). Система должна работать в режиме постоянного пополнения и корректировки данных. Библиотека программных модулей должна обеспечивать необходимость математической обработки результатов наблюдений и лабораторных исследований: получение статистических характеристик, корреляционный, факторный, дискриминантный, кластерный анализы, тренд-анализ, решение задач, прогнозирования и др.

По специальным программам машина в любой момент распечатает с помощью электрических машинок типа ЭУМ, «Консул», быстродействующих и алфавитно-цифровых устройств АЦПУ, графопостроителей или каким-то другим образом любой запрашиваемый набор карт, а также необходимые тексты, таблицы.

Очевидно, в дальнейшем машине будут передаваться и функции по созданию наиболее оптимальной легенды, учитывающей специфику объекта и цель минералогического картирования. По этой легенде и будут печататься карты. Дополнительно можно вызвать любую детализацию по отдельным участкам или точкам наблюдений или, наоборот, увеличить степень обобщения данных.

Автоматические системы имеют исключительно важное значение для решения различного рода прогнозных задач, особенно для прогнозирования месторождений полезных ископаемых. Только с помощью ЭВМ можно одновременно анализировать сотни признаков во многих тысячах элементарных пространственных ячеек, с тем, чтобы установить индикаторную роль признаков и определить суммарную перспективность каждой прогнозной ячейки, а потом синтезировать все результаты прогнозного анализа и представить графически в виде комплекта прогнозных карт.

В последнее время не только в теоретическом, но и в практическом аспекте ставится проблема автоматического чтения и анализа карт, которым визуальный анализ во многом уступает, так как он носит качественный и субъективный характер. Автоматический анализ может осуществляться с помощью оптических анализаторов и ЭВМ. Считывание информации с карты проводится ее сплошным или несколько разреженным сканированием; сканограммы — главный источник информации, поступающей в ЭВМ для обработки, которая может проводиться одновременно со сканированием. Алгоритмы анализа карт определяются типом карты и целью анализа. Они могут предусматривать изучение площадей различных минералогических полей, подсчет распределения полей и дискретных эле-

ментов картирования, установление степени минералогической упорядоченности, анизотропии, изучение границ, линейных элементов, трансформацию поверхностных карт методами экстраполяции в глубинные и т. п.

Перспективы автоматизации минералогического картирования определяются не только решением методических проблем, но и возможностями технического обеспечения. Здесь намечаются два пути. Первый — выход на существующие вычислительные центры, имеющие машины с достаточно большой оперативной памятью. Второй — создание автоматического комплекса в самих минералогических структурных единицах, ведущих большой объем минералогического картирования на базе мини-ЭВМ, микро-ЭВМ с накоплением данных во внешней памяти, с системой вводных и выходных устройств, включая дисплей, графопостроители, ЦПУ и др. Второй путь, очевидно, предпочтительнее, так как он позволяет обеспечить переход от эпизодической автоматизации к универсальной автоматической системе картирования. В этих условиях легче подготовить специалистов по автоматическому картированию и собрать наиболее оптимальный комплекс аппаратуры.

Минералогическое картирование, как мы уже неоднократно подчеркивали, находится в настоящее время в стадии методической разработки, осуществляемой весьма интенсивно и широко различными коллективами. Уже изложение здесь предварительных результатов свидетельствует о возможностях этого метода стать одним из наиболее эффективных при изучении геологических регионов, особенно рудоносных. Очевидно, что наиболее рациональный путь его применения — это комплексирование с геохимическим, геологическим и другими видами картирования.

## ГЛАВА X

### СТЕРЕОМИНЕРАЛОГИЯ

Л. С. Овчинников и В. Д. Баранов [38], определяя перспективы развития металлогении, выделили как одну из актуальных проблем выяснение пространственных (в объемном, трехмерном понятии пространства) металлогенических закономерностей, рекомендовав переходить от металлогении плоскости к металлогении пространства, к стереоминералогии. Стереометаллогеническое направление развивалось и в ряде более поздних работ.

Такая же проблема остро стоит и в топоминералогии, определяя актуальность развития ее «объемного» направления, которое в согласии с металлогенистами можно назвать *стереоминералогией*.

Главная задача стереоминералогии — изучить минералы в объемном пространстве геологических тел и установить пространственные закономерности минералообразования и минералораспределения. Сущность стереоминералогии — в органическом сочетании поверхностных и глубинных минералогических исследований.

## **СОСТОЯНИЕ СТЕРЕОМИНЕРАЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Было бы несправедливо утверждать, что постановка стереоминералогических проблем — это заслуга современной минералогии. Еще в глубокой древности, как только рудокоп своими примитивными выработками стал проникать в земные недра, выискивая и прослеживая рудные тела, он обратил внимание на изменение состава руд, на изменение свойств минералов. А в научной минералогии представления о вертикальной минералогической изменчивости формируются вполне определенно и учитываются в любых теоретических построениях и прогнозах. Накоплен большой фактический материал, характеризующий минералогические изменения на довольно большие глубины. Таким образом, необходимость и перспективность стереонаправленности топоминералогических исследований ни у кого не вызывает сомнения.

Однако диспропорция между поверхностными и глубинными минералогическими исследованиями сохраняется непомерно большой. Современную ситуацию можно обрисовать примерно так: наши знания о минералогии Земли достаточны лишь для составления плоской минералогической карты ее поверхности, более точной в одних районах и менее точной в других, со все еще многочисленными белыми пятнами, но все же карты сплошной. Но ни для одного из глубинных уровней нельзя составить даже приблизительную карту. Глубинные минералогические данные можно представить только вертикальными колонками, негусто и неравномерно распределенными по поверхности нашей планеты. Они довольно плотно покрывают рудоносные районы и почти отсутствуют между ними. Следовательно, данные о глубинной минералогии наиболее применительны для рудоносных регионов, особенно регионов давно эксплуатируемых, и специфику стереоминералогических исследований следует начать с разбора в основном примеров из рудноминералогической практики.

## **МЕТОДЫ СТЕРЕОМИНЕРАЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Главный метод стереотопоминералогических исследований — это трехмерное минералогическое картирование, принципы которого в целом не отличаются от принципов поверхностного картирования. Однако весьма существенные ограничения на-

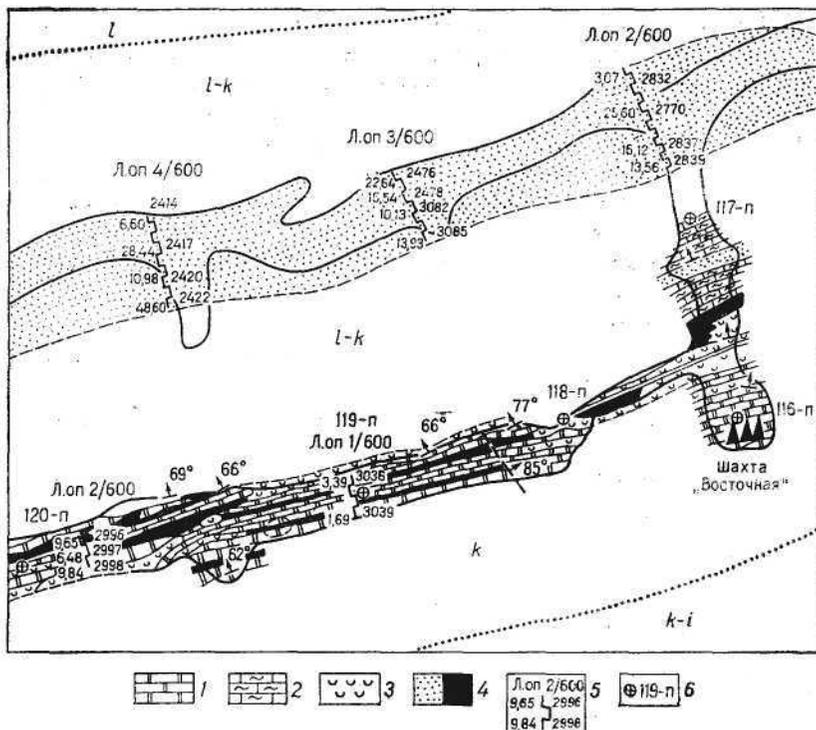
кладываются доступностью (вскрытием) недр, следовательно, детальность и глубинность картирования определяется наличием горных выработок и скважин. Получение стереотопоминералогической информации в зависимости от характера вскрытия изучаемых геологических тел можно свести к следующим четырем главным способам.

1. Способ точечного минералогического исследования проводится в тех случаях, когда доступность изучаемого минерального тела обеспечивается лишь в отдельных точках, тем или иным способом распределенных по объему тела. Примером может быть пересечение тела отдельными горными выработками, прерывистый отбор керна при бурении скважины и т. п. Детальность исследования и возможность стереотопоминералогической интер- и экстраполяции определяется густотой точек исследования.

2. Способ минералогических колонок используется в случае вскрытия и прослеживания изучаемого тела линейными горными выработками и скважинами, доступными для сплошной минералогической документации. Данный способ дает исчерпывающую минералогическую информацию в объеме колонки (выработки), и в этом отношении он более детальный, чем точечный. Однако надежность стереоинформации зависит от числа и плотности распределения колонок.

3. Способ минералогических разрезов требует либо непрерывного, на всю мощность, пересечения изучаемого тела какой-то сплошной вертикальной, горизонтальной или наклонной выработкой, либо пересечения системой выработок, расположенных друг от друга на незначительных расстояниях, достаточных для надежной экстраполяции. Горизонтальный минералогический разрез является основой для глубинной минералогической карты определенного горизонта. На рис. 54 в качестве примера приведен фрагмент подземного минералогического плана по одному из горизонтов Шорсуйского серного месторождения. Данный способ дает вполне надежную информацию, особенно если изучаемое тело подсекается или пересекается системой незначительно удаленных друг от друга разрезов.

4. Способ непрерывного объемного минералогического исследования применяется при сплошной выемке минерального тела в процессе его разведки или эксплуатации, либо в условиях очень высокой равномерности и густоты горных выработок. Несмотря на полноту стереотопоминералогической информации, этот способ требует высокой тщательности и культуры исследований, так как их повторить или дополнить обычно не бывает возможности. К сожалению, примеры непрерывных ми-



**Рис. 54. Фрагмент погоризонтного плана Шорсуйского серного месторождения, УзССР. Горизонт + 600 м:**

1 — доломитизированный известняк; 2 — мергель; 3 — гипс; 4 — серные залежи (точки — осерненные мергели, черное — серно-кальцитовые агрегаты); 5 — линия опробования (Л. оп.) (цифры — содержание серы); 6 — маркшейдерские точки. Буквенные индексы литологических горизонтов: *k-i* — песчаники слабоцементированные (верхний мел); *k* — доломитизированные известняки (палеоген, бухарский ярус); *l-k* — мергели (палеоген, сузанийский ярус); *L* — известняки (палеоген, алайский ярус)

нералогических исследований крупнообъемных тел единичны, так как не только минералогическое, но и геологическое обслуживание горнорудных предприятий, как правило, бывает недостаточно квалифицированным.

В стереотопоминалогических исследованиях обычно применяется различная комбинация этих способов, но ведущим среди них, как правило, является способ минералогических разрезов.

Глубинное минералогическое картирование, каким бы способом оно ни проводилось, обычно является крупномасштабным, детальным. Отдельные, наиболее сложные фрагменты тел могут картироваться даже в натуральную величину. При картировании широко используется способ фотодокументации.

## МЕТОДЫ ГЕНЕРАЛИЗАЦИИ СТЕРЕОМИНЕРАЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Важный этап при проведении стереотопоминералогических исследований — это генерализация полученных глубинных данных и представление их в максимально наглядном виде. Наибольшей популярностью пользуются графические и графоаналитические методы генерализации.

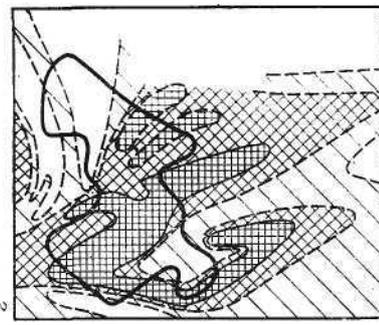
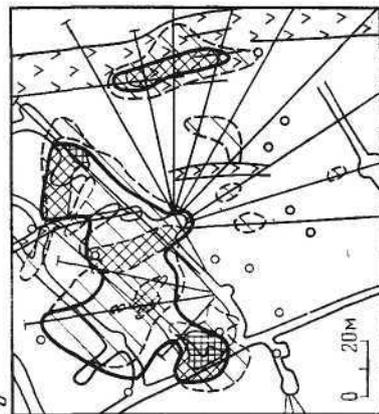
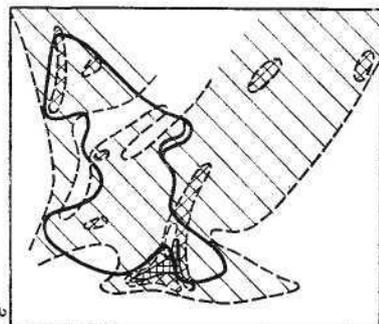
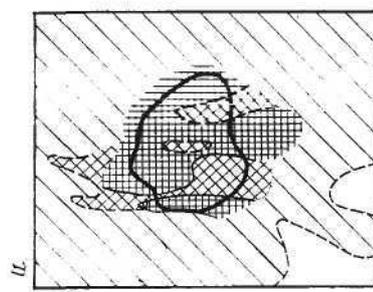
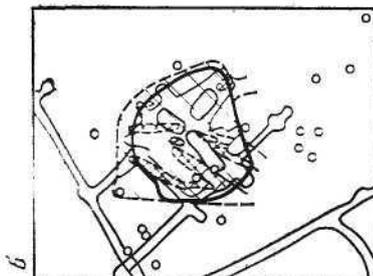
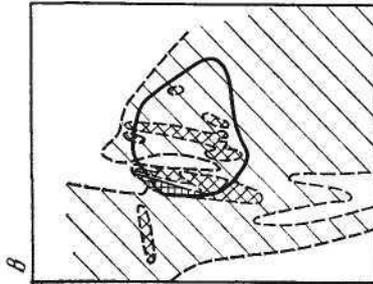
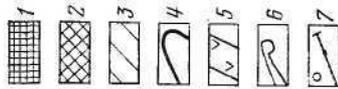
К графическим стереотопоминералогическим материалам относятся наборы карт, разрезов, блок-диаграммы и другие графические документы. Набор погоризонтальных минералогических карт, отражающих горизонтальные срезы минерального тела, и вертикальных минералогических срезов дает достаточно строгое представление о закономерностях распределения минералов и минеральных ассоциаций в пространстве и о пространственном изменении их свойств. Наглядность повышается на блок-диаграммах, однако при этом снижается детальность.

Проиллюстрируем графический метод генерализации данных результатами стереотопоминералогического картирования, проведенного В. И. Поповой и Е. Я. Синяковым на Хинганском оловорудном месторождении (рис. 55). На месторождении картировалось распределение в пространстве флюорита, касситерита и сульфидов (сфалерита, галенита, халькопирита).

Данные минералогического картирования позволили установить ряд закономерностей, например увеличение содержания флюорита в более глубоких горизонтах по сравнению с верхними и уменьшение содержания хлорита, арсенопирита, леллингита, гематита. Площади распространения всех минералов далеко, на 10—15 м уходят за промышленные контуры рудных тел, и это еще раз подчеркивает конъюнктурную природу рудных контуров, не являющихся естественными границами минеральных тел. Приведенные стереотопоминералогические материалы имеют большое значение как для решения вопросов минералогенезиса, так и для прогнозирования эксплуатационных работ.

Графоаналитическое выражение стереотопоминералогических данных наиболее эффективно осуществляется на основе тренд-анализа, сущность которого и особенности применения при поверхностном картировании были рассмотрены нами в предыдущей главе. При глубинных обобщениях анализируется пространственное положение поверхностей тренда. Это достигается получением проекций тренда на плоскости вертикальных и горизонтальных разрезов или построением объемных моделей поверхностей тренда. Такая методика применена Б. В. Чесноковым [58] при создании трехмерной минералогической модели Березовского золотоносного района на Урале.

Элементами стереотопоминералогического картирования в Березовском районе являлись распространение и свойства



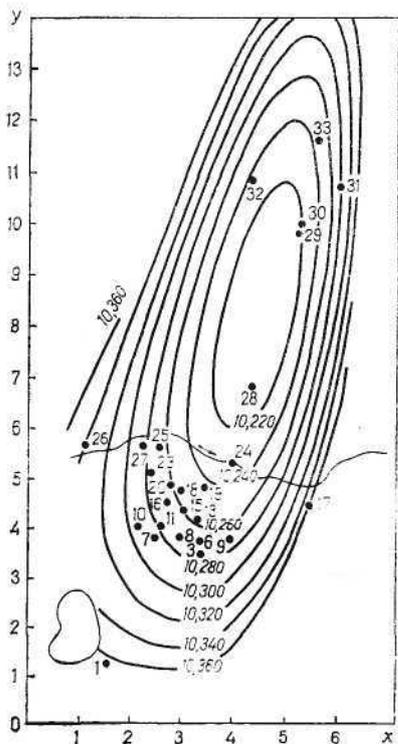
**Рис. 55.** Распределение содержаний флюорита (а, г), касситерита (б, д) в прожилках Северного-Глубокого рудного тела на горизонтах 230 (а, б, в) и 110 м (г, д, е). По В. И. Поповой и Е. Я. Снякову.

1 — более 30 об. %; 2 — от 10 до 30 об. %; 3 — менее 10 об. %; 4 — контур руд; 5 — дайки порфириров; 6 — горные выработки; 7 — скважины

ряда минералов (пирита, блеклых руд, галенита, золота, кварца), причем наиболее информативным оказался состав руд, связанный прямолинейной функциональной зависимостью с параметром элементарной ячейки. Поэтому наиболее выразительная стереотопоминералогическая картина получилась в результате построения поверхностей тренда третьей степени для значений  $a_0$  блеклых руд по площади и на глубину района.

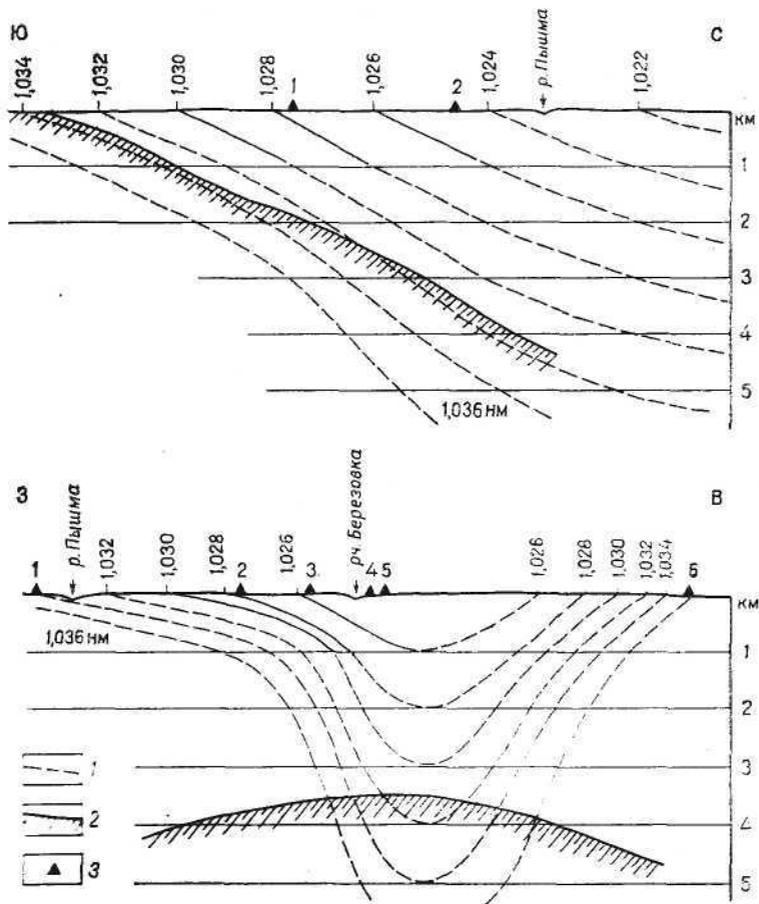
Проекция поверхности тренда на земную поверхность (рис. 56) имеет вид сильно вытянутого эллипса с субмеридиональным направлением главной оси, которая соединяет Березовское и Благодатное рудные поля. Это позволяет объединить их в один рудный район. В центральной части района представлены блеклые руды мышьякового состава, в периферической — сурьмяного. Форма и положение поверхности тренда отражают связь рудного тела с гранитоидной дайковой серией, препарирующей систему региональных тектонических нарушений.

Трансформация поверхностей топоминералогической картины на глубину осуществляется проектированием поверхности тренда на плоскостях меридионального и широтного разрезов (рис. 57). Разобранная стереотопоминералогическая модель отражает генеральную зональность рудной минерализации Березовского района. Анализ этой модели кроме установления топоминералогических закономерностей позволил определить



**Рис. 56.** Поверхность тренда третьей степени для значений параметра  $a_0$  (в %) блеклых руд Березовского рудного района. По Б. В. Чеснокову [58].

Точки — опробованные шахты, рудники (с целью разгрузки рисунка часть точек в южной части рудного района не нанесена)



**Рис. 57. Меридиональный и широтный разрезы тренда значений параметра  $a_{0(в.м.)}$  блеклых руд Березовского района. По Б. В. Чеснокову [58].**

1 — изолинии тренда; 2 — поверхность Шараташского гранитного массива (геофизические данные); 3 — шахты, рудники и другие пункты опробования

границы рудного района и дать глубинный (до 2—4 км) прогноз оруденения [58].

В качестве примера тренд-анализа, проведенного в трехмерном варианте, приведем результаты исследований Н. Е. Зобова и Ш. Д. Курцерайте магнетитовых месторождений Красноярского края. Ими было изучено несколько типов магнетитовых месторождений, опробованных по примерно равномерной сети. Тренд для содержания железа, функционально отражающий содержание магнетита, рассчитывался в трехмерном пространстве (с привязкой к трем координатам). Получены объемные фигуры, образованные поверхностями тренда, одна из которых показана на рис. 58.

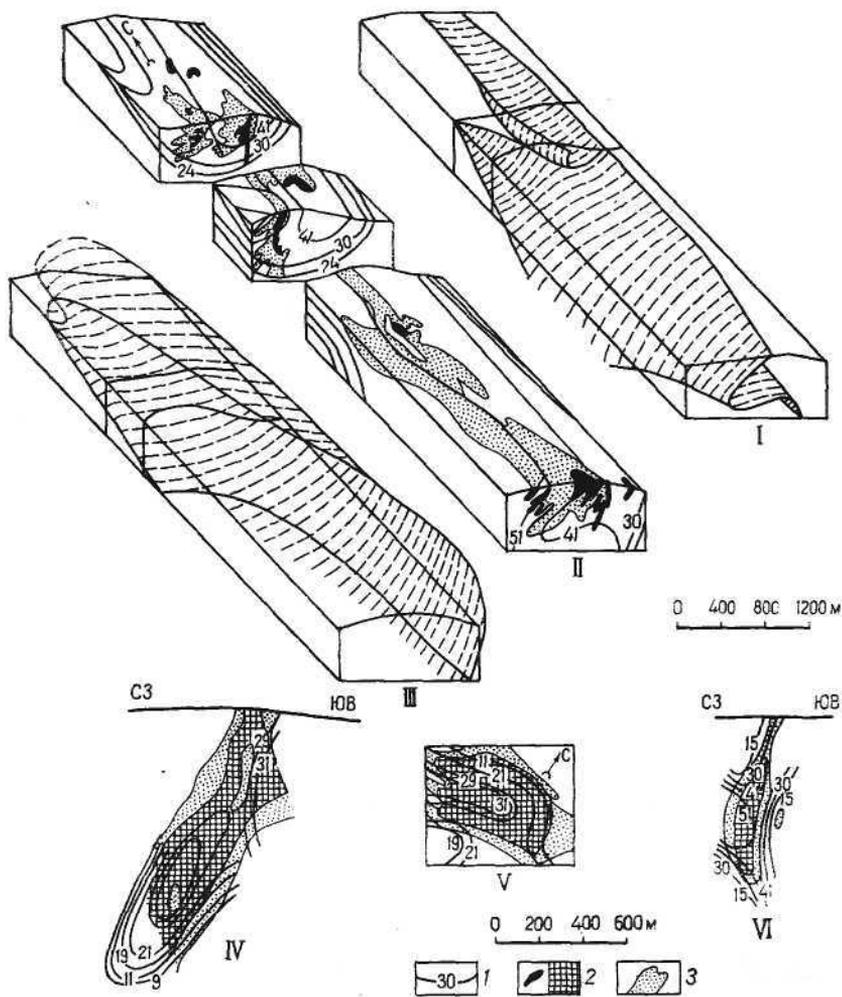


Рис. 58. Тренды содержаний железа магнетитовых месторождений Красноярского края. По Н. Е. Зобову, Ш. Д. Курцеррайге.

I — Ирбитское месторождение — поверхность тренда 3-го порядка для содержания железа 41%; II — блок-диаграмма скарновой рудной зоны с изолиниями поверхностей тренда 3-го порядка содержания железа; III — поверхность тренда 3-го порядка для содержания железа 24%; IV — Табратское месторождение — разрез скарново-рудной зоны с изолиниями поверхностей тренда 3-го порядка содержания железа; V — план скарново-рудной зоны на горизонте — 200 м с изолиниями поверхностей тренда 3-го порядка; VI — месторождение Одиночное — разрез скарново-рудной зоны с изолиниями поверхностей тренда 4-го порядка для содержания железа. 1 — изолинии поверхностей тренда; 2 — магнетитовые рудные тела; 3 — скарны

В общем случае оси симметрии объемных фигур совпадают с условными линиями максимальных мощностей рудных тел или максимальных концентраций магнетита. Аппроксимация данных полиномами низких порядков свидетельствует об единой минералогической структуре рудных полей, образованных даже многочисленными рудными телами; эта тенденция единых фигур сохраняется и для трендов высоких порядков. Результаты трехмерного тренд-анализа магнетитовых месторождений дают объективные критерии для оценки параметров и конфигурации рудных залежей, степени их эродированности, позволяют прогнозировать оруденение на флангах известных залежей и на глубину.

Давая общее заключение об эффективности графоаналитических методов стереогеологических построений, нужно отметить высокую степень генерализации данных, которые позволяют проанализировать минералогическую структуру крупных и сложных тел, наглядность, прогнозную эффективность. В то же время существует большое число факторов, могущих исказить геометрию трендов. Это непредставительные исходные данные, наличие наложенных процессов, изменивших первоначальную минералогическую структуру тела, деформации тел и т. п. Поэтому тренд-анализ, как и другие подобные методы, должны контролироваться какими-то другими приемами.

## СТЕРЕОМИНЕРАЛОГИЧЕСКОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ

Возможности стереогеологических исследований, как уже отмечалось, ограничиваются степенью вскрытия изучаемых минеральных тел, обычно далеко не достаточной для решения стоящих задач. Поэтому при глубинных исследованиях широко используются косвенные приемы, а также экстраполяции, как формальные, так и опирающиеся на установленные закономерности. Разработка эффективных приемов экстраполяции представляет собой одну из важнейших методических проблем.

Смысл *экстраполяции* заключается в трансляции установленной прямыми исследованиями топогеологической картины на неизученные объемы с соблюдением правил экстраполяции, обеспечивающих надежность прогноза (например, по топогеологии поверхности прогнозируются особенности распределения минералов на глубине или данные подземных выработок распространяются на более глубокие, нескрываемые горизонты).

При отсутствии дополнительной информации, корректирующей экстраполяцию, исходя из практики разведочного дела можно считать допустимым распространение однородного топогеологического элемента на глубину, составляющую  $1/3$  часть его поверхностного размера. Например, если поверхно-

стным картированием оконтурено какое-то мономинеральное, флюоритовое гнездо размером 15 м в поперечнике, то мы можем прогнозировать его распространение на глубину 5 м. Использование геологических данных (структурно-геологические особенности картируемой площади, данные о простирации и падении минеральных тел и др.) может существенно скорректировать экстраполяцию.

Важным обстоятельством для глубинной экстраполяции поверхностных минералогических данных является *учет особенностей рельефа*. В районах с расчлененным рельефом, особенно в горных, можно изучить естественные вертикальные разрезы мощностью в сотни и даже в тысячи метров, получив, таким образом, даже без горных выработок достаточно представительный материал для глубинных прогнозов, в том числе и для составления объемных трендов. К сожалению, естественная расчлененность поверхности минералогических провинций используется для стереоминералогических построений еще очень робко.

Л. Н. Овчинников и В. Д. Баранов установили приуроченность различных типов минерализации к определенным гипсометрическим интервалам (отмечалась многими исследователями и ранее) и предложили использовать для стереорекострукции метод так называемой *сравнительной гипсометрии*. Метод основан на том, что «... между строением кристаллической оболочки, современным состоянием дневной поверхности и геологическим строением различных территорий существует известная связь» [38, с. 58]. Он оперирует статистическими закономерностями о гипсометрической приуроченности различных минеральных месторождений.

Наиболее общая закономерность состоит в том, что основная масса минеральных месторождений сконцентрирована между земной поверхностью и глубинами 5—6 км. Различные типы минеральных ассоциаций занимают в этом интервале определенные гипсометрические уровни. Многочисленные статистические данные для рудных месторождений приводятся Л. Н. Овчинниковым и В. Д. Барановым [38]; не повторяя их, ограничимся здесь лишь приведением заимствованной из этой работы табл. 12, которая отражает положение колчеданных месторождений.

Такие же закономерности установлены и для нерудных месторождений. В. В. Буканов, например, установил, что хрусталеносные месторождения на Приполярном Урале занимают интервал от 500 до 1200 м, причем самый насыщенный этаж составляет всего 350 м. К нижним частям этого интервала приурочены наиболее мощные и выдержанные по простираанию кварцевые жилы с крупными хрусталеносными гнездами; вверху преобладают однополостные жилы небольшого размера.

Закономерное по вертикали распределение минеральных

Таблица 12

## Размах колчеданного оруденения по вертикали

Провинция	Абсолютная отметка, м		Размах, км
	высшая	низшая	
Урал	+530	-1220	1,75
Алтай	+1700	-500	2,2
Кавказ	+3000	-150	3,1 (1,5*)
мезозой	+1900	+150	1,75
палеоген	+2700	+1200	1,5

\* Для доюрского времени.

месторождений отражает вертикальную минералогическую зональность и является следствием различных генетических факторов. Рассмотрим действие одного из таких факторов на распределение экзогенных месторождений самородной серы.

Залежи всех серных месторождений Ферганского сероносного района находятся в одном и том же гипсометрическом интервале (табл. 13), верхняя граница которого близка к отметке местного базиса эрозии, нижняя — несколько выше регионального базиса эрозии.

Нижняя граница осернения на Гаурдакском месторождении также не опускается ниже отметки регионального базиса эрозии, но верхняя располагается несколько выше местного базиса эрозии, контролирующего уровень подземных вод, так как со времени формирования месторождения произошел заметный врез эрозионной сети.

Подобное распределение гипсометрических интервалов наблюдается и на Роздольском месторождении в Предкарпатье. Подошва сероносного пласта здесь находится на отметках

Таблица 13

## Гипсометрические распределения серных месторождений в Ферганском сероносном районе

Месторождение	Абсолютная отметка, м		Абсолютная отметка регионального базиса эрозии, м
	высшая	низшая	
Шорсуйские:			
главное	650	410	350 (р. Сырдарья)
восточное	650	500	То же
Октябрьское	670	500	"
Чангырташское	800	650	500 (устье р. Карадарьи)

218—225 м и почти совпадает с отметкой уровня древнечетвертичного глубокого размыва одного из рукавов Палеоднестра (233 м).

В пределах северо-востока европейской части СССР региональным базисом эрозии, определяющим положение границы зон замедленного и весьма замедленного водообмена, является уровень моря, поэтому здесь возможны крупные серные месторождения, сформировавшиеся выше уровня моря, но ниже отметок местных базисов эрозии. И, действительно, серная залежь Дозмерского месторождения в бассейне р. Сев. Кельтмы лежит на отметках 38,7—45,5 м при абсолютных отметках поверхности земли 140—150 м.

Приведенные данные показывают, что во всех, сероносных районах продуктивным является гипсометрический интервал между отметками местного и регионального базисов эрозии. Это объясняется тем, что накопление самородной серы и формирование ее месторождений происходит в зоне смещения глубинных хлоридных щелочноземельно-натриевых рассолов с сульфатными инфильтрационными водами. Граница этой зоны, как правило, совпадает с границами гидродинамической зоны замедленной циркуляции, и неудивительно, что на всех молодых месторождениях серные залежи локализуются именно в пределах этой зоны. Но границы гидродинамических зон в значительной степени контролируются геоморфологическими факторами, и в первую очередь положением базиса эрозии. Например, граница между зонами замедленной и весьма замедленной циркуляции в пределах различных структур может опускаться на значительную глубину либо приближаться к поверхности земли, но она никогда не опускается ниже отметки регионального базиса эрозии. Нижняя граница зоны аэрации, а следовательно, верхняя граница зоны замедленного водообмена контролируется положением местного базиса эрозии. Приуроченность серных месторождений к определенной гидрохимической зоне — зоне замедленного водообмена, положение которой зависит от геоморфологического строения района, может оказать большую помощь в глубинных минералогических прогнозах и поисках серных месторождений.

Таким образом, метод сравнительной гипсометрии может успешно использоваться как один из вспомогательных методов стереотопоминаралогических исследований.

Другим важным вспомогательным приемом глубинных реконструкций является *учет минералогической зональности*.

Характер вертикальной зональности нетрудно предсказать для любого минералогического объекта исходя даже из общегеологических данных. Основными определяющими ее факторами являются: 1) структура геологического пространства, в котором происходит минералообразование; 2) гравитация; 3) структура термальных полей.

Так, в палеосолеродном бассейне после обнаружения выходов бишофитовой зоны с характерной для нее ассоциацией минералов (бишофит, бораты, карналлит, гексагидрид-тетрагидрат и др.), в соответствии с нормальной последовательностью выделения солей, мы вправе ожидать развитие в более глубоких горизонтах карналлитовой зоны, затем сильвинитовой, магниевых сульфатов, галитовой и гипс-ангидритовой зон. В палеогидротермальных системах, очевидно, относительно низкотемпературные фации будут сменяться с глубиной более высокотемпературными. В гравитационно-расслоенных интрузивах основного состава с глубиной будет увеличиваться содержание более тяжелых минералов (оливин, пирротин, халькопирит, пентландит) вплоть до формирования придонных, существенно оливиновых (пикритовых) и сульфидных горизонтов. В зонах окисления с глубиной можно ожидать последовательную смену минералов, соответствующую стадийности окисления, например для минералов железа: гидрогетит → ярозит → фиброферрит → мелантерит → пирит; для цинка: каламин → смитсонит → госларит → сфалерит и т. п.

На основе подобных закономерностей разработаны генеральные схемы вертикальной минералогической зональности различных минералогических регионов. Одной из первых таких схем была широко известная схема развития минералообразования вокруг магматического очага, предложенная в 1933 г. В. Эмонсом. В последнее время разработано довольно много детальных схем, с которыми можно познакомиться, например, в сборнике «Прогнозирование скрытого оруденения на основе зональности», 1976, а также в книге Д. В. Рундквиста и И. А. Неженского [45]. Эти генерализованные схемы отражают закономерный характер минеральных изменений на довольно большие глубины. Например, схема А. А. Фролова раскрывает зональность состава и строения в массивах ультраосновных — щелочных пород и карбонатитов (как вулканического, так и глубинного типа массивов) до глубин около 10 км. Генерализованные схемы вертикальной минералогической зональности представляют основу для довольно далеких стереогеологических интерпретаций.

На минеральных месторождениях, для которых установлены довольно детальные схемы вертикальной зональности, глубинные экстраполяции можно проводить более уверенно, но дальность экстраполяции, конечно, меньше. Примером конкретной, устойчиво выдерживающейся на всех месторождениях схемы вертикальной зональности является зональность (снизу вверх): пирит → сфалерит → сфалерит + галенит → галенит + + блеклые руды с Ag + барит → барит (в полиметаллических месторождениях, залегающих в карбонатных, карбонатно-алюмосиликатных породах и гранитоидах) или зональность: вольфрамит + молибденит + касситерит + арсенопирит + кассите-

рит + пирит + пирротин → касситерит → касситерит + пирит +  
+сфалерит → галенит + сфалерит → антимонит + киноварь (в  
сульфидно- и силикатно-касситеритовых месторождениях, свя-  
занных с гранитоидами).

Анализ особенностей вертикальной зональности минераль-  
ных месторождений показывает, что в большинстве типов вер-  
тикальная зональность подобна горизонтальной, но она, как  
правило, резко асимметрична, а кроме того, вертикальные зоны  
могут быть либо сильно сжаты, либо, наоборот, растянуты по  
сравнению с соответствующими горизонтальными зонами. Сле-  
довательно, даже не имея для изучаемого объекта типовой  
схемы вертикальной зональности, мы можем проводить глубин-  
ное прогнозирование, опираясь только на данные поверхност-  
ной топоминералогии.

Глубинность стереотопоминералогических исследований,  
даже с учетом прямой и косвенной экстраполяции, не превы-  
шает нескольких километров и лишь в отдельных случаях мо-  
жет достигать 10—15 км. Для более глубоких прогнозов при-  
ходится опираться на *данные геофизики* и на результаты ис-  
следований обломков глубинного вещества, вынесенного на  
поверхность в результате глубоководных магматических про-  
цессов. Так, например, создавались представления о минера-  
логии мантии и других геосфер.

В заключение еще раз подчеркнем, что стереоминерало-  
гия — одно из перспективных топоминералогических направле-  
ний, но развивается она пока в узколокальных вариантах (при  
изучении минеральных месторождений или даже отдельных  
рудных тел). В связи с этим важнейшая задача — распростра-  
нить стереоминералогические исследования и на региональную  
топоминералогию.

## ГЛАВА XI

### ТОПОМИНЕРАЛОГИЯ И МЕТАЛЛОГЕНИЯ. ТОПОМИНЕРАЛОГИЧЕСКОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ

Органическая взаимосвязь топоминералогии и металлогении  
уже приводилась нами в гл. I.

В современном представлении [3, 17, 48] металлогения\* —  
это наука о геологических условиях формирования и законо-

---

\* В последнее время все большую популярность приобретает термин «мине-  
рагенция» как синоним термина «металлогения» или как термин более широ-  
кого охвата. Это отражает расширение полей охвата металлогенических ис-  
следований и распространение металлогенических подходов и методов на  
нерудные полезные ископаемые, в том числе и на седиментогенные, а в ряде  
случаев и на горючие (уголь, нефть, газы и др.), не являющиеся даже мине-  
ралами в строгом понятии этого термина.

мерностях размещения во времени и в пространстве различных видов минерального сырья. Главная сущность металлогении в том, что она не только исследует месторождения полезных ископаемых, но и изучает их образование и развитие в ходе всей сложной истории геологического развития Земли, увязывает эволюцию рудообразования с эволюцией геологических событий. Генеральная цель металлогенических исследований — создание научной основы прогноза, поисков и оценки минеральных месторождений. Объектами металлогенических исследований являются рудоносные геологические комплексы, формации и другие подразделения различных масштабов — от отдельных рудных тел до металлогенических поясов [3], а что касается минерального вещества, то металлогения имеет дело главным образом с минералами, представляющими прямой или косвенный практический интерес. Взаимосвязь топоминералогии и металлогении определяется, таким образом, близостью решаемых ими задач и сходством главнейших методов исследования, а определенная специфика каждого из этих научных направлений отражает имеющиеся различия в объектах исследования.

По Л. Бауману и Г. Тишendorфу [3], металлогенический анализ синтезирует результаты геоструктурных исследований, получаемых геотектоникой, структурной геологией, геофизикой; данные о веществе, получаемые геохимией, минералогией, петрографией; геоисторические данные, получаемые исторической геологией, стратиграфией, геохронологией. Эти первичные данные, прежде чем войти в металлогеническую теорию, предварительно обобщаются и определенным образом преломляются в учении о месторождениях полезных ископаемых (синтез «структура — утилитарное вещество») и в учении о фациях (синтез «утилитарное вещество — время»).

Принимая за основу эту достаточно строгую и наглядную схему, обратим внимание на то обстоятельство, что науки о веществе вносят вклад в металлогению не только данными о диагностике вещества и о количественных соотношениях различных веществ в геологических объектах, но и данными о закономерностях образования и распределения различных природных веществ во времени и в пространстве (рис. 59). Последнее составляет главный смысл топоминералогии, если речь идет о минеральном веществе, о минералах, но это же составляет и содержание металлогении, концентрирующей внимание только на полезных минералах. Отсюда очевидно, что металлогения «вычленяет» из топоминералогии все утилитарное, т. е. топоминералогия составляет вещественное содержание металлогении. Металлогенические задачи — это частные топоминера-

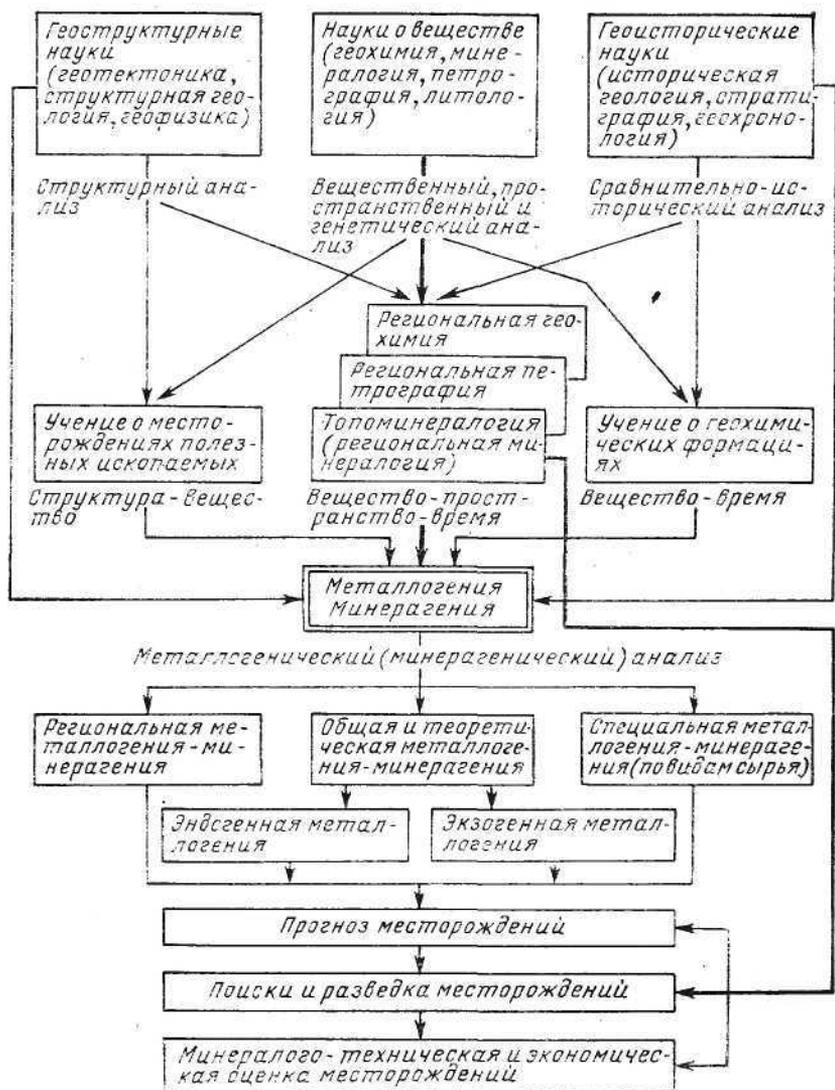


Рис. 59. Взаимосвязь топоминералогии и металлогении

логические задачи и решаются они наиболее эффективно в комплексе с задачами общими, топоминералогическими. История рудных минералов может быть познана только на фоне истории минералов нерудных, иначе минералоисторические реконструкции будут страдать большими пробелами, а выводы рискуют оказаться далекими от истины.

## **ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕТОДОВ ТОПОМИНЕРАЛОГИИ И МЕТАЛЛОГЕНИИ**

Взаимосвязь топоминералогии и металлогении наиболее эффективно может развиваться в трех направлениях — в формационном анализе, в анализе металлогенической специализации минеральных комплексов, в историко-эволюционном и регионально-металлогеническом анализе, составляющих методическую основу металлогенического исследования.

**Формационный анализ.** Задачей формационного анализа в металлогении является выделение рудных формаций, представляющих закономерные ассоциации минералов и обязательно включающих практически ценные минералы, сформировавшиеся в определенных геологических условиях. Рудная формация, следовательно, частный случай минеральной формации, понятие о которой было дано в гл. VII. Методическая основа выделения формаций одна и та же: установление закономерных сообществ минералов, выяснение пространственно-временных взаимосвязей между минералами, определение генетической природы связей. Более естествен, следовательно, такой подход, когда изучается вся совокупность минеральных ассоциаций, составляющих объект металлогенического исследования, а уж затем из нее вычленяются и более целеустремленно анализируются ассоциации, содержащие промышленно ценные минералы. Анализ рудных формаций целесообразно проводить как заключительную стадию общего топоминералогического формационного анализа.

**Анализ металлогенической специализации минеральных комплексов.** Формирование того или иного минерального месторождения, как известно, процесс закономерный в сложной и длительной цепи геологических событий, составляющих геологическую историю развития крупных структурно-вещественных элементов земной коры. Формирование сульфидных кобальт-медно-никелевых залежей норильского типа, например, следствие докристаллизационной и кристаллизационной дифференциации толеитовой магмы определенного типа, и месторождения эти пространственно и генетически связаны с определенными комплексами базальтоидов. Залежи самородной серы формируются путем метасоматической переработки углеродсодержащими высокотемпературными росолами (так называемыми «нефтяными водами») сульфатных пород, залегающих на контакте или переслаивающихся с карбонатными, поэтому серные залежи всегда связаны с сульфатно-карбонатными осадочными комплексами и залежами нефти и газа. Наличие таких взаимосвязей составляет основу широко используемого в металлогении понятия о металлогенической специализации различных геологических объектов (по-

род, формаций, структур и т. д.), в том числе и минеральных комплексов.

Под металлогенической специализацией геологических объектов понимается вся совокупность признаков (геохимических, минералогических, петрографических, структурно-тектонических, геофизических и др.), устанавливающих пространственные и генетические связи с ними месторождений полезных ископаемых и позволяющих прогнозировать возможность формирования определенных типов рудной минерализации. Анализ металлогенической специализации может строиться, следовательно, на вещественной, структурной и геологической основе.

Минералогический подход к определению металлогенической специализации заключается: 1) в выделении комплексов, которые могли бы играть в процессе их развития рудогенерирующую роль, и 2) в анализе минералогических признаков, устанавливающих металлогеническую специализацию этих комплексов.

Первая задача решается или синтезом результатов формационного анализа (т. е. объединением генетически родственных формаций в минеральные комплексы и определением положения этих комплексов в геологическом пространстве), или путем минералогического анализа геологического строения региона. В металлогенических построениях обычно рассматриваются магматогенные, метаморфогенные, седиментогенные, гипергенные минеральные комплексы различного масштаба.

Вторая задача решается на основе изучения минералогических критериев рудоносности, устанавливаемых либо эмпирически из опыта изучения таких же минеральных комплексов, либо путем анализа истории развития этих комплексов. Для уже упоминавшегося примера рудоносных интрузивов норильского типа минералогическими критериями рудоносности являются: наличие в пикритовых горизонтах габбро-долеритовых дифференцированных интрузивов ультраосновной ассоциации минералов (маложелезистый оливин, орто- и клинопироксены, высокоосновной плагиоклаз, хромит), асимметричное распределение оливина по разрезу интрузий с накоплением его в приподожвених горизонтах, содержание в оливине фаялитового компонента (около 25 %) и повышение содержания хрома и никеля, битовнит-анортитовый состав ранних плагиоклазов, полипироксеновость пород, высококонтрастная цветовая зональность клинопироксенов, высокие содержания в пироксенах алюминия, хрома, кальция, магния, появление хромшпинелидов и др. Многие из этих признаков, а также ряд дополнительных используются для определения медно-никелевой специализации дифференцированных рудоносных интрузий на Центральном Пай-Хое [61]. Металлогеническая специализация гранитоидов в настоящее время довольно уверенно устанавливается по комплексу аксессуарных минералов и их типоморф-

ным особенностям, а также по типоморфизму породообразующих минералов, особенно по составу элементов-примесей [8].

Задачу большой важности представляют поиски путей не только качественной, но и количественной оценки металлогенической специализации минеральных комплексов. Задача эта в принципе разрешима. Например, при изучении редкометальной минерализации одного из регионов была установлена ее связь с гранитоидами и доказано, что редкометальные месторождения формируются в результате мобилизации редких элементов из породообразующих минералов в процессе вариссийской гидротермально-метасоматической переработки гранитоидов. Расчет поминерального баланса редких элементов и анализ динамики их мобилизации и реконцентрации позволяют определить потенциальную рудогенерирующую возможность типичного гранитоидного массива объемом 200—300 км<sup>3</sup>, специализированного на редкометальную минерализацию в 2—2,5 млн. т по вольфраму, 2,5—15 млн. т — по молибдену, 9—14 млн. т — по олову и в 0,09—2,6 млн. т — по висмуту. К сожалению, попытки количественных оценок предпринимаются еще очень редко.

**Историко-эволюционный анализ.** Главной задачей историко-эволюционного анализа в металлогении является изучение истории и направленности рудообразования во времени и установление отрезков геологической истории, характеризующихся целым рядом событий, формирующих определенные типы месторождений полезных ископаемых. В результате для каждого региона устанавливаются главнейшие металлогенические эпохи, расчленяющиеся на более мелкие возрастные металлогенические подразделения (этапы, стадии, фазы и т. д.), определяется их металлогеническое и экономическое значение.

Характер взаимосвязи топоминералогии и металлогении при решении историко-эволюционных задач тот же, что и в формационном анализе: методами минералогии устанавливается общая историческая картина минералообразования, на которой металлогеническими методами более тщательно «прорисовываются» детали рудообразования. Наиболее эффективный методический подход заключается в построении пространственно-временных рядов минеральных формаций (см. гл. VII). Место рудных формаций в рядах минеральных формаций устанавливается вполне определенно, а поскольку минеральные формации всегда увязываются в более длинные возрастные цепочки, чем рудные формации, то такой двухступенчатый историко-эволюционный анализ позволяет точнее и надежнее увязать геологоструктурную эволюцию региона с эволюцией рудообразования. Такой подход применялся при металлогенических исследованиях в ряде регионов северо-востока европейской части СССР.

Регионально-металлогенический анализ. Смысл его заключается в установлении пространственных закономерностей формирования и размещения месторождений полезных ископаемых и в металлогеническом районировании изучаемой площади (выделение региональных структурно-металлогенических подразделений различного масштаба рудных полей, районов, металлогенических зон, провинций, поясов, характеризующихся общностью геологического развития и формированием определенных типов минеральных месторождений). Металлогеническое районирование, так же как и топоминералогическое (см. гл. IV), проводится не только на вещественной, но и на структурно-геологической основе, объемы и границы соответствующих региональных подразделений могут не совпадать: металлогеническая провинция, например, шире провинции минералогической и скорее соответствует объему суперпровинции или минералогического пояса. При детальном исследовании различия сглаживаются и задачи и методы региональной металлогении и региональной минералогии сближаются.-

#### **МИНЕРАЛОГИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ НА МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКИХ КАРТАХ**

Результаты металлогенических исследований и металлогенического анализа синтезируются путем создания металлогенических карт. Существующие методические разработки [39] предусматривают широкое отражение на этих картах минералогических данных и их использование для пространственных металлогенических построений, однако в практике картосоставления топоминералогия учитывается весьма ограниченно. При требуемом органическом сочетании структурного и вещественного принципов явное предпочтение, особенно в отечественной металлогении, отдается структурному.

На подавляющем большинстве карт вещественная информация ограничивается нанесением месторождений полезных ископаемых условными знаками, отражающими вид полезного ископаемого (причем чаще не в минеральной, а в элементарной форме: железо, медь, титан и т. д.), генетический тип (магматический, пегматитовый, гидротермальный, осадочный и т. д.), масштаб оруденения. В лучшем случае указывается формационный тип месторождений по ведущим минералам (колчеданно-полиметаллический, гематит-сидеритовый и др.). Иногда отмечается возраст минерализации, как правило геологический. На крупномасштабных картах могут вырисовываться первичные и вторичные минеральные ореолы, минеральные типы наложенных изменений (эндогенных и экзогенных), места находок отдельных минералов.

Минералогическая информация на металлогенических картах кроме скудости страдает низкой достоверностью и отсутствием данных для оценки степени достоверности. Это связано в первую очередь со стремлением отражать не саму минералогическую информацию, а ее генетическую интерпретацию,\* и металлогенические карты содержат зачастую не столько фактический материал, сколько генетические концепции их составителей. Поэтому одни и те же месторождения железа, например, на одних картах обозначаются магматическими, на других — контактово-метасоматическими, а установить, что из этого верно, без знакомства с дополнительными материалами нельзя. Полезнее было бы показать минеральный состав, по которому можно уверенно судить о генетической природе.

Проведенный нами анализ большого числа металлогенических карт, составленных металлогеническими школами разных стран, показал, что наиболее оптимальным является отражение на них следующей вещественной (минералогической) информации.

1. Распространение главных типов минеральных комплексов, вмещающих полезные ископаемые. Показывается цветными полями, в случае необходимости с дополнительной штриховкой, отражающей те или иные особенности локализации оруденения; индексами указывается возраст комплексов. Минеральные комплексы можно картировать, опосредствуя их через литологические, литолого-стратиграфические или формационные категории (например, известняки, гранитоиды, черносланцевые и карбонатные формации и т. п.). По существу, это «овеществленный» геологический фон металлогенической карты.

2. Главный или главные полезные компоненты минералопроявлений и минеральных месторождений. Показываются цветом значка в обобщенном виде (полиметаллы или Pb, Zn, F, Ba — синий цвет, редкие металлы или Sn, W, Mo — красный цвет и т. п.), или для каждого вида минерального сырья дается отдельный оттенок окраски и знаки могут быть многоцветными. Второй способ излишне загружает карту и затрудняет ее восприятие. Кроме того, такая детализация излишняя, так как вид минерального сырья конкретизируется буквенной индексацией (см. п. 4).

3. Морфогенетические или формационные типы минералопроявлений и минеральных месторождений. Изображаются формой значка, например месторождения, связанные с магматическими породами (магматические и позднемагматические), — изометричными значками (гранит с касситеритом — половинкой круга, ниобиеносный карбонатит — звездочкой, пегматит — квадратиком и т. п.), жильные месторождения — сильно удлинненными прямоугольниками, стратиформные — линзочками, пластовые седиментогенные — сильно уплощенными линзочками и т. д. Выбирая форму значка, необходимо стре-

миться, чтобы в ней отражалась каким-то образом наиболее характерная черта данного типа месторождения. Значки должны быть замкнутыми и иметь внутреннее поле для введения информации по п. 2 путем раскраски. При типизации месторождений наиболее ответственной задачей является выбор классификационных критериев. По возможности надо избегать формальных генетических типизации, а стремиться использовать такие структурные или вещественные критерии, которые бы объективно отражали генетическую природу месторождений.

4. Минеральный состав месторождений. Отражается различного рода символами, сопряженными с условным знаком месторождения, при этом широко используется минералогическая аббревиатура. Необходимо показывать не только главные рудные, но и нерудные минералы. Наиболее предпочтительна одноступенчатая кодировка, когда состав выписывается аббревиатурой непосредственно около условного значка на карте, например *Gal + Sph + Chalc + Tet + Fl + Bar + Q + Car* (т. е. галенит + сфалерит + халькопирит + тетраэдрит + флюорит + барит + кварц + карбонаты) или *Mt + Pyr + Hem + Bou + Q + Bar* (т. е. магнетит + пирит + гематит + бурнонит + кварц + барит) и т. п. Конечно, такой путь чаще всего нереален, так как столь длинные ряды просто не поместятся на карту, поэтому приходится прибегать к многократной перекодировке. Обычно пользуются двумя способами. Первый способ — около значка ставятся химические символы элементов, определяющие промышленную ценность месторождений (для первого приведенного выше примера в зависимости от количественного соотношения минералов можно указать символы *Pb—F* или *Pb—Ba*, для второго — *Fe*), а минеральная расшифровка дается в зарамочной легенде. Второй способ — минеральный состав кодируется номерами, раскрываемыми в легенде.

5. Масштаб минерализации, относительные запасы сырья. Отражаются величиной условного знака.

6. Поля распространения определенных типов минерализации (металлогенические провинции, зоны, формации и т. д.). Оконтуриваются сплошными, прерывистыми или фигурными линиями, черными или цветными. Фактура контуров несет вещественную, генетическую, возрастную или экономическую информацию. Дополнительные данные могут вноситься штриховкой полей. Однако это усложняет карту.

7. Минералогенетическая информация. В ряде случаев на металлогенических картах полезно отражать данные о термодинамических параметрах формирования месторождений, химизме растворов, факторных нагрузках и другой минералогенетической информации, если она раскрывает определенные пространственные закономерности минералообразования (например, декорирует зональность, определяет источники и транс-

сирует пути движения рудоносных растворов, реставрирует развитие метаморфизма и т. п.), имеющие важное прогнозное значение. Г. Б. Наумов, например, составил объемную карту содержания  $\text{CO}_2$  в газовой-жидких включениях в минералах одного из месторождений, отчетливо показывающую дренирующую роль разломов. А режимом  $\text{CO}_2$ , как известно, определяется характер рудообразования.

Примерами изданных металлогенических карт, на которых в достаточно полной степени использованы топоминералогические данные и которые несут богатую информацию о минеральном веществе, являются металлогеническая карта Вогез и Шварцвальда масштаба 1:400 000 [62], карта Чехословакии масштаба 1 : 1 000 000 и др.

### **ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РУДОНОСНОСТИ И ПРОГНОЗНЫЕ КАРТЫ**

В число важнейших функций топоминералогических исследований наряду с выяснением минералогической структуры и генетической природы изучаемых геологических объектов входит и топоминералогическое прогнозирование. Оно включает предсказание на основе установленных закономерностей не наблюдаемых, но вероятных новых минералогических явлений, включая их предполагаемую количественную оценку и пространственно-временную геологическую привязку.

Цели топоминералогического прогнозирования весьма многообразны. Это и определение областей и зон развития тех или иных минеральных комплексов, формаций, минеральных видов, предсказание новых парагенезисов, новых генетических типов минерализации, предсказание новых минералов и т. п. Однако основное значение и наибольшее применение имеет минерально-сырьевое прогнозирование новых рудоносных площадей и месторождений полезных ископаемых. В решении этой задачи особенно тесно объединяются цели топоминералогии, металлогении и поисковой минералогии. По прогнозированию полезных ископаемых существует обширная теоретическая и методическая литература, поэтому здесь мы остановимся лишь на главных направлениях использования топоминералогических данных в металлогеническом прогнозе.

Наиболее широко используются следующие методические приемы топоминералогического прогнозирования.

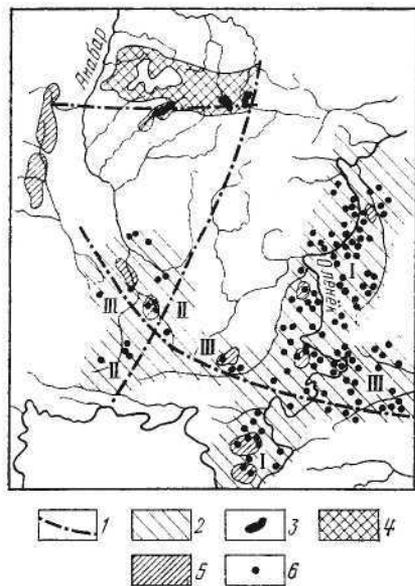
Интерполяция и экстраполяция топоминералогических данных или закономерностей. Это наиболее обычный и надежный прием прогнозирования, базирующийся на древнем рудознатском принципе: «Ищи руду около руды». Опираясь на результаты наблюдений, минералог всегда может с известной долей уверенности объединять отдельные выходы тех или иных минеральных комплексов (в том числе и рудоносных) в минеральные поля или определять при-

мерные границы минеральных тел по их фрагментам. В приложении к рудоносным комплексам именно так и проводится прогнозирование: очерчиваются площади наиболее вероятного распространения минерализации; причем плотность опорных точек с известной минерализацией, между которыми осуществляется интерполяция или от которых экстраполируется информация, является критерием надежности прогноза.

Использование минералогической зональности. Способ не менее популярный в прогнозировании [45] и не требует особых пояснений. Если пространственное распределение минеральных комплексов в исследуемом регионе зональное и общая картина этой зональности установлена более или менее определенно, то перспективные площади развития продуктивных комплексов должны вырисовываться как элементы этой общей минералогической зональности. Сравнивая установленную топоминералогическим исследованием зональность со статистической или теоретической, можно предсказать наличие новых, ненаблюдавшихся зон. Например, если установлен ряд зональности  $\text{пирит} \rightarrow \text{халькопирит} \rightarrow \text{сфалерит} \rightarrow \text{галенит}$ , то можно уверенно утверждать, что он не завершен и прогнозировать с высокой вероятностью наличие внешних баритовой и флюоритовой зон и с меньшей вероятностью — зоны блеклых руд с серебром или золотом между ними и галенитовой зоной. Примеры открытия новых месторождений на основе анализа минералогической зональности весьма многочисленны [45, 49, 61].

Анализ рудоконтролирующих факторов. Составляет методическую основу прогнозирования месторождений полезных ископаемых, а для ряда районов с неустановленным оруденением, где прогноз осуществляется на основе аналогий, этот способ является чуть ли не единственным. Смысл его состоит в том, что в результате металлогенических исследований устанавливаются главнейшие рудоконтролирующие и рудо локализирующие факторы (структурно-тектонические, стратиграфические, литолого-петрографические, магматические, геофизические и т. д.) и определяется относительное значение каждого из этих факторов. Процесс прогнозирования заключается в выделении участков с наиболее благоприятным сочетанием рудоконтролирующих факторов, которые и рассматриваются как перспективные. Степень перспективности оценивается по соотношению факторов различной значимости, на основе чего выделяются площади весьма перспективные, перспективные, малоперспективные, неперспективные и т. п.

Минералогические рудоконтролирующие факторы в чистом виде анализируются редко, так как установление их трудоемко, действие статично и даже неявно, часто «смазывается» другими факторами. Минералогическая информация поэтому используется при анализе рудоконтролирующих факторов обычно



**Рис. 60. Зоны разрывных нарушений, выделенных по минералогическим данным:**

1 — глубинные разломы, выделенные по геологическим и геофизическим данным; 2 — зоны разрывных нарушений, выделенные по распространению в шлихах жильных минералов (I—III номера зон); 3 — площади распространения ураганной содержания лимонита и пирита (более 90 % от массы тяжелой фракции); 4 — площади распространения повышенных содержания лимонита и пирита в шлихах (более 10—15 % от массы тяжелой фракции); 5 — поля развития кимберлитов; 6 — места находок жильных минералов в шлихах

в опосредствованном виде как компонент факторов литолого-петрографических, магматических или метаморфических и даже структурно-тектонических. Минералогические данные позволяют отличать непродуктивные магматические комплексы от продуктивных, на их основе выделяются фации регионального метаморфизма и устанавливаются зоны локального метаморфизма и околорудных изменений; по характеру наложений минерализации — зоны рудоконтролирующих разломов. Крупные рудоконтролирующие зоны разрывных нарушений прорисовываются даже на шлиховых минералогических картах (рис. 60).

Использование минералов-индикаторов и других минералогических индикаторов рудоносности. Эмпирически и аналитически установлено большое число самых разнообразных минералогических признаков, прямо или косвенно указывающих на возможность обнаружения месторождений полезных ископаемых. Они известны как индикаторы

рудоносности [8]. Это могут быть и сами рудные минералы из первичного ореола, нерудные минералы рудного парагенезиса, распространенные гораздо шире, чем рудный минерал, особенности состава и свойств так называемых «сквозных» минералов, определенным образом изменяющиеся в различных ассоциациях и т. д. Например, рудный кварц всегда содержит в повышенных количествах примесные элементы, отражающие состав парагенных ему рудных и нерудных минералов, и, если топоминералогическими исследованиями выявляются такие «рудные» аномалии состава кварца, их можно рассматривать как перспективные площади. Иногда содержание примесей даже в аномальном кварце ниже порога чувствительности химико-аналитических методов. В этих случаях аномальность устанавливается по физическим эффектам, весьма

чувствительным к вхождению в структуру даже отдельных атомов примесного элемента. Так, золоторудный кварц довольно хорошо дифференцируется от молибденорудного по спектрам ЭПР, поскольку повышение содержания золота приводит к увеличению интенсивности центров  $O^{\sim}(Al)$ , а радиационное воздействие калия — к образованию центров  $O^{-3}$ . Не менее чувствительными индикаторами рудоносности являются кальцит, полевые шпаты, слюды и многие другие минералы.

Подробнее анализ роли минералогических индикаторов при поисках и оценке минеральных месторождений будет рассмотрен в гл. XII; здесь лишь отметим, что в числе других прогнозных критериев эти индикаторы широко используются на стадии прогнозирования.

Как свидетельствуют данные этого небольшого обзора, минералогические критерии имеют весьма важное прогнозное значение, и их применение в комплексе с другими критериями существенно повышает достоверность прогноза. Более того, прогнозирование очень многих видов минерального сырья (например, алмазов, кварцевого и кальцитового кристаллосырья, редкометалльных и редкоземельных месторождений метасоматических типов, россыпных месторождений и многих других) невозможно без минералогической информации, и минералогические критерии в этих случаях рассматриваются как ведущие.

Окончательным документом, синтезирующим все результаты прогнозных операций, являются прогнозные карты на отдельные виды полезных ископаемых или комплексная прогнозная карта региона на все возможные в нем полезные ископаемые. Детальность и достоверность прогнозных карт зависят от представительности материала, использованного при прогнозировании, от того, какие критерии использовались при прогнозировании, — ведь прогнозные карты можно строить на основе анализа как одного-двух критериев рудоносности, так и всего весьма разнообразного комплекса данных. Конечно, комплексное использование всех данных существенно повышает достоверность прогнозирования, но и требует очень больших трудовых и материальных затрат, а общее повышение эффективности при этом часто оказывается незначительным. Поэтому наряду с комплексными металлогеническими прогнозными картами в геологической практике большой популярностью пользуются специальные прогнозные карты, построенные на основе анализа отдельных критериев, и среди них — карты минералогического прогнозирования.

Прогнозные карты, построенные на топоминералогической основе, так же как и другие, характеризуются разной детальностью. Наиболее обычны карты, составленные по какому-то одному рудоиндикаторному признаку. Так, А. А. Бабаджанов использовал для составления карт прогноза на скрытое оруждение в районе одного из вольфрамowych месторождений

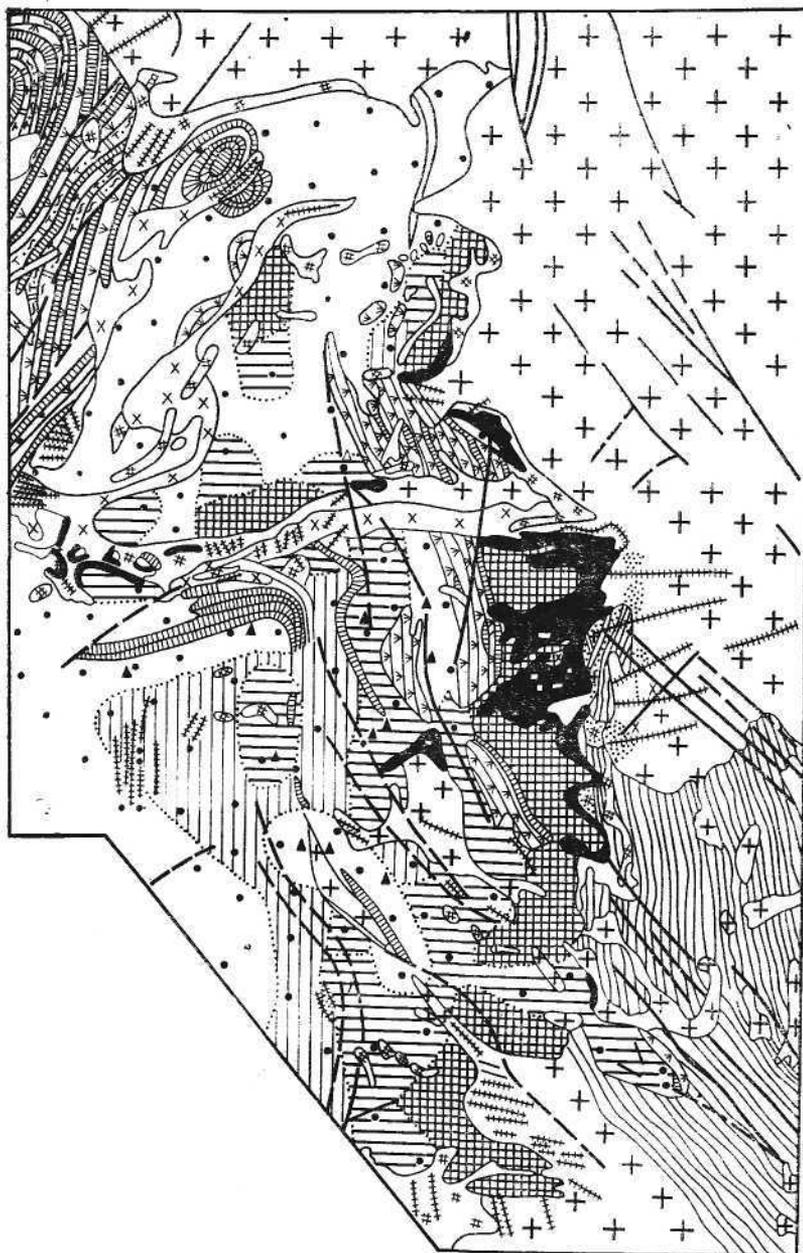
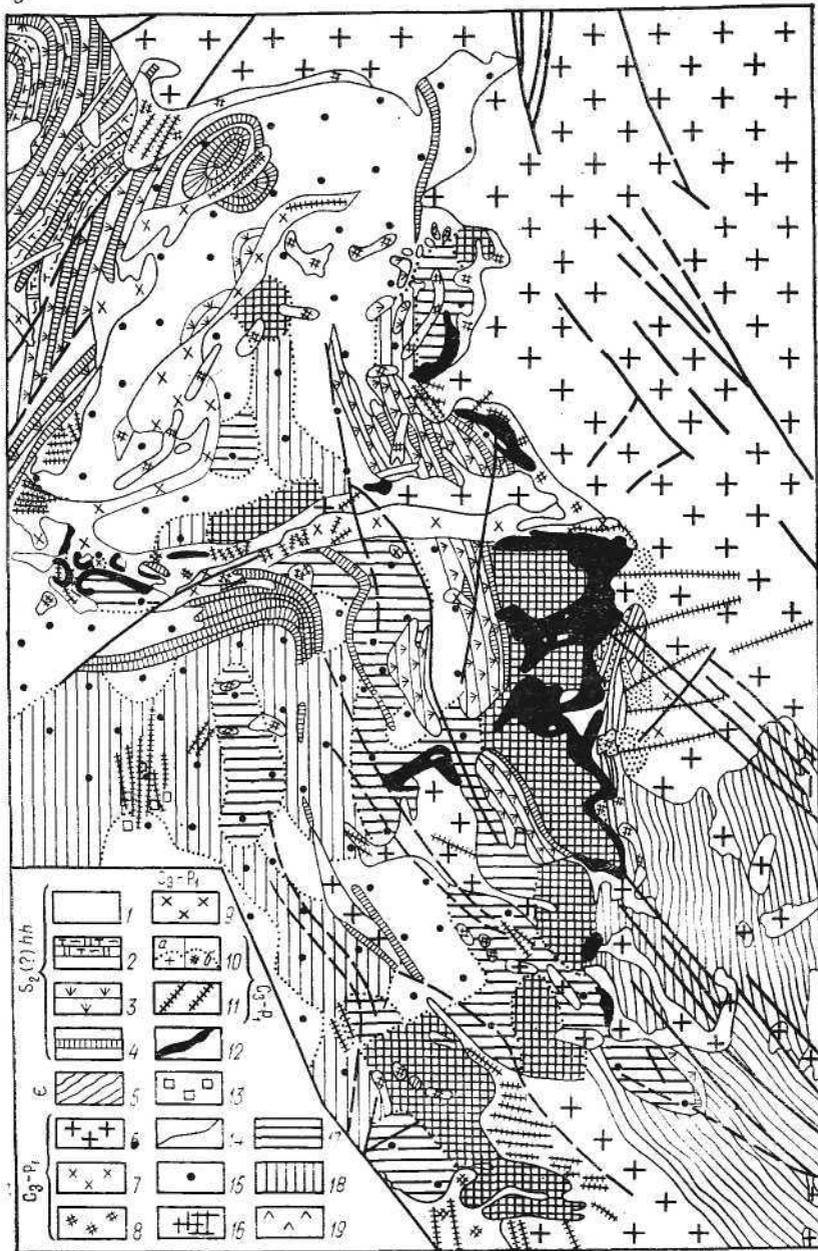


Рис. 61. Прогнозные карты месторождения Лянгар на скрытое оруденение.

*a* — по термолюминесценции кальцита контактовых мраморов; *б* — по декрепитационным  
 1 — контактовые мраморы; 2 — мраморы битуминозные с вкрапленностью силикатных  
 вики известково-силикатовые; 5 — ороговикованные слюдястые сланцы; 6 — граниты  
 ниты; 10 — граниты биотитовые (*a*) и лейкократовые (*б*), измененные с сульфидами; 11 —  
 14 — номера скважин; 15 — номера проб; 16 — наиболее перспективные участки на скры-  
 бесперспективные



По А. А. Бабаджанову.

свойствам кальцита; минералов и пропластками роговиков; 3 — роговики пироксено-полевошпатовые; 4 — рогобиотитовые; 7 — диориты и кварцевые диориты; 8 — граниты лейкократовые; 9 — апограв кварцевые жилы и прожилки; 12 — скарново-рудные тела; 13 — разрывные нарушения; тое редкометальное оруденение; 17 — перспективные; 18 — менее перспективные; 19 —

в Узбекистане, результаты изучения термолюминесценции и декрептоактивности кальцита контактовых мраморов. Эти свойства, как оказалось, являются довольно хорошими индикаторами вольфрамового оруденения, и на составленных по ним прогнозных картах (рис. 61) положение и конфигурация перспективных площадей почти точно совпадают.

Результатом наших топоминералогических исследований в Пайхойско-Южновоземельской провинции [61] явилось составление главным образом на основе минералогической информации целого комплекса прогнозных карт на медь, полиметаллы и другое сульфидное оруденение; на флюорит, барит, целестин и другие виды полезных ископаемых. Эти материалы позволили дать общую перспективную минерально-сырьевую оценку региона и послужили основой для открытия целого ряда перспективных рудоносных площадей.

Таким образом, возможны и успешно реализуются в геолого-поисковой практике два пути использования топоминералогических данных в прогнозировании полезных ископаемых, которые отражаются следующей схемой:



Первый путь — это прямое минералогическое прогнозирование, базирующееся главным образом на топоминералогических данных, но, естественно, учитывающее и конкретную геологическую обстановку. Результаты топоминералогического прогнозирования в обобщенном виде могут учитываться при составлении комплексных прогнозных карт. Второй путь — использование первичных топоминералогических данных в комплексе с другими геологическими данными в металлогеническом анализе и составлении прогнозных металлогенических карт.

Прогнозные карты в отличие от карт топоминералогических кроме геолого-минералогической информации, несут и большую экономическую нагрузку. Экономическими показателями являются бортовое содержание полезного компонента, прогнозные запасы и их стоимость, горнотехнические условия. Все они зависят от конкретной экономической конъюнктуры и поэтому весьма динамичны. Кроме того экономические компоненты прогноза резко изменяются с повышением уровня общей геологической изученности. Прогнозные карты, следовательно, операциональны, недолговечны, требуют непрерывного пересо-

ставления. Отсюда становится очевидной актуальность перехода на машинное прогнозирование, которое обеспечит выполнение и другого современного требования к прогнозированию — переход на количественную основу.

## ГЛАВА XII

### МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ ПОИСКИ

Наиболее важными и ответственными практическими функциями топоминералогии являются создание научной основы и разработка методики минералогических поисков и оценки месторождений полезных ископаемых.

Минералогические критерии начали использоваться как поисковые в глубокой древности. Они стали тем «ядром», на котором сформировалось современное учение о поисках минеральных месторождений и отработалась поисково-разведочная практика. Едва человек выделил из серого и, казалось бы, однообразного мира камня первые минералы, привлекая внимание какими-то своими особенностями и необычными свойствами, и приспособил их для удовлетворения своих нужд, сделал их полезными, ценными — перед ним сразу же встала задача розыска и сбора этих минералов. Как считают археологи и минералоги, это произошло еще в каменном веке, и первыми, освоенными человеком минералами были нефрит, жадеит, серпентин, горный хрусталь, кальцит, янтарь, асбест. Находки золота, самородной меди, самородного серебра, метеоритного железа, которые шли в употребление в натуральном виде, открыли путь к освоению металлов и обеспечили переход человечества в медно-каменный и бронзовый век. Затем с изобретением простейших технологических приемов выплавления металлов и с расширением знаний о мире камня к этим минералам добавлялись халькопирит, халькозин, куприт, борнит, галенит, стибнит, касситерит, магнетит, гидрогетит, киноварь, а также рубин, аметист, сердолик, агат, малахит, изумруд, гранаты, ляпис-лазурь и др. К средним векам человечество пришло со знаниями по крайней мере более чем о сотне минералов.

Первые поиски минералов велись от находки к находке. Древний камнеискатель, поднявший, к примеру, кусок самородного металла, приковавший к себе взгляд удивительным цветом, неправильно округлой мягкой формой, ноздреватой поверхностью, а затем поразивший необычной тяжестью, методично выискивал потом именно по этим признакам такие же куски, расширяя поле поисков во все стороны от места первой находки. Он замечал места, где куски металла встречаются

чаще, отделял их от площадей, где поиски бесполезны и постепенно «нащупывал» месторождение, где в дальнейшем и добывал металл.

Так зародился главный метод минералогических поисков — обломочо-валунный. Он и сейчас в своей методической основе тот же, каким пользовался древний камнеискатель, только расширился и конкретизировался спектр диагностических признаков минералов; под стихийный поиск подведена теоретическая основа в виде учения об ореолах механического рассеяния, да текстовая и картографическая документация упорядочила стихийный азарт поисковых метаний.

Очень быстро человек научился в дополнение к прямым находкам рудных обломков использовать для поисков минералы-спутники, рудоиндикаторные свойства минералов, различные явления, генетически связанные с рудообразованием или разрушением месторождений. Кай Плиний (23—79 г. н. э.) в своей знаменитой «Истории природы» пишет о каком-то камне «сегуллуме», являющемся указателем золота при его поисках. В минералогическом трактате Бируни (1048 г.) минералам, как поисковым индикаторам, уделяется уже достаточно много внимания: гранат рассматривался как поисковый признак яхонта, гематит на поверхности — как признак наличия золота на глубине и т. д. В труде Г. Агриколы «О горном деле и металлургии» (1556 г.), представляющем собой свод горно-геологических знаний средневековья, перечисляются довольно многочисленные минералогические поисковые признаки и определяются особенности их использования при поисках. Особенно большое внимание уделяется минералам зоны окисления; например, находки хризоколы, горной сини и других вторичных минералов меди указываются как надежный признак залегания под ними медных руд. Знакомство с подземными горными выработками на рудниках раннего средневековья, например на серебряных рудниках X—XI вв. Средней Азии, убеждает нас, что при их проводке к руде, особенно к «слепым» телам и к смещенным блокам, древние горняки уверенно руководствовались знаниями о рудоконтролирующих факторах, об около-рудных изменениях вмещающих пород, о зоне окисления руд и др.

В глубокой древности, очевидно в IV—V тысячелетии до н. э., при поисках минералов начали использоваться простейшие технические средства, причем это были закопушки, канавы, ямы, затем карьеры и подземные выработки. В Египте известны медные рудники, возраст которых уверенно датируется III тысячелетием до н. э. Огромные древние выработки с орудиями труда, датированными в 4—5 тыс. лет, были обнаружены на некоторых золоторудных месторождениях Армении. Очень рано для поисков тяжелых минералов стала применяться промывка рыхлых отложений, приведшая к развитию

шлихового метода поисков. Уже Плиний дает вполне квалифицированные сведения о промывке песков при поисках золота и касситерита и о сборе тяжелого осадка шлиха для заключения о «достоинстве» россыпей. Им же приводятся многочисленные данные о различных приемах технологических испытаний методами окислительных и восстановительных плавок и др.

Минералогические методы, следовательно, всегда имели ведущее значение при поисках минералов и руд, но начали оформляться как научный метод сравнительно недавно. Вначале, вплоть до конца средневековья, они составляли совокупность передававшихся из поколения в поколение приемов в стихийной системе рудознательства и рудокопного ремесла. В эпоху Возрождения, с XV—XVI вв., минералогические поиски превращаются уже в методически вполне определенный компонент горного дела и горной науки, в чем убеждают, например, труды Г. Агриколы. В XIX в. с началом систематического геологического исследования поверхности земли и с созданием методов геологического картирования были заложены основы поисковой теории и методы поисков полезных ископаемых оформились в самостоятельную отрасль геологического знания и геологической практики, особенно продуктивно развивающуюся в наше время. Среди всего комплекса поисковых методов методы минералогические выступают как наиболее хорошо разработанные. Среди них особенно выделяется шлиховой метод, который благодаря широкому применению при поисках золота, платины, олова достигает высокого совершенства. Этому способствуют успехи всех геологических наук, особенно геоморфологии, позволившие резко повысить достоверность интерпретации шлиховых ореолов.

В 40-х годах в печати появляются монографии и руководства по поискам полезных ископаемых З. С. Домарева, Р. Пиля, Н. И. Трушкова, И. В. Андерсона, М. В. Борневича и многих других, в которых уделяется большое внимание минералогическим поисковым методам, однако самостоятельно они не выделяются. В 1940 г. А. Е. Ферсман [55] впервые обобщил представления о минералогических поисках в книге «Геохимические и минералогические методы поисков полезных ископаемых» и попытался дать им научную основу через понятия о минералогических поисковых признаках, типоморфизме минералов, парагенезисе минералов, о первичных и вторичных ореолах рассеяния. В комплекс поисковых задач как одна из основных включается задача топоминералогического описания района поисков.

В более поздних работах по поискам месторождений полезных ископаемых [22] развитию минералогических методов не уделяется должное внимание, они излагаются так же, как в ферсмановский и даже доферсмановский период. Исключение составляет книга В. В. Аристовой [1] и некоторые другие, где

развиваются представления о минералогических поисковых критериях, минералогических полях и минералогических аномалиях, об интерпретации минералогических аномалий и др.

В современной поисково-разведочной практике минералогические методы занимают неоправданно скромное место. Они оказались в тени энергично вошедших в нее в начале нашего века и быстро завоевавших широкую популярность новых методов геофизики и геохимии. На развитии и внедрении этих новых методов оказалось сосредоточенным все внимание поисковиков, и слабо прогрессирующие в методическом отношении минералогические поиски стали терять свою самостоятельность. Только резкое увеличение, начиная с 50—60-х годов, поисковых работ на алмазы, благородные, тяжелые и редкие металлы, редкоземельные элементы, кристаллосырье, драгоценные и поделочные камни вернули им утраченное значение. Сейчас многие минералоги заняты разработкой научных основ и методологии минералогических поисков [8]. Минералогические методы эффективно применяются не только как инструмент прямых поисков минерального сырья, но и при расшифровке природы геохимических и геофизических аномалий, оценке открытых рудопроявлений, переоценке перспектив разрабатываемых месторождений. Они начинают приобретать универсальное значение. Серьезным недостатком, ограничивающим практическое применение минералогических методов, является отсутствие теоретико-методических обобщений.

## **ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПОИСКОВО-ОЦЕНОЧНОЙ МИНЕРАЛОГИИ**

*Месторождения полезных ископаемых, являющиеся объектами минералогических поисков, представлены одним или несколькими рудными телами различной формы и размеров.*

Рудные тела, как правило, не имеют естественных границ и относятся скорее к категориям экономическим, чем природным. Они оконтуриваются горно-экономическими границами (минимальное промышленное содержание полезного минерала и минимальная мощность), положение которых с изменением экономических или горнотехнических условий может изменяться. *Рудное тело, следовательно, это часть естественного минерального тела или совокупности минеральных тел, представляющая промышленную ценность при данной экономической конъюнктуре.* Рудным телом может быть часть пласта, часть жилы или жильного поля, часть магматического тела, и т. п., а рудный комплекс является частью минерального комплекса. В отдельных случаях границы тех и других могут, конечно, совпадать.

Несмотря на то что понятия «рудное тело» и «минеральное тело» строго не отождествимы, между ними существуют тесные корреляции, обусловленные общностью вещества, структуры,

пространственного положения. Форма и размеры рудных тел также в значительной степени определяются формой и размерами соответствующих минеральных тел. *Можно с определенными ограничениями рассматривать рудные тела как эквиваленты минеральных тел*, условно расширяя их экономические границы до естественных границ минеральных тел. *Поиски месторождений полезных ископаемых при таких допущениях — это поиски минеральных тел, включающих утилитарно ценные минералы в промышленных количествах.* Такой подход позволяет подвести под поисковую методику прочную геологическую основу и опираться на геологические закономерности, не потеряв при этом экономической сущности поисков. Поскольку любое минеральное тело представляет собой элемент топо-минералогической структуры поисковой площади, методику минералогических поисков должны определять общие и региональные топо-минералогические закономерности. Методы топо-минералогических исследований, в частности минералогического картирования, являются одновременно и методами минералогических поисков.

Формирование минеральных (и, следовательно, рудных) тел обязательно сопровождается определенными минералогическими явлениями в окружающем геологическом пространстве, прослеживающимися иногда на довольно значительном от них удалении.

Если тело сингенетично вмещающим породам (например, сильвинитовый пласт в осадках солеродного бассейна или сульфидная кобальт-медно-никелевая залежь в подошве дифференцированного основного интрузива), то его положение в разрезе определяется местом, которое занимает процесс рудообразования в закономерном ряду предшествовавших и последующих минералогенетических событий. Так, кристаллизации сильвинита в эвапоритовом бассейне в соответствии с его физико-химической эволюцией должна предшествовать кристаллизация сульфатов магния, еще ранее — галита, а на самых начальных стадиях — гипса и ангидрита. Под сильвинитовым пластом мы можем наблюдать, следовательно, зоны сульфидов магния, галитовую и гипс-ангидритовую. Сверху сильвинитовая зона должна сменяться карналлитовой и бишофитовой. Во втором примере с сульфидным стратифицированным горизонтом наблюдается почти всегда подрудная зона прожилково-вкрапленных руд, а над рудной зоной снизу вверх сменяющие друг друга зоны пикритовых габбро- и норит-долеритов, часто с сульфидами, оливиновых габбро и норит-долеритов, габбро-диоритов, такситовых долеритов, контактовых пород. Подобной зональностью контролируется положение и других сингенетичных вмещающим породам тел.

Если минеральное тело эпигенетично и сформировалось путем кристаллизации минералов в открытых полостях (тре-

щины, каверны, крупные пустоты) или путем замещения вмещающих пород, вокруг него, как правило, образуется ореол околорудных изменений. Этот ореол выражается в перекристаллизации пород, в формировании различных минеральных зон, связанных с оруденением, в развитии непромышленного оруденения. Обычно околорудные ореолы зональны, причем характер зональности специфичен для каждого генетического типа месторождений. Так, формирование гидротермальных месторождений в средних, кислых и щелочных породах сопровождается их альбитизацией, грейзенизацией, окварцеванием, хлоритизацией, серицитизацией, аргиллитизацией. В основных и ультраосновных породах околорудные изменения заключаются в пропитилитизации, лиственитизации, серпентинизации, отальковании.

В результате разрушения минеральных тел вокруг них могут складываться ореолы вторичного механического или химического рассеяния.

*Таким образом, закономерное положение минеральных тел в региональной минералогической зональности и наличие вокруг них сложных минералогических ореолов определяет возможность обнаружения этих тел на расстоянии по минералогическим поисковым признакам.*

Минералогическое прогнозирование и поиски месторождений полезных ископаемых осуществляются путем использования системы минералогических критериев рудоносности и минералогических поисковых признаков.

*Минералогические критерии (или предпосылки) рудоносности — это топоминералогические закономерности (или условия), контролирующее пространственное размещение минеральных тел.* Они указывают на возможность концентрации на тех или иных участках промышленно ценных минералов. В совокупности с геологическими (тектоническими, литологическими и др.) минералогические критерии используются главным образом для прогнозирования рудоносности и конкретизации поисковых площадей.

*Минералогические поисковые признаки — это минеральные ассоциации, отдельные минералы или особенности минералов, прямо или косвенно указывающие на наличие определенных минеральных тел.* В минералогической литературе и в поисковой практике как синоним этого термина используется термин «*минералогические индикаторы рудоносности*». Минералогические индикаторы рудоносности подразделяются на прямые и косвенные. Прямые индикаторы связаны с природой самих минеральных тел и околорудных ореолов или предрудных и надрудных зон, косвенные — со средой рудообразования. Минералогические индикаторы рудоносности используются главным образом в процессе поисков. На стадии прогнозирования их учет существенно повышает надежность прогнозов. Косвенные

индикаторы рудоносности в целом менее надежны, чем прямые, однако их поисковое применение может быть даже более эффективным, так как косвенные индикаторы нередко легче диагностируются.

Нужно заметить, что строгую границу между минералогическими прогнозными критериями и минералогическими индикаторами рудоносности провести нельзя, так как их выделение носит в какой-то мере операциональный характер. Характеристика индикаторов рудоносности будет дана ниже.

С целью унификации методической основы всех основных поисковых методов (геохимических, геофизических, минералогических и др.) ряд исследователей [1] вводят понятие о минералогических полях и минералогических аномалиях.

*Минералогическое поле — естественная часть геологического пространства, характеризующегося однородной или закономерно изменяющейся минералогической структурой.* Минералогические поля выделяются в их естественных границах по распространению определенных минеральных комплексов, формаций, ассоциаций, парагенезисов, по распространению определенных минералов и их концентрации, по определенным признакам минералов, по минералогенетическим характеристикам и т. п. Минералогическое поле, следовательно,—это физическое проявление через совокупность минералогических признаков любого геологического объекта, сложенного минералами.

Для поисковых целей нет необходимости исследовать всю полную совокупность минералогических параметров (вещественных, структурных, химических, физических), характеризующих реальные минералогические поля. Главное внимание обращается на те характеристики, которые являются минералогическими индикаторами рудоносности, причем и из них отбираются только наиболее информативные. Таким образом, в процессе минералогических поисков изучаются только отдельные элементы минералогических полей, да и измерения этих элементов осуществляются не по всему объему поля, а по отдельным его точкам, распределенным с различной густотой. Наблюдаемое минералогическое поле будет представлять собой весьма упрощенную модель поля реального, предназначенного для конкретных поисковых целей.

*Наблюдаемое минералогическое поле — это пространственно-упорядоченное множество значений минералогических параметров (индикаторов рудоносности), характеризующих отдельные элементы естественного минералогического поля.*

Сложное разнообразие минералогических полей строго соответствует разнообразию топоминералогических объектов, так как каждый объект проявляется через свое поле. Иерархия минералогических полей подчиняется иерархии объектов, и любое сложное поле мы можем делить на простые поля точно так же, как расчленяем сложные объекты. Так, например,

минералогическое поле сложного рудного узла можно расчлени-ть на поля отдельных минеральных тел и, далее, на поля от-дельных типов минеральных агрегатов, поля распространения отдельных минералов и т. д. Детальность расчленения опреде-ляется масштабом и детальностью поисков. Любое реальное минералогическое поле можно расчлени-ть на целый ряд эле-ментарных полей, каждое из которых соответствует какому-то определенному минералогическому параметру или соотноше-нию параметров.

Разнообразие типов минералогических полей определяет необходимость их классификации. Целесообразно подразделять поля по следующим признакам:

— степени сложности — простые (соответствуют элементар-ным топоминералогическим объектам), сложные (соответ-ствуют объектам различной степени сложности);

— количеству учитываемых минералогических парамет-ров — элементарные (по отдельным параметрам), комбиниро-ванные (по нескольким параметрам), полные (по всей совокуп-ности параметров);

— характеристическим параметрам — концентрационные (отражающие количественное распределение отдельных мине-ралов или их сообществ), конституционные (отражающие из-менения состава и структуры минералов в пределах поля), ка-чественные (показывающие изменение физических и химических свойств минералов в пределах поля), минералогенетические (отражающие современные условия или палеоусловия минера-лообразования);

— типам параметров — скалярные (характеризуются абсо-лютными значениями параметров, к этому типу относится по-давляющее большинство минералогических полей), векторные (характеризуются абсолютной величиной и направлением па-раметра; к этому типу относятся некоторые минералогенетиче-ские поля, например палеополе силы тяжести, поле кристалло-механических напряжений и др.);

— минералогической структуре — однородные, зональные и т. п.

— генетической природе — экзогенные, эндогенные;

— отношению к изучаемому топоминералогическому объ-екту — сингенетические, эпигенетические.

С понятием «минералогического поля» тесно связано по-нятие «минералогической аномалии».

*Минералогическая аномалия — участок минералогического поля, в пределах которого нарушается нормальная структура поля и значения параметров аномально отклоняются от фо-новых значений.* Вкладывая главным образом прикладной, по-исковый смысл в это понятие, минералогическую аномалию можно определить как участок земной коры, в пределах кото-рого минералогические индикаторы рудоносности указывают на

возможное присутствие полезного ископаемого. Минералогическая аномалия, по сути дела, также является полем, но она характеризуется своей структурой, отличающейся от структуры окружающего поля, в которое она «врезана» (нормальное и аномальное поля).

Минералогическими аномалиями (аномальными полями) могут проявляться:

— выходы самих тел полезных ископаемых, представляющие собой концентрационные аномалии;

— различные ореолы вокруг тел полезных ископаемых (сингенетические и эпигенетические), фиксируемые положительной информацией по минералогическим индикаторам рудоносности;

— минералогические зоны разного масштаба (планетарные, региональные, локальные), с которыми могут быть связаны определенные типы полезных ископаемых;

— участки в районе поисков, благоприятные для промышленной концентрации полезных минералов по данным реставрации палеоусловий минералообразования;

— области мобилизации рудного вещества, пути миграции рудоносных растворов, области их разгрузки и другие минералогенетические данные.

*Минералогические поиски в общем виде представляют собой последовательную совокупность следующих операций: планомерной ревизии минералогических полей по минералогическим индикаторам рудоносности, поисков и оконтуривания минералогических аномалий, изучения структуры минералогических аномалий, выяснения их строения и геологической ситуации, установления природы аномалий и их поисковой интерпретации, определения вероятного положения минеральных тел в пространстве, предсказания промышленной ценности и масштабов месторождения.*

Процесс минералогических поисков технически представляет собой площадную минералометрию рудоиндикаторных признаков, которая представляет собой один из важнейших компонентов минералогического картирования.

## **МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ ПОИСКОВЫЕ ИНДИКАТОРЫ**

Минералогические индикаторы месторождений полезных ископаемых, или минералогические индикаторы рудоносности, представляют собой главный инструмент минералогических поисков. Поисковая практика располагает многими яркими примерами эффективного использования минералогических индикаторов; наиболее выдающийся среди них — это открытие алмазоносных кимберлитовых трубок на Сибирской платформе по минералу-спутнику алмаза — пиропу. Этот пример стал хрестоматийным благодаря сенсационности открытия, но не мень-

шее значение имеют и открытия новых месторождений золота, платины, редких металлов, технических, ювелирных и других минералов, оказавшиеся возможными благодаря систематическому и комплексному применению прямых или косвенных минералогических индикаторов.

Эффективность использования минералогических поисковых индикаторов для разных типов месторождений полезных ископаемых неодинакова и в первую очередь зависит от того, насколько минеральное состояние вещества определяет его практическую ценность. С этих позиций в соответствии с классификацией И. Ф. Романовича месторождения подразделяются на три группы.

Первая группа — месторождения элементов. Полезными ископаемыми являются элементы, входящие в состав тех или иных минералов, и для превращения полезного ископаемого в товарную продукцию требуется разрушение кристаллической структуры минерала. Это месторождения благородных, цветных и черных металлов, редких элементов, радиоактивных элементов, химического сырья. Главные критерии ценности месторождений этой группы — содержание полезного элемента в рудном теле и объем тела. Минеральная форма его вхождения имеет второстепенное значение. Минералогические поисковые индикаторы имеют ведущее значение и используются в комплексе с геохимическими индикаторами.

Вторая группа — месторождения минералов. Полезными ископаемыми являются сами минералы. Ценность месторождения определяется не только запасами полезного минерала, но и его свойствами, величиной индивидов. Это месторождения пьезосырья, оптических кристаллов, слюд, асбестов, ювелирных и поделочных камней, коллекционного сырья, сырья для плавки стекол, шихты для выращивания монокристаллов, полевых шпатов, магнезита, диоксида, волластонита, графита, корунда, маршаллита, талька, пирофиллита, каолина, технического барита и виверита и других минералов. Минералогические критерии при поисках и оценке являются определяющими, и других прямых критериев, кроме минералогических, не существует.

Третья группа — месторождения горных пород. Их промышленную ценность создают не только минералы, входящие в состав пород, но и текстурно-структурные особенности пород и их физические свойства, определяющиеся взаимоотношениями породообразующих минералов. В эту группу входят месторождения глин, карбонатных пород, трепелов, опок, пемз, диатомитов, песка, гравия и других строительных материалов, мраморов, гранита, гнейса и других декоративных камней, пород для каменного литья. Минералогические поисковые индикаторы имеют важное, но не определяющее значение и используются

в комплексе с индикаторами петрографическими (литологическими).

Все многообразие минералогических индикаторов рудоносности можно свести к трем главным типам:

— минеральные (вещественные) индикаторы (рудоиндикаторные минералы, ассоциации минералов, конституционные особенности и свойства минералов);

— минералогенетические индикаторы (экологические, исторические, эволюционные);

— антропогенно-минералогические (минералогическая информация в топонимике, следы древних разработок минералов, легенды, предания, исторические сведения).

### **Минеральные (вещественные) поисковые индикаторы**

Носителями рудоиндикаторной информации могут быть ассоциация минералов, отдельные минералы (их отсутствие или наличие, количественные показатели), конституционные особенности и свойства минералов.

Минералы — индикаторы рудоносности по поисковым функциям подразделяются на три категории.

*Полезные («рудные») минералы.* Находки минералов, являющихся полезными ископаемыми, относятся к прямым индикаторам рудоносности и имеют наибольшее поисковое значение при поисках любых типов полезных ископаемых. Даже единственная находка полезного минерала наводит на мысль о возможности обнаружения его промышленных скоплений, а повторяющиеся находки становятся надежным основанием для Постановки поисковых работ одним из подходящих ореольных методов (валунный, обломочный, шлиховой и др.). Поэтому любые находки полезных минералов обязательно должны каталогизироваться и ревизироваться независимо от того, при каких видах геологических работ они сделаны (поисковых, геологосъемочных, научно-исследовательских), и даже в том случае, если они носят случайный характер. Очень часто на основе таких случайных или попутных находок открываются потом крупные месторождения.

*Минералы, родственные полезным минералам («минералы-родственники»).* К этой категории относятся минералы, не являющиеся полезными, но находящиеся с полезными в тесном генетическом и экологическом родстве.

При поисках месторождений первой группы (месторождений элементов) любые минералы, содержащие полезный элемент в повышенных количествах, можно рассматривать как минералы-родственники, указывающие на возможность обнаружения в данном регионе рудных минералов — промышленных концентраторов полезных элементов. Например, высокое содержание в сульфидах элементов платиновой группы позволяет

надеясь на открытие в сульфидных рудах самостоятельных минералов платиноидов; широкое развитие в регионе манганокальцитов, марганцовистых сфалеритов и других минералов, содержащих повышенные количества этого элемента, служит благоприятным признаком наличия здесь промышленных месторождений марганца.

При поисках месторождений второй группы (месторождений минералов) в качестве минералов-родственников рассматриваются некондиционные индивиды потенциально полезного минерала, не несущие полезных свойств. Такими индикаторами-родственниками на горный хрусталь, например, являются мелкие кристаллы водянопрозрачного кварца, непрозрачные и деформированные кристаллы и даже зернистый (жильный) кварц определенных типов; на листовую мусковит — мелкие и средние кристаллы мусковита в пегматитах, на ювелирный рубин — мелкие кристаллы рубина, трещиноватый неювелирный рубин, на оптический флюорит — неоптический кристаллический флюорит и т. п.

Минералы-родственники относятся, в зависимости от степени «родства», как к прямым, так и к косвенным поисковым индикаторам и используются в комплексе с другими признаками, но степень надежности их довольно высокая. Они позволяют достаточно строго конкретизировать контуры поисковых площадей.

*Минералы, ассоциирующие с полезными минералами («минералы-спутники»).* То обстоятельство, что любой полезный минерал обязательно встречается с определенными сопутствующими минералами, использовалось для поисковых целей еще древними рудознатоками. Оно является важнейшим компонентом и современной системы минералогических поисковых индикаторов. Теоретическую основу представлений о минералах-спутниках составляет учение о парагенезисе, анализирующее пространственно-временные связи между минералами, составляющими генетически сложные минеральные комплексы. Поскольку пространственно-временные связи между минералами в природных минеральных ассоциациях очень разнородны (наряду с одновременно кристаллизовавшимися минералами существуют ряды последовательно кристаллизовавшихся минералов, замещающиеся и замещающие минералы и т. п.), то и минералы-спутники различны и по своей природе, и по поисковому значению. Можно предложить следующую систему минералов-спутников, основанную на их генетической природе и хорошо отражающую рудоиндикаторную роль (табл. 14). Поясним эту систему некоторыми примерами.

Проторудными, или дорудными, являются такие минералы, которые пространственно контролируют кристаллизацию более поздних рудных минералов, замещаясь или обрастая ими, т. е. представляют собой благоприятную среду для рудообразова-

**Система минералов-спутников, ассоциирующих с полезными (рудными) минералами в месторождениях полезных ископаемых**

Генетические типы и подтипы минералов-спутников	Краткая характеристика	Значение как поисковых индикаторов
I. Проторудные минералы	Минералы более древних, чем продуктивный, минеральных комплексов, представляющие собой благоприятную среду или субстрат для формирования рудных парагенезисов; могут служить источником некоторых компонентов руд, в том числе и полезных	Указывают на благоприятную среду для рудообразования, используются как прогнозный критерий
II. Минералы рудных формаций		
1. Предрудные	Минералы, выкристаллизовавшиеся на ранних, дорудных стадиях рудного процесса	Косвенные указатели рудоносности, свидетельствующие о начале рудного процесса. Информативность повышается при их подтверждении индикаторами II.2, 3
2. Синрудные:	Минералы, образующиеся одновременно или почти одновременно с рудными минералами:	Прямые индикаторы рудоносности, являются главным инструментом при минералогических поисках
а) минералы рудного парагенезиса	а) в тесной пространственной взаимосвязи образуют единые минеральные агрегаты и минеральные тела;	
б) минералы синрудных парагенезисов	б) в тесной генетической связи, но в пространственном разобщении с рудными образуют самостоятельные минеральные агрегаты и формируют определенные зоны внутри или вокруг рудных тел и самостоятельные минеральные тела	
3. Пострудные	Минералы, выкристаллизовавшиеся на заключительных, пострудных стадиях рудного процесса	Косвенные индикаторы рудоносности, в совокупности с индикаторами II.1 — прямые

Генетические типы и подтипы минералов-спутников	Краткая характеристика	Значение как поисковых индикаторов
III. Эпирудные минералы		
1. Таксические минералы	Минералы, кристаллизация которых происходит только на минералах рудной ассоциации как на субстрате, без их существенного разрушения	Гипотетический случай, поисковое значение неясно
2. Метаминералы:	Минералы, образующиеся в результате изменения и разрушения рудных и парагенных им минералов:	Прямые индикаторы рудоносности, имеющие важное поисковое значение
а) псевдоморфные	а) сохранившие форму первичных минеральных индивидов или структурно-текстурные особенности агрегатов; вещество может быть привнесенным, не связанным с рудообразованием	
б) трансформные	б) сохранившие некоторые вещественные компоненты руд, но являющиеся новообразованиями; форма, как правило, не сохраняется	

ния. Самородная сера в наиболее крупных экзогенных месторождениях, например, образуется путем замещения сульфатов (гипса или ангидрита), присутствие которых на поисковой площади может служить одним из косвенных указателей на благоприятные условия серообразования. Для метасоматических флюоритовых месторождений, залегающих в карбонатных породах, проторудным минералом является кальцит: именно по нему, а не по доломиту развивается кварц-флюоритовый метасоматоз. Тела пиритолитов очень часто являются той средой, в которой происходит кристаллизация сульфидов меди, цинка, свинца; при этом дорудный пирит служит источником серы, а иногда и некоторых металлов, содержащихся в нем в виде изоморфных примесей. Наличие больших скоплений пирита поэтому всегда рассматривается как благоприятный признак при поисках рудных месторождений. Проторудные минералы — это не только активно замещающая среда, но и пассивно обрастаемый новыми минералами субстрат. Высококачественный горный хрусталь растет на недеформированных кварцевых зер-

нах-затравках, хороший аметист—на головках кристаллов раннего кварца и т. п. Процессы формирования проторудных и рудных минералов, как правило, различны по своей генетической природе, они могут быть значительно разорваны во времени. Проторудные минералы — указатели благоприятных условий для рудообразования и имеют большое прогнозное, но незначительное поисковое значение.

Минералы рудных формаций включают весь минеральный комплекс, сформировавшийся в рудный этап, включая и парагенезисы непродуктивных стадий.

Предрудные минералы включают парагенезисы ранних, допродуктивных стадий рудообразующего процесса, которые затем закономерно, без перерыва сменяются продуктивными стадиями. В приводившемся примере с экзогенными серными месторождениями таким предрудным минералом был эпигенетический гипс. Его образование путем гидратации ангидрита или перекристаллизации проторудного гипса под действием сероотлагающих растворов предшествует продуктивным серным или серно-карбонатным стадиям. От замещаемого проторудного гипса предрудный отличается более крупнокристаллической структурой, более легким изотопным составом водорода кристаллизационной воды, пониженным содержанием неструктурных примесей, но более высоким содержанием изоморфных стронция и бария. На большинстве гидротермальных редкометальных месторождений рудным стадиям предшествует кристаллизация дорудного кварца, иногда полевых шпатов, хлорита. Предрудные минералы— косвенные индикаторы рудоносности, но в сочетании с другой минералогической информацией эффективность их использования может быть достаточно высокой. Например, зоны предсерной перекристаллизации гипсов помогают находить положение серных залежей в процессе разведочного бурения по «пустым» скважинам.

Синрудные минералы рудного парагенезиса, кристаллизовавшиеся вместе с рудными, имеют не меньшее поисковое значение, чем сами рудные минералы. Они относятся к прямым индикаторам рудоносности. «Универсальным» синрудным минералом в большинстве гидротермальных месторождений является рудный кварц, очень часто хлорит. В конкретных месторождениях синрудные ассоциации прогнозируются диаграммами «состав — парагенезис» или устанавливаются путем изучения как взаимоотношений между минералами, так и включений в минералах. Например, установлено, что алмаз кристаллизовался вместе с некоторыми разновидностями граната, оливина, хромита, клинопироксена, ортопироксена и рядом других минералов [56], которые широко используются как индикаторы при поисках алмазов.

Минералы синрудных парагенезисов, формирующиеся одновременно с рудным парагенезисом, но пространственно разоб-

ценные с ними, образуют внешние и внутренние зоны рудных тел или самостоятельные минеральные тела. Это хорошо известные зоны грейзенизации, окварцевания, баритизации, турмалинизации и других окolorудных изменений. Они имеют очень важное поисковое значение, так как являются прямыми индикаторами рудоносности и характеризуются более широким ореолом распространения, чем минералы рудного парагенезиса, что позволяет увеличить дальность и глубинность поиска.

Пострудные минералы кристаллизуются на заключительных нерудных стадиях рудного процесса. В большинстве гидротермальных месторождений к числу пострудных относятся карбонаты, чаще кальцит, флюорит, барит. Для многих полиметаллических месторождений характерны пострудные органические минералоиды, в частности антраколит. Пострудные минералы являются косвенными поисковыми индикаторами, но в комбинации с другими признаками их поисковая эффективность может быть очень высокой. Например, на Северо-Восточном Пай-Хое широкой полосой четких баритовых шлиховых аномалий фиксируется региональная зона гидротермальных сульфидных проявлений.

Эпирудные минералы, особенно метаминералы, относятся к числу прямых и довольно надежных индикаторов рудоносности. Наиболее эффективно используются как поисковые признаки минералы зон окисления и псевдоморфозы по рудным минералам.

Таким образом, для каждого генетического и промышленного типа месторождений полезных ископаемых характерны строго определенные комплексы минералов-спутников, которые образуют связанные с рудными телами минералогические аномалии, представляющие собой ореолы первичного или вторичного рассеяния. Для неоднократно упоминавшихся экзогенных месторождений серы, например, комплексы минералов-спутников будут следующими:

- а) проторудные минералы — гипс, ангидрит;
- б) минералы рудной формации: предрудные — гипс, иногда кальцит, арагонит, сфалерит, галенит; синрудные — кальцит, арагонит, пирит; пострудные — кальцит, целестин, барит, халцедон, кварц, озокерит;
- в) эпирудные минералы — гипс, алунит, левигит, опал, ярозит, гексагидрит, галотрихит, натриевые и калиевые квасцы.

Комплексы минералов-спутников, характерные для конкретных типов минеральных месторождений, поиски которых ведутся с применением минералогических методов, должны быть известны минералогу-поисковику заранее. Они устанавливаются при минералогическом изучении эталонных месторождений и месторождений-аналогов и корректируются в процессе поисков по предварительным результатам.

Генетическая диагностика минералов-спутников, т. е. установление их принадлежности к тому или иному генетическому типу и определение рудоиндикаторного значения, осуществляется на основе анализа типоморфизма минералов [60]. Если исследуемый минерал характеризуется теми же специфическими особенностями, что и эталонный минерал-спутник, то делается вывод об их аналогичной генетической природе и об аналогичном отношении к рудному парагенезису. Так, если гранат из россыпи диагностируется как пироп, можно предполагать, что первичным его источником был кимберлит. В связи с конвергентностью некоторых особенностей и свойств минералов их генетическую идентификацию необходимо проводить, сравнивая максимально большой комплекс признаков.

Анализируя приводившиеся примеры, видим, что одни минеральные виды входят в состав только строго определенных генетических комплексов минералов-спутников (например, целестин, барит, арагонит и некоторые другие минералы серных месторождений характерны лишь для синрудного комплекса), другие же являются поликомплексными, входя в состав нескольких или всех комплексов (на тех же серных месторождениях гипс — обязательный минерал проторудного, предрудного, синрудного и эпирудного комплексов минералов-спутников). Первые принято называть типоморфными, характеристическими, вторые — сквозными.

*Характеристические минералы-спутники* уже своим присутствием раскрывают генетическую природу того комплекса минералов, с которым имеет дело минералог-поисковик, и их видовая диагностика означает и генетическую идентификацию. Характеристические минералы дают наиболее оперативную и надежную поисковую информацию. Присутствие, например, в пегматитах, связанных с основными породами, литиевого амфибола — гольмквистита, отличающегося сине-фиолетовым цветом, с высокой долей вероятности свидетельствует об их редкометальной специализации [8]. Выявление и изучение характеристических минералов-спутников поэтому одна из важнейших операций минералогических поисков.

*Сквозные минералы-спутники*, входящие в состав генетически разнородных комплексов, казалось бы, малоинтересны для поисковых целей, так как они могут быть связаны и с рудными и нерудными парагенезисами. Однако сквозные минералы весьма эффективно используются в поисковых целях, так как почти все они являются очень чувствительными индикаторами условий минералообразования и по их типоморфным особенностям легко и надежно устанавливается связь с рудным процессом. «Универсальными» сквозными минералами, характерными для многих генетических типов месторождений полезных ископаемых, являются кварц, кальцит, пирит, флюорит, слюды, хлориты, полевые шпаты и др.

Прежде всего «рудная» природа сквозных минералов выражается в их химическом составе. Как правило, минералы рудных формаций, причем не только синрудные, но и предрудные и пострудные, отличаются повышенным содержанием тех элементов-примесей, которые входят в состав рудного парагенезиса. В условиях Вайгач-Южноновоземельского антиклинория, например, присутствие в гидротермальном кварце меди и серебра является поисковым признаком на медь, свинца и цинка — на полиметаллическое оруденение [61]. Кварц-флюоритовые месторождения Пай-Хоя отличаются повышенным содержанием серебра, свинца, стронция и бария, входивших в состав рудообразующих растворов [61], а кварц-вольфрамовые месторождения Приполярного Урала — вольфрама, висмута, меди, олова.

Кроме комплекса рудных элементов в состав сквозных минералов входят в повышенных количествах и другие компоненты рудоносных растворов; к тому же на составе минералов отражаются определенным образом кислотно-основные и окислительно-восстановительные свойства растворов. Эти типохимические особенности сквозных минералов имеют не меньшее поисковое значение, чем присутствие рудных элементов. Например, «рудная» природа микроклинов в полевошпатовых метасоматитах устанавливается по соотношениям Na/Rb и Ba/Rb, гидрослюд в гидротермальных полях — по содержанию редких щелочей, в рудоносном кварце телетермальных месторождений обычно выше содержание лития, но ниже — алюминия. Химические особенности минералов отражаются в их свойствах, поэтому о принадлежности сквозных минералов к рудным ассоциациям судить часто удобнее по физическим свойствам. Это особенно относится и к тем случаям, когда рудоиндикаторный примесный элемент входит в кристаллическую решетку минерала-спутника в очень небольших количествах, чтобы быть обнаруженным химико-аналитическими методами, но достаточном для создания нарушений в кристаллической решетке, что проявляется в свойствах минерала. Типоморфизм флюорита, например, наиболее отчетливо проявляется в окраске, термо- и рентгенолюминесценции, пирита — в изменении электрических свойств.

Надежным признаком синрудной природы минерала-спутника и уверенным поисковым индикатором является наличие в его индивидах включений рудных минералов.

Рудоиндикаторные ассоциации минералов, классифицирующиеся по той же схеме, что и минералы-индикаторы, характеризуются более высокой поисковой информативностью, чем отдельные минералы. В поисковой практике поэтому анализируется весь комплекс минералов и углубленно изучаются их связи прямыми наблюдениями или, если это невозможно, статистическими методами. Ассоциация пироп +

+ пикроильменит + высокохромовый хромит + хромдиопсид, например, лежит в основе минералогических поисков алмазонасных кимберлитов по ореолам механического рассеяния, ассоциация сфалерит + галенит + пирит + барит + флюорит —> в основе поисков полиметаллических месторождений и т. п.

### **Минералогенетические поисковые индикаторы**

Минералогенетические поисковые индикаторы определяют условия, благоприятные для формирования месторождений того или иного полезного ископаемого, и относятся в своем большинстве к косвенным индикаторам с относительно невысокой надежностью. Это обстоятельство и высокая трудоемкость ограничивают пока их использование в поисковой практике. Однако эти ограничения неоправданны. Опыт показывает, что поисковая эффективность минералогенетических индикаторов может быть очень высокой, в первую очередь потому, что они универсальны. Если создана минералогенетическая модель объекта, то на ее основе можно решать любые поисковые задачи, а не только связанные с поиском отдельных видов минерального сырья.

Выделяются три класса минералогенетических поисковых индикаторов— индикаторы среды, или экологические индикаторы, исторические и эволюционные индикаторы.

Минералого-экологические поисковые индикаторы. С помощью минералогенетических индикаторов, детально разобранных в гл. VIII, реставрируются условия минералообразования для того или иного отрезка времени. Поисковые задачи обычно позволяют иметь дело не со всей совокупностью условий, а лишь с определенными характеристиками среды— химическими, термодинамическими. По данным таких реконструкций можно определить области, благоприятные для рудообразования, и соответствующим образом ориентировать поиски. Например, карта метаморфических фаций может служить основой для поисков метаморфогенных месторождений; местами возможной концентрации определенных полезных ископаемых являются легко устанавливаемые по минералогенетическим данным зоны окислительно-восстановительных барьеров, пьезо- и термоградиентные зоны, области разгрузки глубинных растворов и т. п. Минералогенетическая информация используется не только как предпоисково-прогнозная, но и как оперативная поисковая: выявление зон прогресса по данным изучения включений в минералах при поисках гидротермальных месторождений, определение изменения окислительно-восстановительных условий по изменению валентности минералообразующих и примесных элементов и т. п.

Минералого-исторические поисковые индикаторы. В учении о месторождениях полезных ископаемых и

в минералогии накопились веские доказательства существования определенных эпох минерального видообразования и рудообразования, качественно отличающихся одна от другой. Разные отрезки геологического времени характеризуются преимущественным формированием определенных типов минеральных месторождений. Например, главнейшие запасы никеля сосредоточены в эндогенных месторождениях архейского возраста, железа — в архейско-раннепротерозойских месторождениях, свинца и цинка — в протерозойско-фанерозойских, олова и вольфрама — в фанерозойских. Эти крупные мегатипы характеризуются более тонкой возрастной структурой, выражающейся направленной сменой во времени минеральных формаций. Например, в фанерозойской совокупности вольфрамовых месторождений месторождения шеелит-кварц-полевошпатовой гумбеитовой формации имеют преимущественно герцинский возраст, месторождения шеелит-гранат-пироксеновой скарновой и вольфрамит-кварцевой грейзеновой формаций — преимущественно киммерийский возраст; месторождения ферберит-антимонит-халцедоновой аргиллизитовой — альпийский. Все известные месторождения самородной серы сформировались в кайнозойскую эру, реже в неогеновое и преимущественно в четвертичное время. Это общепланетарные примеры. В конкретных районах возрастное распределение различных типов минерализации выступает еще более отчетливо. Историко-минералогическими индикаторами как раз и являются те возрастные рубежи, которые ограничивают определенные эпохи минералообразования. Например, в Уральской флюоритоносной провинции главнейшими эпохами флюоритообразования являются раннекаменноугольная ( $C_{1v-s}$ ) и пермо-триасовая ( $P_2-T_3$ ). При поисках флюоритовых месторождений проявления минералообразующих процессов этого возраста — благоприятный поисковый признак.

**Минералого-эволюционные индикаторы.** Поисковое правило, основанное на использовании минералого-эволюционных индикаторов, в общем виде можно сформулировать следующим образом: если поисковый минералогический объект — член пространственно-временного эволюционного ряда...  $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow e \rightarrow f \dots$ , реализующегося в виде пространственной минералогической зональности, то обнаружение зон с объектами  $a, b, c, e$  или  $f$  дает основание предполагать наличие зоны с поисковым объектом  $d$ , пространственное положение которой указывает направление смены зон. Установлено большое число эволюционных рядов различного уровня (формационных, минеральных, кристаллоструктурных, кристалломорфологических и др.), для разных минералогических объектов, что открыло возможность широкого использования эволюционных критериев при поисках. Благодаря работам Н. З. Евзиковой, В. В. Буканова, минера-

логов Института геологии Коми филиала АН СССР минерало-эволюционные критерии успешно применяются при поисках месторождений касситерита, золота, горного хрусталя и других разновидностей кварца, полиметаллов. Главные условия их эффективного использования — это установление надежных эволюционных рядов.

### **Антропогенно-минералогические индикаторы**

Месторождения некоторых минералов, особенно в районах, давно освоенных человеком, когда-то использовались древними рудокопами, но оказались забытыми и потерянными. Однако в народной памяти, в народном искусстве, в материальной культуре о них могли остаться прямые или косвенные сведения. Кроме того природные скопления ряда минералов могут сопровождаться разными необычными физическими эффектами (магнетизм, наэлектризованность, подземные пожары и т. п.). Эти эффекты также могли привлекать внимание человека и запечатлеться в его памяти. Подобные сведения, как и древние следы горных разработок, могут служить поисковыми признаками и объединяются в группу антропогенно-минералогических индикаторов.

К этой группе индикаторов относятся следующие.

1. Археологические находки минералов или изделий из них среди предметов древних материальных культур, а также находки минералов и изделий из минералов в музейных и частных коллекциях, в обиходе местного населения и т. п. Исторический анализ этих объектов в совокупности с анализом типоморфизма минералов может привести к заключению об их местном происхождении и позволит определить примерно район возможного месторождения.

2. Древние горные выработки, их отвалы, следы древних камнеобрабатывающих и металлургических производств, находки горняцких орудий. Они служат прямыми поисковыми индикаторами и должны анализироваться самым, тщательным образом. По таким находкам в Средней Азии, на Кавказе, Урале было найдено большое число промышленных месторождений.

3. Легенды, предания, сказки, в которых имеются явные или косвенные указания на разработку месторождений в определенных районах или сведения о необычных природных явлениях, которые могут иметь минералогическую природу. Они могут также оказаться полезными при прогнозировании и поисках.

4. Исторические сведения о находках, добыче и переработке минералов и руд, зафиксированные в летописях, исторической и специальной литературе.

5. Топонимические данные. В географических названиях в районах древних горных промыслов обязательно отражаются

какие-то данные о добывающихся минералах. Поэтому происхождение названий минералогического содержания должно привлечь внимание минералога-поисковика. Такие названия, как правило, оправдываются последующими поисками. Особенно много примеров можно привести по Средней Азии: Мумкансай («олозокеритового рудника») действительно рассекает озокеритовую залежь, разрабатывавшуюся средневековыми горняками; в долине Кансая («рудничный лог») И. В. Мушкетовым были открыты жилы с медным и полиметаллическим оруденением, район Алтынтопкана («золото нашел»), хотя и не имеет золоторудных месторождений, но зато знаменит полиметаллической минерализацией с пиритом, который и был принят за золото; в районе Кургасынкана («свинцовый рудник») известны галенитовые месторождения. Часто встречаются минералогические названия географических объектов и в России: Золотой ключ, Оловянная сопка, Серебряная гора, Железная гора и др.\*

Считается, что антропогенно-минералогические индикаторы, сыгравшие в прошлом исключительно большую роль, сейчас утратили свое значение и представляют лишь исторический интерес [22]. С этим мнением вряд ли можно согласиться. Неразрешенных загадок еще очень много. Остаются непроверенными легенды о свинцовых месторождениях в верховьях правых притоков Верхней Печоры; собранные В. А. Варсанофьевой, не найденные месторождения олова на Европейском Северо-Востоке, разрабатывавшиеся в конце бронзового века по мнению ряда археологов, забыто местоположение копей гигантских изумрудов в Средней Азии, о которых слышал от местных жителей Н. А. Наследов, неизвестно, из каких мест на Приполярном Урале добывали золото в прошлом веке старатели-одиночки.

В целом комплекс антропогенно-минералогических поисковых критериев конечно еще нельзя считать утратившим свое значение даже для хорошо изученных регионов и все такого рода сведения необходимо тщательно проверять.

## **ПРЕДПОИСКОВОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОИСКОВЫХ ПЛОЩАДЕЙ**

Предпоискковое прогнозирование проводится с целью уточнить перспективы рудоносности района поисков, конкретизировать их в соответствии с задачами поисков (более тщательный анализ перспектив тех видов минерального сырья, на которые

---

\* Рассматривая соответствующие топонимы как поисковые индикаторы нужно иметь в виду разнообразие причин возникновения минералогических названий. Многие из них имеют позднее происхождение и связаны с уже открытыми месторождениями, другие являются воспоминанием о несостоявшихся открытиях (например, губа Серебрянка на Новой Земле, где ожидалась, но так и не была найдена серебряная минерализация), а подавляющее большинство вообще не имеет отношения к минералогии (Серебряный бор в Подмосковье, Золотые пески в Болгарии и т. п.).

планируются поиски), определить поисковые площади с выделением на них наиболее перспективных участков, установить информативные поисковые индикаторы и выбрать наиболее эффективные методы поисков. Предпоисковое прогнозирование в целевом и методическом отношении мало отличается от регионального прогнозирования, проводимого в процессе топоминералогических исследований или металлогенического анализа, но оно, как правило, не ограничивается анализом имеющихся геолого-минералогических материалов и предусматривает проведение в небольших объемах уточняющих и ревизионных полевых работ. В процессе предпоискового прогнозирования более тщательно изучается минералогическая специализация развитых в районе поисков минеральных комплексов, выполняется дополнительный анализ структуры минералогических полей, проводятся различного рода опытные работы.

Минералогическая специализация минеральных комплексов в общем виде устанавливается методом аналогий, путем сравнения представленных в районе поисков комплексов с комплексами хорошо изученных рудоносных районов. Если, например, район характеризуется развитием толлитовых базальтоидов, образующих дифференцированные тела с оливинсодержащими пикритовыми горизонтами в подошве, а в породообразующих минералах отмечаются повышенные содержания меди, никеля, кобальта, то можно предполагать открытие связанных с этими телами пирротин-пентландит-кобальтиновых залежей. Альбититы, развивающиеся по-гранитоидам, как правило, имеют редкометальную специализацию. Однако для организации минералогических поисков эти данные слишком неопределенны и требуют уточнения путем дополнительных исследований минералов. Как показывает опыт, наиболее убедительными минералогическими данными о металлогенической специализации минеральных комплексов являются особенности минерального состава и химический состав минералов.

Комплексы, с которыми генетически, парагенетически или пространственно связаны те или иные месторождения полезных ископаемых, как правило, содержат в относительно повышенных количествах соответствующие рудные минералы. Например, гранитоиды, с которыми связаны касситеритовые месторождения, отличаются от нерудных гранитоидов почти в 500 раз более повышенным содержанием акцессорного касситерита. В гранитоидах соответствующей рудной специализации в типовых рудоносных районах содержание акцессорного вольфрамита выше в 50—60 раз, шеелита — в 5—10 раз, молибденита — в 5—10 раз, галенита — в 400 раз, сфалерита — в 20 раз по сравнению с безрудными гранитоидами. Конечно, должна учитываться генетическая природа образующих аномальные содержания акцессорных минералов, но независимо от того, являются ли эти минералы сингенетическими или наложенными, их присутствие

должно рассматриваться как благоприятный прогнозный критерий.

Таким же положительным критерием является и повышенное содержание рудных элементов в породообразующих и акцессорных минералах. В гранитоидах, например, надежными индикаторными минералами среди породообразующих являются полевые шпаты, биотит и другие слюды, кварц. Если содержание в них рудных элементов, например вольфрама, во много раз превышает обычное, то это свидетельствует о соответствующей, в данном случае вольфрамовой, их специализации. Содержание вольфрама в плагиоклазах и калиевых полевых шпатах в рудогенерирующих гранитоидах Приполярного Урала около 2 г/т, в биотите и мусковите 20—30 г/т, в титаните, цирконе, ортите, апатите 30—60 г/т. На резко пониженные содержания рудных элементов в породообразующих минералах также надо обращать внимание при решении вопросов рудоносности комплексов: не исключено, что они могут быть следствием самоочистки этих минералов при перекристаллизации и свидетельствовать о мобилизации рудного вещества. Акцессорные минералы, так же как и породообразующие, в рудоносных породах содержат повышенное, то это свидетельствует о соответствующей в гранитоидах с тантал-ниобиевой минерализацией акцессорные минералы содержат в 3—20 раз больше тантала и ниобия, чем в нерудоносных, в частности цирконы 110-245 и 1260—5479 г/т соответственно, магнетит 202 и 1620 г/т, титанит 450 и 5950 г/т, ильменит 130—640 и 2870 г/т. Индикаторная роль различных минералов неодинакова. Наиболее чувствительны на вольфрам — титанит, циркон, ильменит, гранат, рутил; на молибден — титанит, ильменит, ортит, пирит, рутил; на скандий — ортит, гранат, ильменит и циркон и т. п. [26].

Установлению минерагенической специализации минеральных комплексов служат и другие минералогические критерии: наличие известных месторождений полезных ископаемых, особенности эволюции минералообразующих процессов и др.

Анализ структуры минералогических полей проводится для установления по имеющимся данным, дополненным рекогносцировочными маршрутами, общего строения нормальных минеральных полей, выявления их зональности, предсказания возможных типов минералогических аномалий, связанных с полезными ископаемыми. В процессе этого анализа из поисковых площадей исключаются малоперспективные участки, где уверенно предсказывается безаномалийный характер полей, и наоборот, выделяются участки с невыдержанным характером поля или интересные минералогические зоны для детальных поисков.

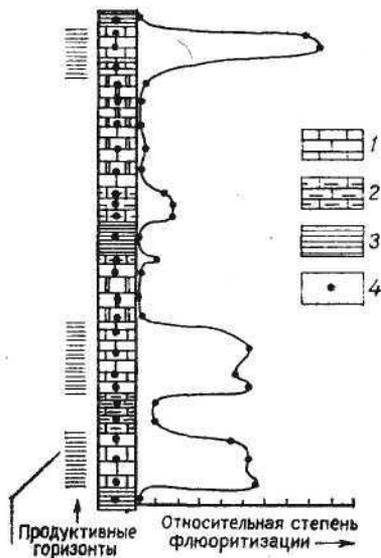
Опытные работы ставятся для проверки различных прогнозно-поисковых гипотез. Они весьма разнообразны в методическом отношении, их характер определяется конкретными

поисковыми задачами. В качестве примера приведем разработанный автором совместно с А. Ф. Кунцем модельно-тестовый метод оценки потенциальной рудоносности перспективных районов и ложадей, позволяющий проводить количественное прогнозирование месторождений полезных ископаемых, образующихся путем метасоматического замещения рудными минералами вмещающих пород.

Суть этого метода состоит в следующем. Известно, что месторождения многих полезных ископаемых (флюорита, барита, целестина, свинца, цинка, урана и др.) образуются путем замещения рудными минералами определенных горных пород, особенно карбонатных, в результате воздействия на них холодных или гидротермальных рудоносных растворов или других рудоносных флюидов, магматических расплавов, а также в результате окислительно-восстановительных реакций и жизнедеятельности микроорганизмов. При этом отмечается строгая приуроченность рудных залежей не только к определенным породам, но и к определенным горизонтам одних и тех же пород. Такая избирательность замещения пород обусловлена особенностями их химического и минерального состава и различными физико-механическими свойствами.

Создав экспериментальную или теоретическую модель формирования минерализации определенного генетического типа и установив оптимальные условия рудообразования в зависимости от состава, концентрации, кислотности — щелочности воздействующих растворов, термодинамических и других факторов, можно подвергнуть обработке в этих оптимальных условиях образцы пород, отобранных с достаточной частотой по всему геологическому разрезу в перспективном рудоносном районе. Каждый горизонт разреза при этом как бы испытывают на потенциальную возможность локализации оруденения. Естественно, что «рудообразующая способность» различных горизонтов разреза будет неодинаковой, так как она зависит от геохимических, минералогических, физико-механических и многих других факторов, которые дифференцированно учесть очень сложно. Но при экспериментальных испытаниях выявляется суммарное действие этих факторов, выражающееся в степени замещения породы рудным минералом.

Очевидно, что горизонты, наиболее легко воспринимающие оруденение и характеризующиеся более высокими содержаниями рудного минерала при обработке образцов в одних и тех же модельных условиях, можно рассматривать как перспективные и рудоносные (рис. 62). При этом можно давать количественную оценку их потенциальной рудоносности, т. е. определять возможную предельную концентрацию рудного минерала в данном литологическом горизонте. На эти горизонты и целесообразно направлять поиски месторождений.



**Рис. 62. График относительной интенсивности замещения флюоритом различных горизонтов карбонатного разреза в экспериментальных условиях, характеризующий потенциальную рудоносность разреза:**

1 — известняк; 2 — глинистый известняк;  
3 — глинистый сланец; 4 — точки опробования

Продемонстрируем возможности метода на примере флюорита. При проведении экспериментальных исследований по моделированию процессов формирования гидротермальных флюоритовых месторождений в карбонатных породах было установлено, что образование метасоматической зональности, аналогичной природной, происходит только при воздействии на карбонатные породы концентрированных фторидных или кремнефторидных растворов. Наиболее интенсивно процессы замещения флюоритом проявляются при температурах 150—250 °С и воздействии умеренно кислых растворов ( $pH = 5-6$ ). Установленные при моделировании закономерности были использованы для оценки потенциальной флюоритоносности карбонатных отложений в пределах известных флюоритоносных районов Новой Земли, Пай-Хоя,

Урала и Донбасса. На исследуемых участках отбирались образцы, дающие представительную характеристику всех литологических разностей геологического разреза. Из каждого образца вырезались по два отдельных блока (основной и дублирующий); их помещали в гидротермальную установку (автоклав) большого объема (обычно ~1 л). Автоклав заливали исходным раствором (фторидным, кремнефторидным и т. д., в зависимости от типа изучаемого рудообразующего процесса) и герметично закрывали. Объем раствора при этом должен был превышать объем изучаемых образцов в десятки раз, чтобы приблизить систему к открытой. Автоклав нагревали в электропечи до заданной температуры (температурный интервал образования гидротермальных месторождений обычно 100—350 °С, а средние значения лежат в интервале 200—250 °С) и выдерживали при этой температуре (колебания температурного режима в процессе всего опыта не превышали значений +5 °С) от 3 до 5 сут. После завершения опыта автоклав вскрывали, из обработанных образцов изготовляли петрографические шлифы, которые изучали под микроскопом. По результатам определения мощностей зон преобразований исходных пород при их взаимо-

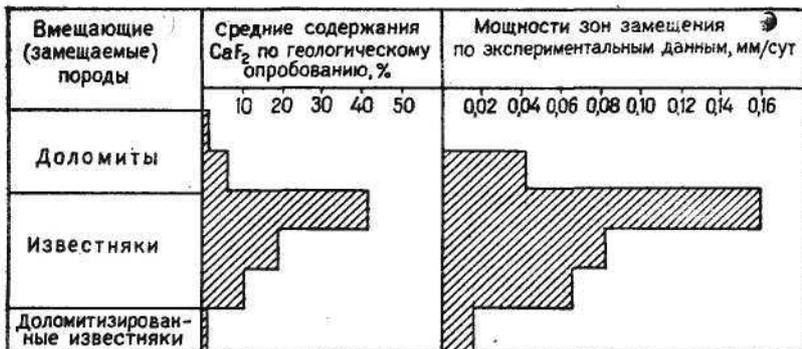


Рис. 63. Зависимость мощности зон замещения образцов карбонатных пород флюоритом от реальной продуктивности горизонтов карбонатного разреза Пай-Хой в условиях гидротермального эксперимента

действию с гидротермальными растворами (при этом обычно формируются четко выраженные метасоматические колонки различной мощности) строили графики, на которых выделяли горизонты с наибольшей интенсивностью процесса преобразования исходных пород. Они и рекомендовались для проведения поисковых работ.

При гидротермальной обработке образцов из карбонатных разрезов по интенсивности их замещения флюоритом уверенно выделяются именно те горизонты, которые в этих районах являлись рудовмещающими, причем между мощностями зон преобразований, установленными в ходе лабораторных исследований, и реальными содержаниями флюорита в этих горизонтах отмечается хорошо выраженная положительная корреляционная связь (рис. 63); последняя подтверждает корректность количественной оценки.

Метод испытан нами также при прогнозировании гидротермальной баритовой минерализации.

Предпоисковое прогнозирование необходимо в особенности при планировании глубинных поисков месторождений полезных ископаемых, когда сужение поисковых площадей может существенно уменьшить трудоемкость и стоимость работ.

## МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ ПОИСКИ

Процедуру любых типов минералогических поисков в общем виде можно определить как минералометрию, о чем мы уже говорили в начале этой главы. Она сводится к систематическому площадному минералогическому опробованию, получению по пробам или непосредственными измерениями в точках опробования индикаторных минералогических характеристик, выяснению особенностей пространственного изменения этих характери-

стик и установлению структуры минералогического поля, анализу структуры поля с точки зрения возможности наличия полезных ископаемых. Поэтому прежде, чем перейти к характеристике различных методов минералогических поисков, перечислим главные методические операции, необходимые для эффективного проведения любых поисков. К ним относятся:

- определение условий применения выбранного метода, выяснение благоприятствующих и неблагоприятствующих факторов, определение природных, методических и технических ограничений в применении метода;

- определение системы и плотности поискового опробования, обоснование необходимого количества и оптимального объема проб, выбор надежной техники и методики опробования;

- выбор надежных аналитических и измерительных методов изучения минералогических проб, формулировка главных требований к анализу;

- анализ ошибок и погрешностей минералогического опробования;

- выбор методов математической обработки поисковой топоминералогической информации;

- выбор методов картографического отображения поисковой информации;

- прогнозно-поисковый анализ минералогических полей и интерпретация минералогических аномалий.

От решения перечисленных задач зависит эффективность минералогических поисков, поэтому им нужно уделять максимум внимания. Задачи эти решаются аналитическими методами и путем проведения в конкретных условиях поисковых районов опытно-методических работ. Для них выбираются участки с известными уже месторождениями и рудопроявлениями или наиболее перспективные участки, на которых экспериментально опробуются различные методические варианты. Принципы аналитического выбора условий проведения минералогических поисков те же, что и для других методов, и они детально изложены в поисковой методической литературе.

## **Визуальные поиски минеральных тел**

Визуальные поиски минеральных тел являются наиболее простым и надежным поисковым минералогическим методом. Обнаружение выхода минерального тела на поверхность или подсечение его скважинами или горными выработками дает неизмеримо больше шансов на открытие промышленного месторождения, чем обнаружение любого, даже наиболее обещающего окolorудного ореола или любой другой минералогической аномалии. Остается лишь осуществить оценку этого выхода.

Методика визуальных поисков довольно проста и мало чем отличается от той, которую использовали древние рудоискатели. Это искаживание минералогом-поисковиком поисковой площади максимально плотными маршрутами и выскивание полезных минералов в коренном их залегании. Очевидно, что при таком методическом подходе большую роль приобретает элемент случайности. От минералога-поисковика требуется исключительная внимательность, добросовестность и хорошее умение визуально диагностировать минералы. При этом необходимо не расставаться с молотком и лупой. В одном из районов больше десятка высококвалифицированных геологов пересекали системой маршрутов мощную (15—25 м), выходящую на поверхность баритовую залежь, но каждый из них принимал серый барит за пелитоморфный известняк и не считал нужным лишний раз ударить молотком. Наконец, один из геологов поднял обломок породы, удивился его массе и открыл крупнейшее баритовое месторождение. Не менее печальными примеры другого рода, когда геологи-съемщики или минералоги находят полезные минералы, правильно определяют их, но минералы оказываются не теми, которые они ищут, и находка не фиксируется, образцы не отбираются, а если и отбираются, то расходятся по коллекциям. И потом эти месторождения открываются вновь ценой больших усилий и средств.

Визуальные поиски рудных выходов сопровождаются тщательным изучением всех косвенных признаков — геоморфологических особенностей, растительности, окраски пород и т. п. Нередко погребенные кварц-кальцитовые жилы с полиметаллами и редкометальные жилы выделяются на склонах гор более ярко-зеленой и густой травянистой растительностью. По распределению растительности можно определить даже морфологические особенности жил. Альбитизированные гранитоиды с редкометальной и редкоземельной минерализацией хорошо выделяются среди неизменных гранитоидов мелкообломчатыми развалами. Часто рудные тела выражаются понижениями в рельефе или, наоборот, гребнями, холмами и горами. Полиметаллическая минерализация в известково-доломитовых толщах на о. Вайгач сопровождается красной окраской поверхности каменных глыб, связанной с развитием каких-то лишайников. Все подобные косвенные признаки должны учитываться при визуальных поисках, эффективность которых зависит, следовательно, в высокой степени от опытности и квалификации поисковика. При поисках необходимо использовать по возможности портативные поисковые физические, особенно ядерно-физические, приборы типа «Гагара», «Минерал» и др. Если обнаружены выходы минеральных тел, то они должны быть очень тщательно задокументированы и опробованы; должны быть собраны все данные, необходимые для оценки выходов и определения методики разведки.

Визуальные поиски минеральных месторождений можно отнести к прямым поискам; они приводят и к самым надежным результатам, отличающимся наиболее высокой степенью подтверждения. Однако дальность и глубинность их очень мала, а риск пропуска месторождений очень большой.

### **Поиски по концентрационным аномалиям полезных минералов в коренных породах**

Под концентрационными аномалиями понимаются участки минералогических полей, отличающиеся наличием полезных минералов в коренном залегании, т. е. на месте их первичной кристаллизации. Это могут быть вкрапления полезных минералов в породах, гнезда, прожилки, жилы, линзообразные, пластовые и другие тела, сложенные либо только полезным минералом, либо полиминеральными агрегатами.

Нормальным минералогическим полем в таком случае будет поле без полезного минерала, включающее всю область распространения любых минеральных комплексов, не содержащих полезного минерала. Аномальное поле так же, как и нормальное, может быть вещественно и генетически сложным, включать различные комплексы, объединенные одним признаком — присутствием в них полезного минерала. Тела полезных ископаемых вместе с окружающими их концентрационными ореолами представляют собой продуктивные концентрационные аномалии. Если содержание и масса ценных минералов во всем объеме концентрационной аномалии ниже минимального промышленного, то такая аномалия непродуктивна (разумеется, при данной экологической конъюнктуре). Минеральные (рудные) тела занимают в продуктивной концентрационной аномалии строго определенное пространственное положение, определяемое структурой и геологической ситуацией.

Продуктивная, промышленная часть концентрационной аномалии представляет собой рудное тело, непромышленная — синрудный минеральный ореол рудного тела. Анализ взаимосвязей рудного тела с синрудным ореолом составляет методическую основу рассматриваемого метода поисков, который не очень удачно называют поисками по первичным ореолам рассеяния. Более подходящим был бы предлагавшийся А. И. Гинзбургом взамен термина «ореол рассеяния» термин «ореол концентрации», или «ореол распространения» по А. Е. Ферсману [55], но они как-то не укоренились в поисковой литературе. Мы предлагаем называть данный метод *методом концентрационных аномалий полезных минералов*.

Рассмотрим некоторые особенности продуктивных концентрационных аномалий, представляющих единство рудного тела и синрудного ореола, важные для поисковой методики.

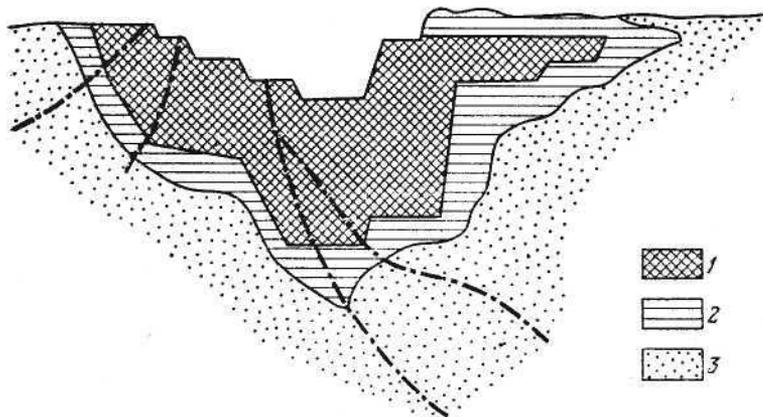
Синрудные ореолы являются обязательным спутником месторождений полезных ископаемых. Они имеют ту же природу, что и рудные тела, и сформировались одновременно или почти одновременно с ними в результате развития одного и того же минералообразующего процесса (рудообразующего). Характер минерализации в рудном теле и ореоле и даже в различных частях ореола может быть неодинаков вследствие неоднородности условий кристаллизации минералов. Если минерализация эпигенетична вмещающим породам, то в пределах аномалии могут реализоваться и инфильтрационный и диффузионный механизмы развития процессов и полезный минерал может кристаллизоваться путем замещения вмещающих пород. Все эти различия, однако, нивелируются, если мы рассматриваем только факт присутствия и содержание полезного минерала в каждом конкретном объеме геологического пространства.

Концентрационные ореолы подразделяются на индивидуальные и сложные, таким же образом классифицируются и концентрационные аномалии.

Индивидуальная концентрационная минералогическая аномалия — это каждое отдельное рудное тело с его концентрационным ореолом. Сложные аномалии формируются в результате смыкания концентрационных ореолов двух или множества рудных тел. Они могут быть различного ранга и представлять большие и малые рудные поля, рудные зоны, рудные пояса и провинции регионального и планетарного масштаба. Каждую сложную аномалию можно расчленить на элементарные, поэтому их выделение имеет скорее операциональный, чем естественный, смысл и определяется детальностью поисков.

Большое значение для минералогических поисков имеют форма и внутреннее строение концентрационных аномалий.

Индивидуальные концентрационные аномалии имеют форму, в общем повторяющую форму рудных тел, поскольку распределение минерализации и в рудном теле, и в окружающем его ореоле подчиняется одним и тем же минералоконтролирующим факторам. Содержание полезного ископаемого закономерно уменьшается от рудного тела к внешней границе концентрационного ореола, но уменьшение это не монотонное, а нарушающееся локальными максимумами и минимумами. В общем виде во внутреннем строении индивидуальной концентрационной аномалии можно выделить три зоны (рис. 64): 1) промышленное рудное тело, ограниченное промышленным контуром (промышленная мощность и промышленное содержание); 2) внешнюю зону минерализации, ограниченную так называемым нулевым контуром (появление сплошной непромышленной минерализации); 3) зону спорадической минерализации, охватывающую область развития редких, не связанных в единое поле включений рудного минерала. Границы всех этих зон, в общем, подобны друг другу, но границы внешней зоны и зоны спорадической



**Рис. 64. Ореол концентрации полезного минерала вокруг рудного тела:**

1 — промышленный контур рудного тела; 2 — «нулевой» контур; 3 — контур распространения спорадической минерализации. Штрихпунктирные линии — тектонические нарушения

минерализации более причудливы, эти зоны как бы вытягиваются вдоль главнейших контролирующих структурных элементов (по слоистости, по дорудным дизъюнктивным нарушениям). Расстояние от нулевого контура до промышленного невелико, обычно меньше размера рудного тела, но внешняя граница зоны спорадического оруденения может отстоять от него на значительном расстоянии, иногда во много раз превышающем размеры рудного тела.

Форма сложных или групповых концентрационных аномалий — это суммарная форма слагающих их индивидуальных аномалий и зависит от их числа и распределения.

Здесь следует отметить относительность понятия формы групповой аномалии. При мелко- и среднемасштабных исследованиях в единую аномалию объединяются многочисленные единичные аномалии, если даже они и не соприкасаются друг с другом. Будучи небольшими по площади, эти индивидуальные аномалии на карте обозначаются отдельными точками. Сгущение точек на площади поисков, представляющее узел минерализации, рассматривается как минералогическая аномалия. Условная линия, оконтуривающая сгущение, является границей аномалии. Месторождения любого генетического и промышленного типа редко встречаются поодиночке, обычно они объединены в группы месторождений и окружены многочисленными мелкими и средними рудопроявлениями, не представляющими промышленного интереса, и находками отдельных минералов (рис. 65, 66). Групповые аномалии поэтому имеют большое поисковое значение, так как они могут фиксировать контуры рудного района, узла или поля. Размеры групповых аномалий, складывающихся из продуктивных и непродуктивных индиви-

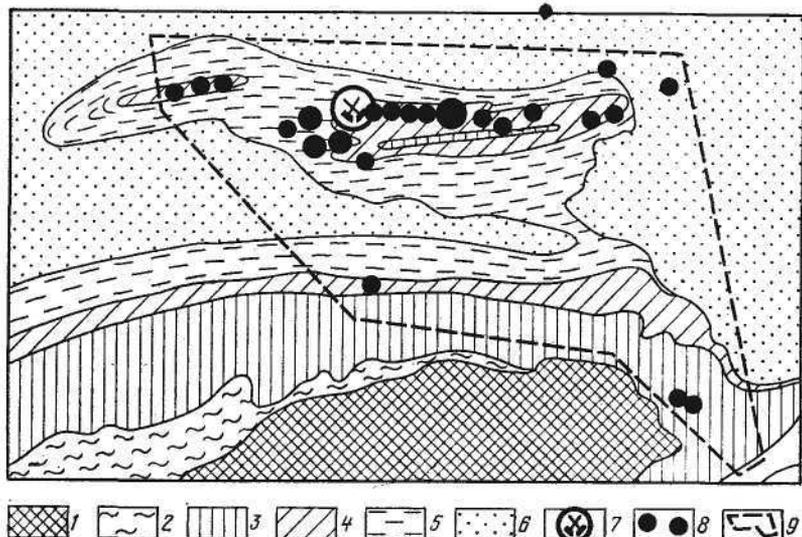


Рис. 65. Серопроявления в районе серного месторождения Шорсу, образующие групповую региональную концентрационную аномалию — ореол вокруг главного месторождения:

1 — палеозой; 2 — юра; 3 — мел; 4 — сузакско-бухарско-туркестанско-алайские ярусы палеогена; 5 — сумсарско-риштанско-массагетские ярусы палеогена; 6 — неоген, бактрийский ярус; 7 — главное серное месторождение; 8 — серопроявления (размер значка соответствует масштабу минерализации); 9 — условный контур сероносного района



Рис. 66. Проявления сульфидной медно-никелевой минерализации на Центральном Пай-Хое, фиксирующие площадь перспективного района:

1 — субинтрузивные тела диабазов; 2 — пирротин-пентландит-халькопиритовые проявления

дуальных аномалий, значительно (часто в десятки и сотни раз) превышают размеры рудных тел. Они легче фиксируются при поисках, чем единичные, но интерпретация их более трудоемка.

Форма и структура сложных и простых концентрационных минералогических аномалий определяются анизотропией среды, в которой развивается рудообразование, и анизотропией подтока рудообразующих растворов. Если среда относительно однородна и подток рудного вещества равномерен как по объему рудной системы, так и во времени, то сформировавшаяся в таких условиях аномалия будет иметь относительно правильную, чаще эллипсоидальную или каплевидную форму, концентрическое строение, определяющееся постепенным снижением содержания рудного минерала или минералов от рудоподводящего канала, обычно являющегося центром аномалии, к ее периферии. Внутренние концентры представляют собой рудное тело, внешние — ореолы. Подобные аномалии характерны для рудоносных метасоматитов, особенно развивающихся по магматическим породам, например по гранитоидам. Если среда рудоотложения неоднородна (литологически пестрые вмещающие толщи, сложные трещинные зоны) и подток рудного вещества неравномерен, то образуются весьма сложные аномалии причудливой формы.

На форму и строение аномалий оказывают влияние все рудоконтролирующие факторы — наличие литологически благоприятных для рудоотложения горизонтов, структурных ловушек, рудоконтролирующих экранов, рудоподводящих каналов. В благоприятной среде минералообразование может распространяться на значительную площадь, формируя широкие минералогические ореолы. Непроницаемые экраны «прижимают» ореолы к рудным телам, но по дорудным или синрудным тектоническим нарушениям рудоносные флюиды нередко прорываются через них и формируют своеобразную сигнальную минерализацию, не сливающуюся в сплошной ореол.

При всем многообразии форм и строения концентрационные минералогические ореолы вокруг рудных тел можно свести к двум типам — горизонтальному и вертикальному. Конечно, и те и другие имеют вертикальную и горизонтальную компоненты, но один из них может иметь резко преобладающее развитие.

Горизонтальные ореолы формируются в тех случаях, когда рудообразование развивается в условиях последовательного напластования, что характерно для седиментогенных месторождений.

Ореол рудных минералов по простиранию рудоносного пласта может быть регионально широким, а по мощности «сжат» до нескольких метров и даже сантиметров. Вертикальные ореолы характерны для эпигенетических месторождений, как

эндогенных, так и экзогенных, и определяются влиянием силы тяжести на распределение компонентов, восходящими потоками глубинных флюидов и инфильтрацией поверхностных кислородсодержащих вод, вертикальным изменением температуры и давления. В определенных условиях может достигаться примерное равенство нормальной и тангенциальной составляющих интенсивности минералообразования, и ореолы приобретают близизометричную форму. Такие условия реализуются:

— при сочетании восходящего или нисходящего потока вещества с горизонтальным литологическим благоприятным горизонтом;

— при формировании гидротермальных или инфильтрационных метасоматических месторождений;

— при сочетании гравитационного оседания — всплывания минеральных индивидов и их седиментации на дне камеры, заполненной кристаллизующимся магматическим расплавом и в других случаях.

Концентрационные минералогические ореолы, как и любые другие, подразделяются на открытые и экранированные. Если первые формируются в условиях более или менее однородной среды, то форма вторых ограничивается непроницаемыми для рудоносных флюидов экранами. Экраны «сжимают» концентрационные ореолы и, с одной стороны, казалось бы, выступают как отрицательный фактор при поисках, а с другой — у экранов резко повышается контрастность минералогических аномалий, и их значительно легче зафиксировать. Для определенных условий можно даже рекомендовать минералогическое изучение подэкранного пространства как самостоятельный метод поисков. Наличие подэкранных минералогических аномалий может свидетельствовать об оруденении на глубине.

Такая ситуация показана на рис. 67. Она относится к Южновоземельскому флюоритоносному району, где флюоритовое оруденение контролируется литологически благоприятной нижнедевонской карбонатной толщей. Флюоритовые тела имеют четкие индивидуальные ореолы, сливающиеся в единый групповой ореол. Кроме того все они фиксируются присутствием прожилков и вкрапленности флюорита под подошвой базальтовых покровов, залегающих почти на 400 м выше продуктивного горизонта, причем концентрация флюорита достаточна для визуального выявления. Эти флюоритопроявления можно рассматривать как сигнальные аномалии, свидетельствующие о наличии флюоритового оруденения в более глубоком продуктивном горизонте. Между ними и флюоритовыми телами рассеянная флюоритовая вкрапленность также существует, но она настолько рассеяна, что обнаружить ее без специальных видов опробования очень трудно. Поскольку флюоритоносный район представляет собой вскрытую эрозией до продуктивного горизонта антиклинальную структуру с крутым падением крыльев, то становится возмож-

ным провести поиски одновременно как по концентрационным аномалиям в продуктивном горизонте, так и по сигнальным подэкранным аномалиям, получая при этом дополнительную поисковую информацию.

Общая схема минералогического поиска по концентрационным аномалиям ординарна. Она включает следующие операции: 1) выявление и оконтуривание минералогических аномалий путем визуальных поисков и минералогического опробования; 2) установление структуры аномалии, ее зональности и геологической ситуации, установление факторов, определяющих форму и строение аномалии, определение природы аномалии; 3) прогнозирование пространственного положения рудного тела; 4) фиксацию рудного тела и его оценку.

Для выявления концентрационных аномалий дополнительно к традиционному визуальному методу поиска минералов применим любой метод, позволяющий давать количественную оценку минерального состава. В последнее время в качестве ведущего метода все более широко применяется метод протокочек дробленных проб, из которых отмывается искусственный серый шлик. При его трудоемкости этот метод обладает такими важными достоинствами, как высокая чувствительность (менее 1 г минерала на 1 т породы) и возможность отбора минералов для анализа. В качестве дополнительных широко используются методы прозрачных и полированных шлифов и физические, в частности ядерно-физические методы. При анализе любых проб нельзя ограничиваться только определением их количественного минерального состава, но самое серьезное внимание нужно обращать на изучение конституции и свойств минералов. Данные о типоморфизме минералов резко повышают информативность проб и представляют основу для поисковой и генетической интерпретации минералогических аномалий.

Для интерпретации концентрационных аномалий большое значение имеет анализ их эволюционной зональности, которая существует наряду с упоминавшейся выше концентрационной зональностью и выражается в направленном изменении конституции и свойств полезного минерала. Принципиальная схема эволюционной зональности показана на рис. 68. Если морфология минеральных индивидов и их свойства  $a$ ,  $b$ ,  $c$  зависят от параметра среды  $x$ , то с изменением этого параметра во времени и в пространстве они будут также изменяться, причем строго направленно. Это выразится в том, что в каждый момент времени на различном удалении от рудогенерирующего источника будут кристаллизоваться индивиды одного и того же минерала, но с различными свойствами и будет формироваться своеобразная зональность. Изменение параметра  $x$  во времени выразится изменениями, которые зафиксируются в анатомии индивидов. Продуктивное оруденение будет связано только с определенными зонами. Следовательно установив принадлежность мине-

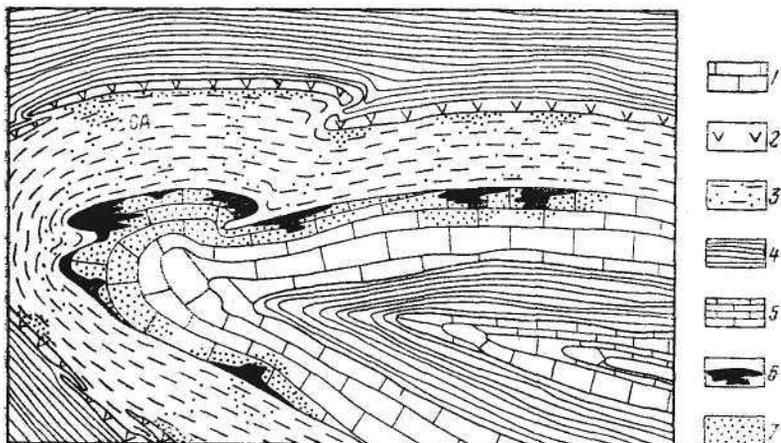


Рис. 67. Сигнальные минералогические аномалии флюорита под базальтовым покровом, Новая Земля:

1 — продуктивный горизонт  $D_1$ ; 2 — базальтовый покров  $D_2$ ; 3 — песчано-глинистые отложения; 4 — глинистые сланцы; 5 — известняки тонкослойные; 6 — рудные тела; 7 — концентрационные ореолы; CA — сигнальные аномалии

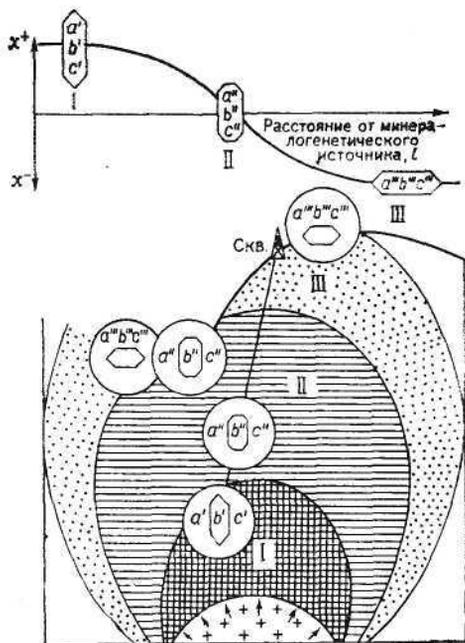


Рис. 68. Принципиальная модель эволюции минерального индивида и формирование пространственной минералогической зональности.

На графике показано пространственное изменение условий минералообразования по параметру и связанное с ним изменение формы и свойств кристаллических индивидов. На разрезе дано положение зон I—III, содержащих различные типы минеральных индивидов относительно минералогенирующего источника (стрелки)

ральных индивидов интересующих нас проб к определенным зонам эволюционной зональности, можно делать практические предсказания о их пространственном положении относительно точек отробования. Конкретные примеры эволюционной зональности касситеритового месторождения и хрусталеносного поля приводились на рис. 27 и 38. На схеме зональности касситеритового месторождения показан промышленный контур руд, который включает зоны только с определенными типами кристаллов касситерита, на чем основаны рекомендации Н. З. Евзиковой о применении кристалломорфологии для оценки месторождений. На схеме зональности одного из хрусталеносных полей выделены зоны с различными типами кристаллов кварца, которые позволяют прогнозировать пространственное распределение технологических типов кристаллосырья.

Использование эволюционной зональности концентрационных минералогических аномалий для выявления продуктивных рудных тел весьма эффективно, хотя и трудоемко. Однако для каждого типа месторождений характер зональности одинаков; можно пользоваться эталонными эволюционными моделями, избегая или сокращая самую трудоемкую операцию — установление эволюционного ряда и общей схемы зональности.

Мы рассматривали теоретические и методические основы поисков по концентрационным аномалиям полезных минералов на простейшем примере, когда и рудное тело, и его ореол представлены одним рудным минералом. Если руды полиминеральны, а чаще всего так и бывает, то форма и строение концентрационных минералов усложняются. В этом случае мономинеральные аномалии как бы наложены друг на друга, пространственное положение их может не совпадать. Но информативность таких комплексных аномалий выше, чем мономинеральных: поисковая информация не только увеличивается, но в соответствии с увеличением числа минералов появляется новый критерий — соотношение между минералами.

### **Поиски по минеральным ореолам зонального рудоотложения и ореолам околорудного изменения (по ореолам сопровождения)**

Вокруг рудных тел в процессе их образования формируются не только концентрационные ореолы рудных минералов, но и сингенетичные рудным телам ореолы минералов-спутников. Последние обычно более широкие, чем концентрационные ореолы, и имеют исключительно важное поисковое значение. Образование околорудных ореолов зависит от пространственно-временной эволюции рудообразующих систем, в развитии которых процесс кристаллизации рудных минералов и формирования рудных тел является лишь одним из звеньев длинной цепи минералогенетических событий, создающих дорудные, синруд-

ные и пострудные ассоциации минералов. Эти ассоциации кристаллизуются дифференцированно во времени и в пространстве, формируя самостоятельные минеральные поля, связанные однако единой пространственно-временной структурой. Рудное тело представляет собой один из элементов этой структуры, а все другие поля рассматриваются как зональный минеральный ореол этого тела.

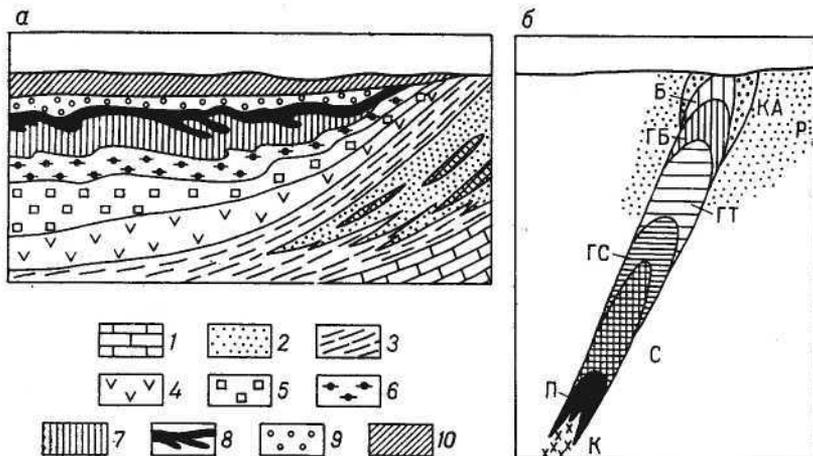
Этот тип ореолов формируют, как уже указывалось, парагенетические ассоциации минералов-спутников, поэтому такие ореолы целесообразно называть *ореолами сопровождения*, подчеркивая тем самым их тесную генетическую связь с рудными телами и одновременность образования с ними.

Ореолы сопровождения по их вещественным, структурно-текстурным особенностям и по механизму формирования подразделяются на два типа — ореолы зонального рудоотложения и ореолы окоlorудного изменения.

Ореолы зонального рудоотложения формируются по механизму заполнения минеральным веществом свободного пространства. Такие ореолы формируются в условиях либо последовательного отложения вещества на какую-либо основу — подложку (дно седиментационного бассейна, стенка большой открытой полости, стенка или дно кристаллизационной камеры), либо — выполнения минеральным веществом пор, мелких каверн, тонких трещин, заполняющихся нацело. Исходя из этих особенностей можно, очевидно, выделить два подтипа ореолов зонального рудоотложения.

Первый подтип включает ореолы последовательного отложения минерального вещества, характерные для седиментогенных, некоторых магматогенных, в меньшей степени гидротермальных и других месторождений. Это собственно не ореолы в строгом смысле этого термина, а полярные колонки минеральных ассоциаций, последовательно и закономерно сменяющие друг друга в процессе минералообразования, включающие ряды дорудных, рудных и послерудных ассоциаций. Каждая из этих ассоциаций образует самостоятельную крустификационную зону на стенках заполняемой полости или самостоятельный горизонт в осадочном разрезе. Зная статистическую или теоретическую последовательность смены ассоциаций, можно по наличию дорудных или послерудных зон прогнозировать пространственное положение рудной залежи. Принципиальная схема ореолов этого типа показана на рис. 69, а.

Второй подтип включает ореолы, являющиеся внешними непродуктивными зонами рудных тел (рис. 69, б). Например, рудная сфалерит-галенитовая минеральная зона по восстанию рудных тел некоторых гидротермальных месторождений может сменяться нерудной баритовой, далее кальцитовой и еще выше кальцит-антраксолитовой. Эти зоны образуют надрудный ореол. Ореолы второго типа, так же как и первого, в основном асим-



**Рис. 69. Два типа ореолов зонального рудообразования.**

*а* — нормальная колонка соляных отложений: 1 — известняки; 2 — песчаники, конгломераты; 3 — глины, известняки, доломиты; 4 — гипс-ангидритовая зона; 5 — галитовая зона; 6 — зона сульфатов магния; 7 — сильвинитовая зона; 8 — карналлитовая зона; 9 — бишофитовая зона; 10 — гипсоносные глины, мергели, известняки; *б* — зональность полиметаллического месторождения. Зоны: К — кварцевая, П — пиритовая, С — сфалеритовая, ГС — галенит-сфалеритовая, ГТ — галенит-тетраэдритовая, ГБ — галенит-баритовая, Б — баритовая, КА — кальцитовая, Р — киноварная

метричны; зональность имеет полярный, реже концентрический характер.

Ореолы околорудного изменения формируются по механизмам перекристаллизации или замещения вмещающих рудные тела пород, причем сами рудные тела, окруженные такими ореолами во многих случаях являются телами замещения. Ореолы околорудных изменений наиболее характерны для гидротермальных месторождений, особенно высокотемпературных, хотя встречаются и на некоторых типах экзогенных месторождений. Они очень разнообразны по минеральному составу, структуре и морфологии. Типы ореолов определяются характером рудной минерализации, составом рудообразующих растворов, термодинамическими и физико-химическими условиями рудоотложения, составом вмещающих пород.

Наиболее характерные типы околорудных изменений — перекристаллизация, карбонатизация, окварцевание, хлоритизация, серицитизация, грейзенизация, альбитизация, эпидотизация, каолинизация, пропицитизация, алунитизация, цеолитизация, лиственизация, серпентинизация, оталькование, турмалинизация, графитизация, баритизация, флюоритизация, гематитизация, пиритизация и др.

Флюоритовые месторождения, формирующиеся путем гидротермального метасоматоза по карбонатным породам, характеризуются зональным ореолом, состоящим из фронтальной зоны

перекристаллизации кальцита, зоны окварцевания, кварц-флюоритовой зоны. Месторождения самородной меди в основных породах на Новой Земле имеют ярко выраженный ореол эпидотизации. Вокруг кварц-пьемонитовых жильных тел с молибдошеелитом и черновитом, залегающих в измененных липаритовых порфирах на Полярном Урале, фиксируются ореолы изменения с таким порядком зональности: зона позднего окварцевания → зона мусковитизации → зона раннего окварцевания → зона эпидотизации. Здесь ограничимся этими в общем-то случайными примерами, не останавливаясь на характеристике минералогических ореолов изменения, так как по ним существует весьма обширная специальная литература.

Общий принцип поисков по минеральным ореолам сопровождения тот же, что и поисков по концентрационным ореолам: поиски ореола, оконтуривание, исследование структуры, поисковая интерпретация. Однако ореолы сопровождения несравнимо более сложные, чем концентрационные, как правило мультиплетные, объединяющие множество элементарных ореолов. Поэтому поиски могут опираться на разные качественные характеристики ореолов. Поиски, фиксация и изучение ореолов сопровождения обычно ведутся по следующим характеристикам: 1) по минеральным ассоциациям, 2) по типоморфным особенностям «сквозных» минералов, 3) по физическим и химическим эффектам, связанным с минеральным составом ореолов.

Минеральные ассоциации являются прямыми и наиболее надежными индикаторами ореолов сопровождения, поэтому целесообразнее всего минералогические поиски вести на их основе. Поисковое изучение минералогических полей в связи с их генетической гетерогенностью не может ограничиваться лишь определением количественных соотношений, а должно обязательно включать изучение взаимоотношений минералов на основе текстурно-структурного, онтогенетического и парагенетического анализов. В результате этого удается выявить не только устойчиво повторяющиеся минеральные ассоциации, но и парагенетические ассоциации, по которым можно восстановить условия минералообразования. Порядок смены ассоциаций в пространстве отражает пространственную эволюцию минералообразования и позволяет разобраться в структуре минералогических аномалий и определить их возможную связь с рудными телами. Изучение взаимоотношений минералов позволяет наиболее достоверно строить метасоматическую колонку, отражающую в концентрированном виде пространственно-временные закономерности формирования ореолов окolorудного изменения.

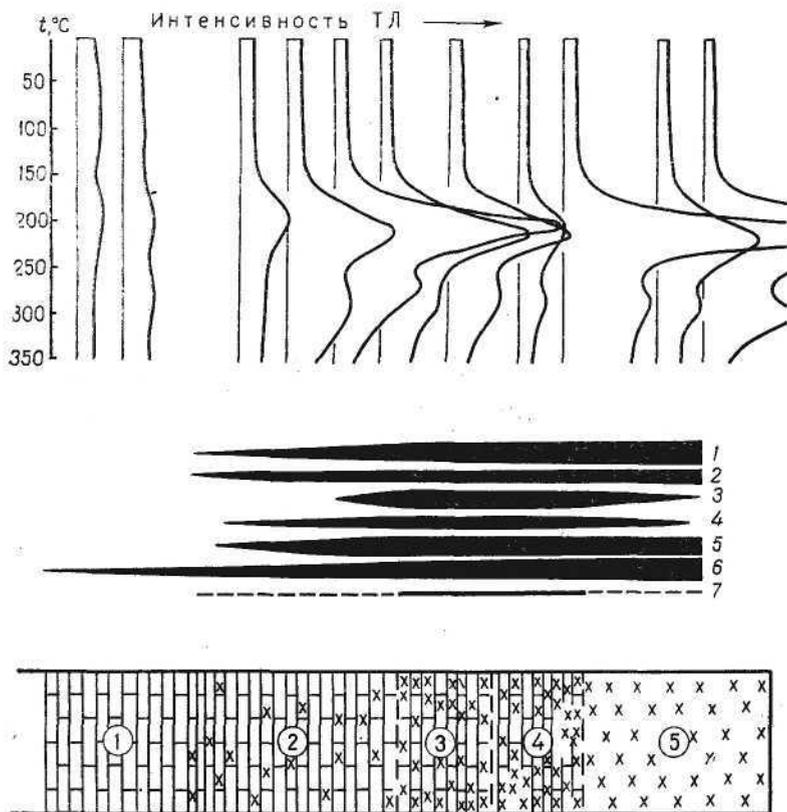
Типоморфные особенности «сквозных» минералов используются как дополнительный к минеральным ассоциациям критерий установления зональности ореолов сопровождения. Особенно информативен состав минералов, в частности содержание в нем элементов, входящих в состав полезного ископаемого,

а также физические свойства, определяющиеся присутствием этого элемента.

Физические и химические эффекты, связанные с минеральным составом ореолов сопровождения и являющиеся функцией минералогической структуры ореолов, очень широко используются для поисковых целей главным образом благодаря экспрессности их фиксации и возможности проведения точных инструментальных измерений. Это дает возможность получить удобную цифровую информацию в картографическом виде и использовать для анализа минералогических аномалий хорошо разработанные в геохимии и геофизике аналитические методы. К таким эффектам относятся • различные физические и химические свойства «сквозных» минералов, реакция минералов и минеральных агрегатов на различные внешние воздействия (нагревание, измельчение, гамма-облучение и т. п.). На подобных эффектах разработан и успешно применяется целый ряд минералогических методов. На некоторых из них мы кратко остановимся, хотя нужно иметь в виду, что их возможное число очень велико и определяется числом характеристик минералов, поддающихся измерению.

Термолюминесцентный метод основан на изучении термолюминесценции минералов того же генетического комплекса, к которому принадлежат минералы поискового объекта (магматогенные, седиментогенные, эпигенетичные вмещающим породам т. п.). Наиболее часто используются как поисковые индикаторы кальцит, кварц, реже флюорит и другие минералы. Сущность метода заключается в том, что в ореолах рудных тел разности этих минералов, генетически связанные с оруденением и являющиеся минералами—спутниками рудных минералов, по характеру термолюминесценции отличаются от дорудных и послерудных минералов. Рудные тела, как правило, сопровождаются отчетливыми аномалиями термолюминесценции минералов, чаще всего положительными; по термолюминесценции хорошо вскрывается и внутренняя зональность ореолов.

В качестве примера на рис. 70 показан разрез через гидротермальную зону барит-флюорит-сфалерит-сульванитовой минерализации в карбонатных породах Пай-Хоя, отчетливо фиксирующейся по сильной термолюминесценции кальцита в пределах как зоны, так и довольно мощного ореола сопровождения. Кальцит вмещающих карбонатных пород, как и дорудных эпигенетических прожилок и гнезд, нетермолюминесцентен, поскольку центры люминесценции были погашены прогревом пород в процессе регионального метаморфизма. Термолюминесценция кальцитов в этих условиях — надежный поисковый критерий. Информативность термолюминесцентного метода поисков существенно повышается, если одновременно со спектрами термолюминесценции снимаются спектры рентгенолюминесценции тех же проб или проводится их повторное термолюминесцентное изучение

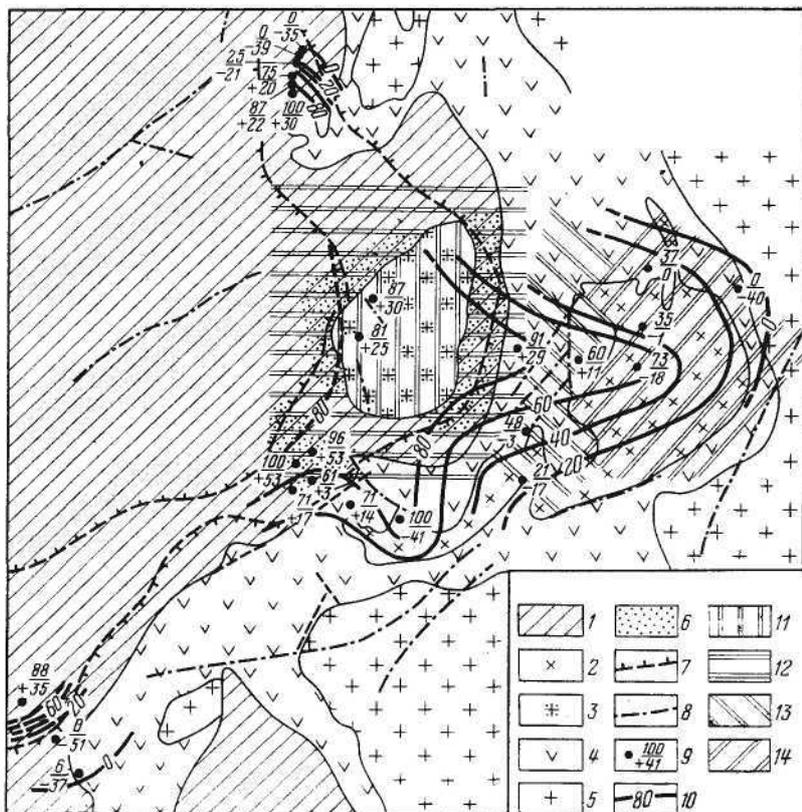


**Рис. 70.** Изменение термолюминесценции кальцита по разрезу через сульфидную метасоматическую залежь, ее контактовый ореол и вмещающие породы. Пай-Хой.

1 — интенсивность метасоматоза; 2 — механическое двойникование кальцита; 3 — целестин; 4 — флюорит; 5 — кварц вторичный; 6 — кальцит вторичный; 7 — пирит. Цифрами в кружках обозначены: 1 — известняк темно-серый с прослоями кремня, с редкими прожилками кальцита, 2 — известняк светло-серый, перекристаллизованный с прожилками кварцевые порфиры; 3 — гранит-порфиры; 4 — диоритовые порфиры; 5 — граниты, пла-перекристаллизованный с гнездами кальцита, 5 — кварц-кальцитовая порода с реликтами известняка с сульфанитом и сфалеритом

после прогрева и последующего гамма-облучения. Это дает возможность «снять» следствия термального метаморфизма и восстановить первичную площадную люминесценцию даже в районах интенсивного метаморфизма.

Термоэлектрический метод, особенно плодотворно развиваемый В. И. Красниковым, заключается в измерении термоэдс «сквозных» минералов и установлении термоэлектрических аномалий. Обычно в качестве поискового индикатора используются пирит, арсенопирит. По результатам измерений термоэдс довольно хорошо декорируется зональность многих околорудных



**Рис. 71. Схема зональности Шердовогорского рудного поля. По В. И. Красникову.**

1 — песчано-сланцевые отложения; 2 — взрывные брекчи кварцевых порфиров и кварцевые порфиры; 3 — гранит-порфиры; 4 — диоритовые порфиры; 5 — граниты, плагиограниты, микропегматиты; 6 — роговники; 7 — проекция контура скрытой части гранитного массива с глубины 500 м; 8 — разрывные нарушения; 9 — места отбора образцов (термоэлектрические параметры: в числителе — распространение пирита дырочной проводимости  $D_p$ , %, в знаменателе — среднее значение термоэдс, мВ; 10 — линии равных значений  $\Phi_r$  арсенопирита; минеральные зоны: 11 — редкометалльно-грейзеновая, 12 — кварц-полевошпатовая, 13 — турмалин-сульфидно-касситеритовая, 14 — свинцово-цинковая

ореолов сопровождения (рис. 71), но перед применением в каждом конкретном регионе метод требует тщательной опытной проверки.

Декрепитационный метод, фиксирующий интегральную или дифференцированную по температурным интервалам интенсивность газовыделения при нагревании минералов или температурные интервалы максимумов газовыделения, предложил использовать в поисковых целях Н. П. Ермаков. Он пришел к заключению, что вокруг гидротермальных рудных тел в процессе их формирования образуются так называемые ореолы

пропаривания, в пределах которых минералы содержат повышенные количества газовой-жидких включений, фиксируемые декрепитационными методами. Эта идея подтвердилась опытными работами. Очевидно, что ореолы пропаривания с повышенным газосодержанием лишь частный случай декрепитационных аномалий. Каждая зона аномалии должна характеризоваться своими типоморфными декрепитационными параметрами, отражающими условия кристаллизации минералов, а сама связанная с рудным телом аномалия в целом может характеризоваться не только повышенной, но и пониженной по сравнению с фоном декрептоактивностью. Декрепитационные аномалии, отражающие минеральные ореолы сопровождения, имеют место не только на гидротермальных месторождениях, но и на экзогенных, в частности на инфильтрационных. Измерение декрептоактивности проб может осуществляться декрептофоническим (по растрескиванию) или термовакуумным (по изменению давления в системе прибора) методами. Возможно использование и более информативных, но более трудоемких методов гомогенизации включений.

Кроме рассмотренных методов широко применяются для выявления ореолов сопровождения различные методы, фиксирующие выделение определенных газов и воды из минералов при их дроблении или нагревании. К ним относится, например, углекислородометрический метод Н. П. Ермакова, газово-любометрический метод, предложенный Г. В. Серебряковым, О. В. Эстерле, В. Е. Бочаровым и др.

Оценивая в целом состояние минералогических поисков по ореолам сопровождения, нужно отметить, что эта группа весьма эффективных поисковых методов разработана методически еще довольно слабо и используется неоправданно мало.

### **Поиски по вторичным минеральным ореолам изменения**

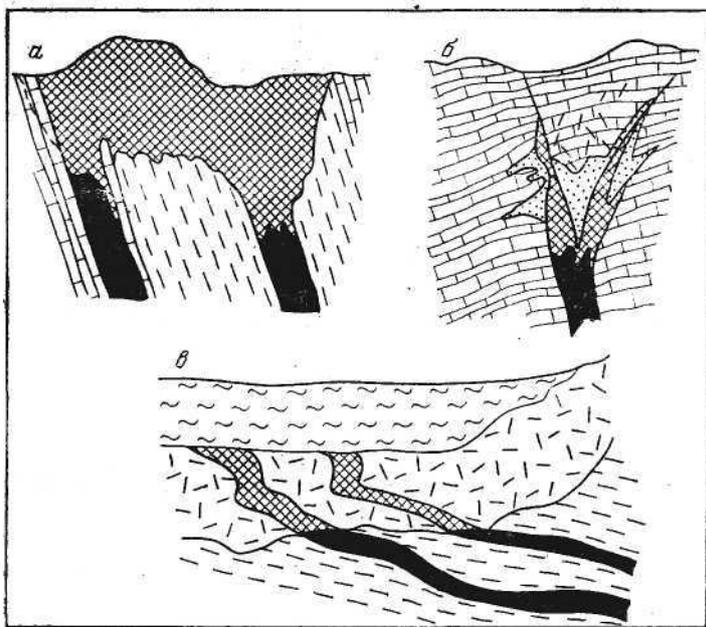
Минералогические аномалии, представленные комплексами эпирудных минералов-спутников, представляют собой ореолы пострудного геохимического изменения минеральных тел.

Для поисковых целей используется главным образом один тип вторичных ореолов изменения — зоны окисления. Эти зоны формируются в приповерхностных частях месторождений и поэтому доступны для прямого наблюдения; они достаточно контрастны и легко выявляются визуально; диагностика большинства минералов также может быть осуществлена с минимальным использованием лабораторных методов. Эпирудные минералы образуют более широкие окolorудные ореолы, чем синрудные минералы, и обеспечивают довольно высокую глубину и дальность поиска.

Минеральный состав вторичных ореолов представлен главным образом кислородными соединениями, преимущественно

сульфатами, окислами, карбонатами. Среди них резко преобладают водосодержащие минералы. Комплексы эпирудных минералов определяются составом синрудных комплексов, а поскольку хорошо известны условия формирования вторичных минералов (в частности, в зонах окисления), то по ним нетрудно предсказать характер и состав первичной рудной минерализации. Текстуры агрегатов в зонах изменения также наследуют особенности первичных текстур. Размеры вторичных ореолов при прочих равных условиях находятся в прямой зависимости от размера рудных тел, что позволяет прогнозировать масштабы первичной минерализации. Поскольку процесс гипергенеза руд, как, впрочем, и любой другой процесс их изменения, развивается стадийно и стадийность эта выражается зональностью вторичных ореолов изменения, то по структуре ореолов можно судить о том, насколько сильно разрушены первичные рудные тела и можно ли рассчитывать на вскрытие неизмененных руд.

Все эти обстоятельства свидетельствуют о высокой поисковой информативности вторичных ореолов изменения. По зонам окисления различных типов месторождений имеется обширная



**Рис. 72. Открытый, закрытый и погребенный вторичные ореолы гипергенного изменения:**

*a* — кварцово-трепеловая «шляпа» серных залежей (открытый ореол); *b* — англезит-целлулоситовая (штриховка) и смитсонитовая подзоны зоны окисления полиметаллической залежи (закрытый ореол); *v* — лимонитовая зона гипергенного изменения сидеритовых и мanganосидеритовых руд (погребенный ореол)

литература [50 и др.], что существенно облегчает планирование поисков и определение их методики.

При проведении поисков необходимо учитывать очень тесную зависимость развития процессов гипергенного изменения руд от целого комплекса факторов — литологии окружающих пород, рельефа, наличия насосов, структуры гидросети, климатических условий. Сочетание этих условий может быть благоприятным для формирования широкого ясно выраженного вторичного ореола и, наоборот, неблагоприятным, когда ореол оказывается закрытым или погребенным. Такие случаи показаны на рис. 72. Кроме того ореолы гипергенного изменения сами легко разрушаются, так как они сложены легкорастворимыми минералами. Поэтому нельзя проводить отбраковку аномалий, представленных эпирудными минералами, только на основании их размеров. Необходимо очень тщательный анализ топоминералогических данных и геологической ситуации.

Минералогические поиски по вторичным ореолам изменения, которые осуществляются главным образом визуально, целесообразно проводить в комплексе с другими методами, фиксирующими физические и химические поля, образованные вторичными минералами — с рН- и Eh-метрией, газовой съемкой, термометрией, микробиологической съемкой и т. п.

#### Поиски по вторичным ореолам рассеяния

Минералогические аномалии, представленные обломками и зернами рудных минералов и минералов-спутников или обломками их агрегатов, находящихся во вторичном залегании, известны в поисковой практике как вторичные ореолы или потоки механического рассеяния. Они образуются в результате физико-механического и химического разрушения рудных тел и сопровождающих их первичных ореолов, и механического выноса, и рассеяния в окружающем геологическом пространстве продуктов разрушения.

Агентами разрушения обычно являются сезонные и суточные колебания температуры, действие поровых вод, водная и ветровая эрозия и др. Агенты переноса — перемещение по склонам под действием силы тяжести, транспортировка временными и постоянными водными потоками, ветровой перенос, транспортировка ледниками и др.

В зависимости от различного сочетания агентов разрушения и агентов переноса и от геолого-минералогических особенностей разрушающихся месторождений, а также от особенностей географической среды, в которой происходит разрушение месторождения, характер рассеяния, как и форма и структура ореолов рассеяния, могут быть бесконечно разнообразны. Однако общая картина такова: в процессе механического разрушения минерального тела рассеивающиеся вокруг него продукты раз-

рушения образуют ореол или поток механического рассеяния, форма которого определяется анизотропией действия агентов рассеяния, вытянутость ореола совпадает с направлением преобладающего переноса, а масса обломков рудных и синрудных минералов на единицу площади ореола уменьшается с удалением от коренного выхода рудного тела (рис. 73).

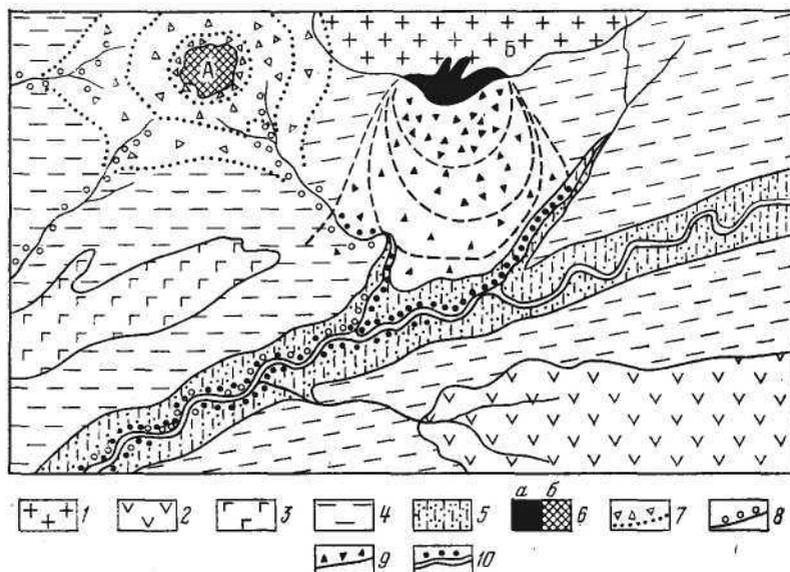
Можно выделить следующие главные типы ореолов, используемые при минералогических поисках: элювиально-делювиальные, аллювиальные (крупнообломочные, или галечниковые, и мелкообломочные, или шлиховые), валунно-ледниковые.

По форме и строению ореолы грубо классифицируются на концентрические (симметричные или асимметричные) с коренным месторождением внутри ореола, веерные (треугольные или трапецеидальные) с коренным месторождением в вершине треугольника или в малом основании трапеции, ленточные и линейные с коренным месторождением в начале ленты.

Общая методика поисков месторождений полезных ископаемых по вторичным ореолам рассеяния заключается в поисках обломков и зерен рудных минералов и минералов-спутников, в картировании площадей их распространения и в оконтуривании ореолов рассеяния, в установлении закономерностей изменения содержания минералов внутри ореола, в прогнозировании положения и вскрытии рудного тела. По характеру минеральных ассоциаций в ореоле рассеяния и по типоморфным особенностям минералов можно уже на первых этапах поисков сделать заключение о промышленном и генетическом типе разрушающегося месторождения.

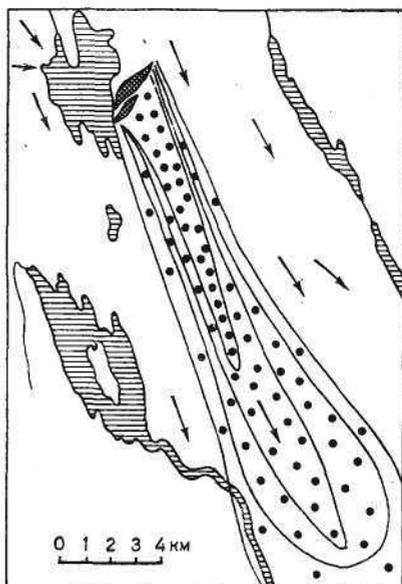
В настоящее время применяются следующие методы поисков по вторичным ореолам рассеяния: валунно-ледниковый, обломочный, галечно-речной, шлиховой. Эти методы довольно подробно охарактеризованы в учебниках и методической литературе, а также в литературе по их применению к поискам конкретных месторождений [например, 56]. Кроме того они освещались при характеристике специальных методов минералогического картирования. Здесь отметим лишь их главные особенности.

Валунно-ледниковый метод поисков заключается в поисках рудных ледниковых валунов, имеющих (судя по их минералогическим особенностям) один коренной источник, и в построении так называемого валунного веера (рис. 74), представляющего собой валунно-ледниковый ореол рассеяния. При поисковой интерпретации валунно-ледникового ореола, кроме анализа его формы и строения большое значение имеет учет всех данных, указывающих на пути ледникового переноса (геоморфологии, структуры ледниковых отложений, ледниковых шрамов и т. п.). Валунно-ледниковый метод может применяться лишь в районах, где валунные отложения имеют местное происхождение и материал перенесен не более чем на первые десятки километров.



**Рис. 73. Схемы формирования элювиально-делювиальных ореолов и потоков механического рассеяния:**

1 — граниты; 2 — порфириты; 3 — габбро; 4 — сланцы; 5 — аллювий; 6 — рудные тела месторождений А и Б; 7 — элювиально-делювиальный ореол месторождения А (концентрический); 8 — аллювиальный поток рассеяния месторождения А; 9 — элювиально-делювиальный ореол месторождения Б (веерообразный); 10 — аллювиальный поток рассеяния месторождения Б



**Рис. 74. Валунно-ледниковый веер сульфидного месторождения:**

1 — коренные рудные тела; 2 — находки рудных валунов; 3 — направление движения ледника по ледниковым шрамам; изолиниями показана относительная плотность распределения валунов на единицу площади

Таковыми областями являются Карелия, Кольский полуостров, острова Ледовитого океана, страны Фенноскандинавии, север Канады, горно-ледниковые районы. Этим методом были открыты месторождения полиметаллов, молибдена, меди и никеля, железа и др. В Канаде этот метод поисков называется глиаиофокусным и проводится с широким применением горных работ. В Финляндии и СССР для поисков рудных валунов эффективно используются служебно-розыскные собаки (хорошие собаки разыскивают на одной и той же площади в 3—5 раз больше валунов, чем геолог, причем они находят и обломки, погребенные в ледниковых отложениях).

*Обломочный метод поисков* фиксирует делювиально-элювиальные ореолы механического рассеяния, которые обычно более компактны и контрастны, чем все другие и более надежны для поисков. Однако поиски рудных обломков в делувии трудоемки и требуют применения горных работ.

*Галечно-речной, или обломочно-речной, метод* поисков основан на выявлении и прослеживании линейных элювиальных потоков рассеяния, представленных относительно крупными (от гравия до валунов) обломками рудных минералов и минералов-спутников. Технически он прост и заключается в маршрутных обследованиях долин рек и ручьев и в поисках рудных галек и валунов. Метод особенно эффективен в горных районах, с его помощью открыто большое число различных месторождений. В процессе поисков могут применяться горные работы и различные приемы концентрирования рудных минералов (грохочение, промывка и т. п.). В ряде районов, например на севере Восточной Сибири и на Дальнем Востоке, успешно применяется галечно-морской вариант этого метода, заключающийся в анализе распространения рудных галек на морских пляжах. Этот метод применялся нами при поисках флюоритовой минерализации на Новой Земле и при поисках янтаря на Югорском полуострове; в ряде случаев он оказался более эффективным, чем другие методы.

Шлиховой метод поисков как бы дополняет галечно-речной: мелкая фракция тяжелых минералов извлекается из аллювия путем ее концентрирования отмывкой шлихов. Кроме поисков и прослеживания аллювиальных потоков рассеяния этот метод, в последнее время все чаще используется для оконтуривания делювиально-элювиальных ореолов и россыпей. Метод является одним из старейших и детально характеризуется в специальных руководствах и в инструкциях по съемке и поискам. В настоящее время развитие метода осуществляется путем механизации и автоматизации процесса отмывки шлихов, повышения как достоверности и экспрессности диагностики минералов, так и поисковой информативности минералов шлихов. Главными методическими задачами, решаемыми в настоящее время, являются определение промышленно-генетических типов, масштабов и глу-

бины вскрытия разрушаемых месторождений по типоморфизму минералов шлихов, а также количественная оценка дальности переноса. Для некоторых типов месторождений эти задачи уже решены.

Эти же задачи актуальны и для всех других методов минералогических поисков по ореолам механического рассеяния. Обнаружение самих ореолов в методическом отношении не представляет большой трудности, точно так же как и оконтуривание ореолов, однако все эти операции требуют больших материальных затрат. Очень важно, следовательно, уже на первых этапах изучения найденного ореола понять, с каким типом коренных месторождений этот ореол связан и имеет ли смысл его полное оконтуривание и дальнейшее изучение. Только детальный анализ типоморфизма и индикаторных свойств минералов, образующих ореолы рассеяния, может дать ответ на этот вопрос.

### **Ревизионно-минералогические методы поисков**

К этой группе методов мы относим все работы, связанные с передиагностикой минералов из уже известных месторождений. Казалось бы, ревизионные работы мало что могут дать, но, на самом деле, оказывается очень много диагностического брака, связанного с неквалифицированным минералогическим изучением геологических объектов, так что их повторное изучение открывает совершенно новые перспективы.

Ревизионно-минералогические методы подразделяются на две группы — полевые и музейно-коллекционные.

Полевые методы предполагают дополнительное изучение и передиагностику минералов непосредственно на месторождениях, рудопоявлениях и других объектах, вызывающих сомнения по каким-то соображениям. Так, на очень многих месторождениях железа были обнаружены в промышленных количествах минералы редких элементов, в хромитовых и медно-никелевых — минералы благородных металлов.

Неожиданные открытия может дать тщательное изучение музейных и частных коллекций, кернохранилищ и складов образцов. Хрестоматийным стал пример открытия бокситов на Урале по обнаруженным в созданном еще Е. С. Федоровым музее в г. Краснотурьинске ранее неправильно диагностированных образцов бокситов. Вот как рассказывает об этом первооткрыватель бокситов Н. А. Каржавин в своей мемуарной книжке «Красная Шапочка», 1975: «...я провожу в музее целые дни и ночи. Из 50 000 внимательно просмотренных образцов отбираю 14 предполагаемых бокситных образований и высылаю их в химическую лабораторию... Непередаваемую радость испытал я, когда вскоре получил результат химических анализов по своим «подозрительным» образцам. Из 14 образцов 7 предста-

вляли бокситы наилучших мировых марок. . . И вот кружки с выявленными бокситовыми залежами стали в ряд через весь Богословский горный округ — от р. Сосьвы на севере до р. Туры — на юге. Выявленные месторождения принадлежат теперь известному всему миру Североуральскому бокситовому бассейну, являющемуся основной сырьевой базой алюминиевой промышленности Советского Союза».

Н. А. Смольянинов, ревизируя коллекцию П. К. Алексата, хранящуюся в Минералогическом музее АН СССР, открыл в образцах хризоколлы шеелит. Как оказалось, эти образцы были присланы в 1910—1912 гг. с Тянь-Шаня, где их собрал Н. С. Назаров. Н. А. Смольянинов доказал перспективность этого района на вольфрам, сам проводил поиски и в 1941 г. открыл именно там, откуда поступили шеелитовые образцы, крупный вольфрамовый рудный узел. Такие примеры многочисленны.

И сейчас музейные коллекции таят еще много загадок. Например, в Горном музее Ленинградского горного института красуется великолепная глыба окаменевшего дерева с красивейшей жеодой крупных кристаллов аметиста. Запись в этикетке очень скупая: «Аметист в дупле окаменевшего дерева. Вологодская область, река Тотьма»\*. Действительно, окаменевшая древесина в этом районе известна, но она не имеет товарного вида, а тем более нигде не найден в ней аметист. Музейный образец указывает на возможную аметистоносность этих образований, и установить точное место находки было бы очень полезным.

Ревизионно-минералогические исследования необходимо проводить на основе точной инструментальной передиагностики всех вызывающих сомнение минералов, но кроме нее весьма полезен предварительный просмотр ревизируемой коллекции или геологического объекта экспертом, обладающим хорошим диагностическим «чутьем».

Подводя итог обзору минералогических методов поисков месторождений полезных ископаемых, мы должны еще раз подчеркнуть их высокую эффективность и выразить сожаление в связи с их медленным развитием и все еще робким использованием в геологической практике. Каждый из методов дает наиболее надежные результаты лишь в определенных условиях, а максимальный поисковый эффект достигается при комплексном применении всех минералогических методов, а также методов геохимии и геофизики. Комплексование обеспечит получение весьма надежной поисковой информации, позволит дать правильную оценку найденных месторождений и наиболее правильно спланировать разведку.

---

\* В изданном каталоге (А. Э. Купффер. Минералогическая коллекция Горного института, Спб, 1911) записано: «Обр. 173<sup>а</sup>. . . ++ 63. Из болота в 40 вер. от город. Тальмы [видимо опечатка, Н. Ю.] Вологод. губ.: друза пирамидальных кристаллов в дупле окаменелого дерева» (с. 98). Два креста означают особую эффективность образца.

Наиболее легко комплексирование поисковых методов может быть осуществлено на базе комплексной геологической съемки, включающей как равноценные элементы минералогическое и геохимическое картирование и геофизическое изучение поисковой площади. В этих условиях можно объединить технические системы всех методов поисков и создать единую систему, включающую:

1) десантные исследования в наиболее интересных пунктах площади с широким использованием быстрых средств передвижения (вертолетные переброски, автотранспорт и т. п.);

2) маршрутные выборочные и сплошные площадные исследования с визуальными поисками;

3) пробоотборные операции, позволяющие собрать представительный материал для лабораторных исследований;

4) измерительные операции, позволяющие получать количественные данные о параметрах минералогических полей и аномалий;

5) горные и буровые работы, позволяющие получать минералогическую информацию на закрытых площадях.

Очевидно, что затраты на проходку горных выработок быстрее оправдывают себя, если эти выработки будут использованы для проведения всех видов опробования (геохимического, минералогического, петрографического). Одни и те же пробы целесообразнее подвергнуть различным видам анализов, чем проводить раздельное опробование. Информативность анализов при этом резко повысится.

## **МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МИНЕРАЛОПРОЯВЛЕНИЙ И МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

Поисковую задачу нельзя считать полностью решенной даже после открытия месторождения. Необходимо дать ему промышленную оценку, определить перспективы. Минералогические методы, как показывает практика, могут быть весьма эффективно использованы для оценки месторождений, в частности для установления генетического и промышленного типа месторождения, масштаба оруденения, определения уровня эрозионного среза минеральных тел, для технологической оценки руд. Они позволяют отбраковать заведомо непромышленные объекты и рекомендовать для разведки наиболее перспективные.

Определение генетического и промышленного типов оруденения. Как известно, промышленная ценность месторождений полезных ископаемых определяется условиями их формирования и только определенные генетические типы месторождений представляют промышленный интерес. Поэтому промышленные классификации, как правило, строятся на генетической основе и с определенным оттенком практицизма отражают генетическую типизацию. Если известны

генетический тип того или иного месторождения и условия его залегания, то можно отнести его к определенному промышленному типу и с высокой степенью достоверности предсказать его масштаб, технологическую характеристику и возможную экономическую ценность руд. Следовательно, очень важно определить генетический, а значит, и промышленный тип открытого месторождения или рудопроявления прежде, чем передавать его для разведки, и минералогические данные позволяют это сделать, особенно если их использовать в совокупности с геологическими данными.

Прямым и наиболее надежным критерием отнесения месторождения к определенному минеральному типу является состав парагенетических минеральных ассоциаций. Не может быть двух разнотипных месторождений, синрудные парагенезисы которых были бы одинаковы. И если подобная конвергенция все же имеет место, то либо неправильно определен минеральный состав и пространственно-временные взаимоотношения минералов изучаемого или эталонного месторождения, либо некорректна используемая генетическая классификация. Типовые минеральные ассоциации обычно приводятся в конкретных генетических классификациях и в специальной литературе; в обобщенном виде они даны в руководствах по генетической минералогии [23 и др.]. Для предварительной оценки (или как на дополнительный критерий) можно опираться на типоморфные минералы или на типоморфные особенности минералов. Например, присутствие в рудных метасоматитах реликтов кластогенных минералов может свидетельствовать об их формировании по терригенным осадочным породам; по изотопному составу сульфидной серы медно-никелевых месторождений можно сделать заключение об ее первоисточнике и определить возможность накопления в таких условиях промышленных концентраций сульфидов.

Надежную информацию о генетической природе месторождений дают минеральные ассоциации околорудных измененных зон, а также другие особенности первичных ореолов. По вторичным ореолам, которые наследуют ряд особенностей рудных тел и их первичных ореолов, также можно косвенно судить о генетическом типе первичного месторождения. Наиболее информативны в этом отношении зоны окисления [50].

Оценка масштаба оруденения. О возможном масштабе открытого рудопроявления можно косвенно судить по его генетической природе. Прямыми минералогическими показателями могут быть данные о количественном содержании полезных минералов в выходах и о размерах этих выходов, которые можно интерполировать на некоторую глубину и площадь и определять конкретными геологическими условиями. Кроме того, косвенными показателями масштаба первичного оруденения являются размеры и минералогическая плотность ореолов со-

проведения и ореолов рассеяния; естественно, что при прочих одинаковых условиях эти ореолы будут шире и контрастнее около более крупных и богатых рудных тел.

Определение уровня эрозионного среза рудных тел. Зная степень эрозионного вскрытия рудного тела или уровень подсечения его горными выработками, можно оценить перспективность месторождения на глубину. Решение этой задачи дает исключительно важные практические результаты, поэтому предпринимались весьма многочисленные попытки определять глубину эрозионного среза на месторождениях самых различных типов в разных геологических условиях.

В качестве индикаторов глубины при этих попытках использовались многие минералогические характеристики: ассоциации минералов, содержание отдельных минералов, морфология кристаллов, состав элементов-примесей в минералах, отклонения от стехиометрических соотношений катион — анион в сульфидах, спектроскопические, электрические, полупроводниковые и другие физические характеристики минералов, температуры гомогенизации и декрепитации включений, температуры минералообразования, величины давлений, определенные по другим минералогическим геотермометрам и геобарометрам, характер околожильных изменений и др. Очевидно, в основе всех этих многочисленных и, казалось бы, разнородных индикаторов глубины лежит единое явление вертикальной минералогической зональности минеральных (в том числе и рудных) тел. Выбор того или иного минералогического показателя, отражающего зональность (а таких показателей, очевидно, может быть бесконечное множество) определяется, с одной стороны, его чувствительностью к изменению глубины в условиях конкретного месторождения, а с другой — техническими возможностями его измерения.

Зависимость большинства минералогических характеристик от глубинного положения их носителей в минеральных телах имеет статистический, а не динамический характер, поэтому большая часть индикаторов глубинности (если не все) позволяет определять уровень среза рудных тел только качественно, в лучшем случае приближенно количественно.

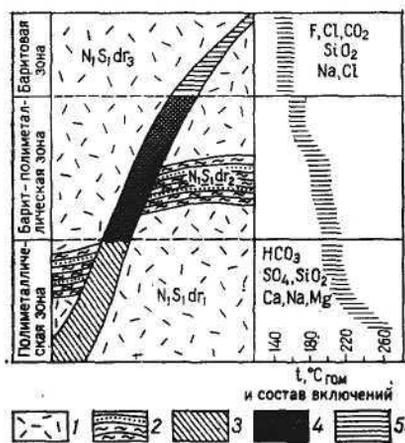
Наиболее простой и надежный метод — это определение уровня среза по характеру минеральных ассоциаций. Если для месторождений, аналогичных оцениваемому, характерна, например, следующая смена зон (снизу вверх): кварцевая → пиритовая → сфалеритовая → галенит-сфалеритовая → галенит-тетраэдритовая → галенит-баритовая → баритовая → киноваревая (такая зональность реализуется, в частности, в полиметаллических месторождениях района Вернерберга в Гренландии), то фиксация в поверхностных выходах рудного тела галенит-баритовой ассоциации свидетельствует о том, что обнажена самая верхняя часть рудного тела и основная часть его уходит на

глубину. В то же время обнажение руд со сфалеритовой ассоциацией показывает, что мы имеем дело с корневой частью рудного тела и оно малоперспективно. Поскольку картина вертикальной зональности с той или иной детальностью установлена почти для всех типов месторождений, ассоциативный критерий глубинности может использоваться широко и эффективно.

Очень хорошим индикатором глубинности гидротермальных месторождений являются температуры кристаллизации минералов, определенные с помощью подходящих методов минералогической термометрии. В общем случае температуры кристаллизации минералов одной и той же стадии минералообразования закономерно возрастают с глубиной (рис. 75). Например, поданным А. Г. Грановского, для полиметаллических месторождений Горной Осетии палеотемпературный градиент минералообразования варьирует в пределах 6—24 °С на 100 м. Аномально высокие температуры минералообразования указывают на глубокую околокорневую эрозию месторождения, аномально низкие — на сохранность почти всего тела. Если есть возможность получить палеотемпературные данные по двум-трем гипсометрическим уровням (например, по поверхностному выходу и горным

выработкам), то можно сделать количественный прогноз распространения оруденения на глубину. Таким же надежным индикатором глубинности являются и палеобарические данные.

Прежде, чем использовать ту или иную характеристику в качестве индикатора глубинности, необходимо установить ее зависимость от глубины на примере эталонных рудных тел или, если это возможно, по нескольким гипсометрическим уровням на оцениваемом рудном теле. Это наиболее ответственная и трудоемкая операция. При этом нужно иметь в виду, что далеко не все минералогические характеристики изменяются с глубиной направленно, в одну сторону. Зональность рудных тел по многим показателям является асимметрично - концентрической, и график изменения такого показателя с глубиной



**Рис. 75. Зональность майской рудной зоны (Закарпатье) и характер изменения температуры минералообразования с глубиной. По данным А. В. Лизнюра и Э. Л. Платоновой.**

1 — туфы (неоген, нижний сармат, нижне- и верхнедоробратовская свита); 2 — аргиллиты и песчаники (неоген, нижний сармат, среднедоробратовская свита); 3 — полиметаллическое оруденение; 4 — барит-полиметаллическое оруденение; 5 — баритовое оруденение

имеет вид асимметричной волны или серии волн. Такие показатели можно использовать только в совокупности с другими.

Рассмотрим в качестве примера кристалломорфологический критерий глубины эрозионного среза (разработано Н. З. Евзиковой, авторское свидетельство № 469109). Этот критерий широко используется при оценке месторождений касситерита, золота, киновари, кварца и др. Метод основан на анализе эволюционной зональности месторождений. Сущность метода заключается в установлении кристалломорфологического ряда, отражающего последовательную смену форм кристаллов в процессе развития минералообразования. Такие ряды мы показывали неоднократно в предыдущих главах. На рис. 25 приведен ряд касситерита, включающий пять морфологических типов (I—V), которые и использовала Н. З. Евзикова для оценки касситеритовых месторождений. В нем отражается статистическое омоложение начальной формы кристаллов касситерита, т. е. последовательное (во времени) вытеснение типа I типом II, затем типом III и так до типа V. Этот ряд реализуется в объеме рудных тел в виде кристалломорфологической зональности, для раскрытия которой морфологический анализ должен дополняться изучением анатомии индивидов.

Н. З. Евзиковой доказано, что горизонты наиболее продуктивного оруденения характеризуются кристаллами, оформленными наиболее плотными гранями, и сформулировано поисковое правило: «Ищите наиболее богатые руды по кристаллам рудного минерала с плотнейшими гранями». Для касситерита такими «продуктивными» типами являются кристаллы типов III, IV, соответствующие наиболее интенсивной оловорудной минерализации. Опираясь на эти закономерности, можно легко определить уровень эрозионного вскрытия рудного тела и прогнозировать положение наиболее продуктивных горизонтов. Если, например, в аллювиальных шлихах, фиксирующих поток рассеяния касситерита, резко преобладают кристаллы типа V с габитусными гранями форм  $\{hkl\} + \{hkO\}$  и дополнительными  $\{100\}$ , можно предполагать, что материал в поток рассеяния поступает из самых верхов разрушающегося коренного касситеритового месторождения, в котором самые богатые руды находятся глубже эрозионного среза, и месторождение характеризуется высокими перспективами. Этот ореол необходимо проследивать не жалея средств. И, наоборот, наличие в ореолах или коренных выходах рудных тел кристаллов типа I с габитусными формами  $\{111\} + \{hkl\}$  и дополнительной  $\{110\}$  свидетельствует о глубоком эрозионном вскрытии коренного месторождения и низких перспективах именно этого тела, хотя перспективы обнаружения в этом же районе более богатых руд остаются высокими. Количественная морфометрия кристаллов позволяет определить вертикальный кристалломорфологический градиент и давать более точную оценку вертикального размаха оруденения.

Рассмотренные приемы можно применять для определения уровня подсечения рудного тела скважинами или горными выработками, а также для решения других сходных задач. При этом необходимо учитывать горизонтальную кристалломорфологическую зональность, которая в общем развивается от зальбандов к центру рудной жилы подобно зональности снизу вверх, но в конкретных случаях может быть и более сложной.

При определении уровня вскрытия рудного тела и оценки его перспектив на глубину необходимо использовать по возможности более широкий комплекс минералогических индикаторов, а не ограничиваться каким-то одним, казалось бы, весьма надежным критерием. Например, для решения этой задачи на золоторудных месторождениях Восточного Узбекистана С. К. Смирнова и Т. И. Ясколко использовали комплекс признаков, включающий характер минеральных ассоциаций, морфологию, крупность и пробность золотин, типоморфные особенности кварца, включая его электронно-микроскопическую структуру, состав и кристалломорфологию пирита, палеотемпературные данные.

Технологическая оценка полезного ископаемого. Экономическая ценность полезного ископаемого и технологические свойства руд определяются главным образом их минеральным составом, свойствами минералов и текстурно-структурными особенностями, поэтому минералогическая информация является определяющей в технологической оценке полезного ископаемого. На ее основе в поисковую стадию могут быть предварительно решены важные проблемы, определяющие пути использования полезного ископаемого. Перечислим главнейшие из них.

1. Установление комплекса полезных минералов, включая главные и второстепенные, выявление общих пространственных закономерностей их распределения. Эти данные необходимы для изучения на разведочной стадии возможности комплексного использования руд и для решения вопроса об их селективном технологическом опробовании.

2. Выявление новых видов минерального сырья. В процессе поисков месторождений могут встретиться минералы, которые раньше считались непромышленными, а в данных условиях или вследствие их необычно высокой концентрации, или благодаря каким-то особым свойствам представляют серьезный практический интерес. Например, в результате вовлечения в промышленную сферу карбонатов стал использоваться как источник циркония ранее считавшийся редким и неперспективным окисел циркония — бадделит. То же можно сказать о ртутисодержащей сульфосоли — шватците, хлориде серебра — кераргиллите, сульфиде вольфрама — тунгстените, алюмофториде — криолите и многих других. Непромышленный ранее скородит в зоне окисления месторождения Тсумб в Намибии оказался ювелир-

ным. Многие «бесполезные» минералы, особенно редкие, имеют большую коллекционную ценность. Методические подходы к выявлению новых видов минерального сырья определены в интересной и полезной статье А. И. Гинзбурга «Выявление новых видов минерального сырья — важнейшая задача прикладной минералогии», 1980 г.

3. Определение новых путей использования полезных минералов. Детальное минералогическое исследование может открыть необычные свойства полезных минералов и определить совершенно новые пути их использования. Например, апатит, являвшийся традиционной рудой на фосфор, стал благодаря успехам в изучении его состава новым источником редких земель и стронция, халькопирит и борнит медистых песчаников — источником рения, сфалерит — источником ртути, кадмия, индия, германия.

Неправильное определение путей использования полезных минералов может неоправданно загубить весьма ценное месторождение.

4. Технологическая характеристика руд. Технологическая оценка месторождений требует большого объема специальных исследований, но на поисковой стадии она может быть дана на основе минералогических данных методом аналогий. За эталон сравнения принимается одно из разрабатываемых и хорошо изученных месторождений, представленное теми же минеральными типами руд, что и изучаемое месторождение. На основе аналогии минеральных типов руд можно с определенными допущениями рекомендовать и аналогичные процессы их технологической переработки. Если аналогии подыскать невозможно, тогда приходится проводить технологическое опробование и испытание наиболее широко представленных минеральных типов руд, хотя эта операция трудоемка и дорогостояща и более целесообразна не на стадии поисков, а на стадии разведки. Но если тем не менее ее приходится проводить, то нужна очень тщательная типизация руд, чтобы ограничиться минимальным количеством проб. Кроме прямого технологического опробования ориентировочное заключение можно сделать путем прогноза технологических следствий, наблюдаемых технологических закономерностей и свойств минералов. Такие методы, известные, как методы «бестехнологической оценки», разрабатываются сейчас в приложении ко многим видам минерального сырья.

В последнее время большое внимание уделяется использованию теоретического аппарата и методов онтогении минералов для решения минерально-технологических задач.

Создавая учение об онтогении минералов, Д. П. Григорьев видел как одну из областей ее практического приложения технологию минерального сырья. «Уже при дроблении и измельчении руд сказывается структура и текстура минеральных сростаний, т. е. онтогения агрегатов, а такие процессы обогащения или переработки, в которых имеют место смачивание, адсорб-

ция, адгезия, растворение или разложение и т. п., 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 кристаллогенезисе и всех прочих явлениях онтогении» [10].

Смысл применения онтогенических данных для технологических изысканий определяется рядом задач:

— выбором оптимальных условий раскрытия зерен полезного компонента (для этого недостаточно учитывать только размер зерен, определяемый гранулометрическим анализом, а необходим учет их формы, характера сростаний, особенностей границ, информацию о которых дает онтогенический анализ);

— оптимизацией технологического процесса с учетом неоднородности состава и свойств мономинеральных зерен (эта задача решается на основе анализа анатомии индивидов);

Имея онтогеническую характеристику руд можно выделить в них принципиально разные по обогатимости типы, можно предусмотреть ступенчатую систему измельчения с использованием различных технологий обогащения на различных стадиях. Скажем, первое измельчение раскрывает два типа агрегатов, которые разделяются гравитацией, затем второе измельчение только концентрата раскрывает зерна полезного минерала, отделяемого флотацией. Подобная схема реализуется, например, на некоторых фосфоритовых месторождениях.

В связи с этим многие технологи и минералоги предлагают разрабатывать онтогенические классификации руд, дополняющие текстурно-структурные. Впрочем, такие классификации существуют и применяются, правда, онтогения присутствует в них в весьма примитивном виде. Это, например, классификация А. Годэна, состоящая примерно из таких классифицированных единиц: 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. п. Есть и частные классификации для разных типов руд, например для фосфоритовых — классификация А. И. Смирнова и Н. Г. Фридмана. Очевидно, что замена их строго научными онтогеническими классификациями дает серьезный эффект. Это относится 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, камне-самоцветное и коллекционное сырье и т. п.), то учение об онтогении минералов уже давно стало тем теоретическим фундаментом, на котором строится рациональная технология их добычи и обработки.

На различных этапах технологической цепочки наибольшую ценность представляет различная онтогеническая информация.

1. Для рационального извлечения минеральных индивидов из минерального агрегата необходимо прежде всего знать строение этого агрегата, характер границ между минеральными индивидами.

2. Сортировка индивидов наиболее легко осуществляется по их внешним признакам, которые обуславливаются генезисом. Например, по форме кристаллов, по рисунку гранных скульптур можно безошибочно отобрать монокристаллы кварца, которые после облучения приобретут цитриновую окраску.

3. Раскрой кристаллов, извлечение из них блоков кристаллического материала с различными свойствами требует глубокого знания анатомии индивида. Это учитывается даже на самых начальных стадиях грубого раскроя. Гигантские кристаллы мориона из пегматитов разбиваются с помощью кувалды, и весь этот, казалось бы, разрушительный процесс направлен на подготовку пирамид нарастания тупых ромбоэдров, которые наиболее совершенны и пригодны для пьезоизделий. Предложенная коллективом минералогов (руководитель А. В. Скропышев) Горного института распиловка кристаллов кальцита с учетом их анатомии взамен раскалывания по спайности резко повысила качество изделий, позволила более экономно расходовать кристаллосырье и дала крупный экономический эффект.

4. Для облагораживания минеральных индивидов, повышения их качества (например, снятие дефектов, окрашивание или, наоборот, обесцвечивание и т. п.) необходимо, во-первых, подобрать такой процесс, такое воздействие, которое было бы для полезного качества созидающим, а это функция онтогении; во-вторых, надо предугадать, как кристалл прореагирует на это взаимодействие, как распределятся в теле кристалла результаты этого воздействия. Это тоже функция онтогении.

Заканчивая этот краткий обзор научных основ и методики минералогических поисков, хотелось бы еще раз обратить внимание на их высокую эффективность. Даже в современном, по сути дела в зачаточном состоянии, минералогические поисковые методы привели к крупным результатам при поисках месторождений алмазов, золота, платиноидов, редких и редкоземельных элементов, полиметаллов, флюорита, барита, киновари, поделочных и ювелирных камней и многих других полезных ископаемых, в том числе нефти и твердых битумов.

Призывая к резкому усилению внимания к минералогическим методам поисков и оценки месторождений полезных ископаемых, автор, однако, далек от мысли об их абсолютизации и должен подчеркнуть, что наиболее эффективными они могут быть лишь в комплексе с геологическими, геофизическими, геохимическими и другими поисковыми методами.

Топоминералогия, столетиями существовавшая как регионально-описательное, кадастровое минералогическое направление, начинает превращаться в последнее время в строгую научную дисциплину с собственными объектами и предметом исследования, с вполне определенными задачами, с конкретной теоретической и методической основой. Эта книга — первая обобщающая работа по теоретической, методической и практической топоминералогии. На ее страницах мы попытались проанализировать современное состояние топоминералогии как науки и состояние топоминералогических исследований, разработать общие теоретические положения и методические принципы топоминералогии, определить перспективы.

В книге большое внимание уделяется анализу существующих и разработке новых топоминералогических методик, но она не является ни методическим руководством, ни справочником. Общее состояние топоминералогических исследований еще не настолько удовлетворительно [48], чтобы можно было эффективно регламентировать даже основные методические операции. Наоборот, на современном этапе более целесообразны инициативный методический поиск в широких направлениях, опробование различных методических подходов с тем, чтобы создать хорошую экспериментальную основу для выработки наиболее рационального и информативного топоминералогического исследовательского комплекса. Именно поэтому в книгу включено много положений, имеющих постановочный характер и требующих детальной проработки. Это возможные пути дальнейших топоминералогических исследований. Однако в целом поля охвата и методы современной топоминералогии очерчены достаточно определенно.

Проведенный теоретико-методический анализ еще раз подтверждает неоднократно высказывавшуюся и нами, и многими другими минералогами мысль, что будущее минералогической науки и практики самым непосредственным образом зависит от развития топоминералогии, вносящей в учение о минералах геологическое содержание [48, 61]. А именно благодаря своей геологической сути минералогия и является самостоятельной наукой, а не представляет часть физики или химии кристаллов, относящуюся к кристаллам минералов.

Мы попытались отразить в этой книге четыре главные функции топоминералогии, определяющие ее содержание и ее положение в системе геологических наук. Первая и главная функция, которую можно назвать познавательной, заключается в систематическом минералогическом изучении нашей планеты и других космических объектов и в установлении пространственно-временных минералогических закономерностей, в том числе и закономерностей концентрации полезных минералов и

формирования минеральных месторождений. Вторая функция, научно-прогностическая, состоит в создании теории минералогического строения и минералогического развития Земли и космических минеральных систем, как органического компонента общей геологической теории. Третья функция, методическая, обеспечивает совершенствование единого комплекса методов геологических исследований. И, наконец, четвертая практическая функция топоминералогии направлена на создание научных основ металлогенического анализа, прогнозирования, минералогических методов поисков и оценки месторождений полезных ископаемых. Именно этими функциями и определяются современные тенденции развития топоминералогии, показанные в книге, хотя развитие это нельзя, к сожалению, признать достаточно энергичным и структурно гармоничным. Минералогия сегодня стоит перед необходимостью резкого усиления топоминералогических исследований, перехода их с инвентаризационного на качественно новый пространственно-временной теоретико-методический уровень.

Попробуем наметить более перспективные направления дальнейшего развития топоминералогии и определить круг узловых теоретико-методических и организационных проблем, требующих концентрации усилий для их скорейшего решения.

Задачей первоочередной важности, от решения которой главным образом зависит эффективность топоминералогических исследований, является задача дальнейшего развития общей теории и принципов топоминералогии, совершенствования и расширения ее методов. Современный методический аппарат топоминералогических исследований необходимо довести до высокой степени совершенства с тем, чтобы можно было его унифицировать и получать результаты, пригодные для сопоставлений. Сейчас же минералогическая информация о разных объектах, скажем о двух рудных месторождениях, оказывается настолько разноплановой, что невозможно провести их сравнительный анализ. Кроме того, унификация методов обеспечит преемственность топоминералогических знаний, возможность в полной мере использовать результаты работ предшественников.

Исключительно важную и трудную задачу представляет организация и проведение давно назревшего систематического топоминералогического изучения нашей страны и наиболее интересных рудоносных районов всей планеты. Оно не только приведет к новым открытиям, но и обеспечит наиболее существенный прогресс минералогической теории и практики. К сожалению, создавшееся сейчас положение нельзя считать удовлетворительным. Мы не располагаем какой-либо строгой программой последовательного минералогического изучения регионов, которая бы стимулировала совершенствование и расширение работ этого типа. Подобную озабоченность выражают многие минералоги, она отражена и в резолюции съезда Всесоюзного минера-

логического общества, состоявшегося в 1976 г. Очевидно, наступило время подвести итог современной минералогической изученности Советского Союза и разработать единую стратегию и тактику, единый план топоминералогических исследований. В ближайшие два-три десятилетия необходимо поднять минералогическую изученность хотя бы главнейших рудно-сырьевых регионов до среднемасштабного уровня. Для координации исследований было бы целесообразно организовать комиссии и советы по топоминералогии и минералогической изученности СССР при Академии наук СССР и Всесоюзном минералогическом обществе.

Интересный и принципиально новый материал, необходимый для раскрытия закономерностей минералогической структуры геологических регионов и минералогической эволюции Земли, может дать сравнительный анализ минералогических провинций и объектов другого ранга. В связи с этим необходимы поиски новых средств минералогической характеристики провинций и создание системы топоминералогических показателей, позволяющих проводить сравнение вещественного состава, структуры и особенностей развития минералогических провинций.

Главным методом топоминералогических исследований является минералогическое картирование, разработка и внедрение которого находится еще в самом начальном состоянии. В ближайшее время предстоит существенно усовершенствовать методику и технику картирования, обратив внимание в первую очередь на минералометрию как средство картирования. Для этого предстоит определить наиболее информативные минералогические показатели, улучшить методы изучения взаимоотношений между минералами и методы установления последовательности минералогенетических событий, разработать эффективные способы генерализации пространственно-временных минералогических данных. Крайне необходима разработка для целей топоминералогических исследований и минералогического картирования полевых приборов и полевых минералогических лабораторий.

Практическим выражением топоминералогических исследований является изучение закономерностей концентрации полезных минералов и создание научных основ металлогении и минералогических поисков месторождений полезных ископаемых. Минералогические методы внедряются в поисково-разведочную практику еще неоправданно робко, что объясняется не столько их методическим несовершенством, сколько неподготовленностью лабораторной базы полевых партий и экспедиций для применения этих методов и отсутствием квалифицированных кадров

полевых минералогов. Эти трудности могли бы быть сняты организацией опытно-методических минералогических партий при геологических управлениях и объединениях, специализированных на поисковой минералогии.

Усиление и расширение топоминералогических исследований, переход их на планомерную основу уже сейчас, а в дальнейшем еще в большей мере потребует подготовки соответствующих специалистов-минералогов, а также повышения квалификации полевых геологов и минералогов широкого профиля. В связи с этим, весьма актуальной становится задача создания обобщающих монографий, методических указаний и учебных руководств по топоминералогии и минералогическим поискам.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аристов В. В. Поиски твердых полезных ископаемых. М., Недра, 1975.
2. Барсуков В. Л., Назаров М. А., Тарасов Л. С. Минералогия лунного вещества.— Зап. Всесоюз. минерал. о-ва, 1979, ч. 108, вып. 1, с. 3—14.
3. Бауман Л., Тишендорф Г. Введение в металлогению—минерагенню. М., Мир, 1979.
4. Бродин Б. В. Основы крупномасштабных регионально-минералогических исследований (при анализе гидротермальной минерализации).— Зап. Всесоюз. минерал. о-ва, 1976, ч. 105, вып. 5, с. 588—597.
5. Вернадский В. И. Избранные сочинения. М., Академиздат. Т. II, 1955; т. III, 1959.
6. Вертушков Г. Н. Минералогическое картирование.— В кн.: Минералогия и петрография Урала. Свердловск, 1972, с. 2—12 (Тр. Свердловск. горного ин-та, вып. 86).
7. Власов К. А., Кутукова Е. И. Изумрудные копи. М., Академиздат, 1960.
8. Гинзбург А. И., Кузьмин В. И., Сидоренко Г. А. Минералогические исследования в практике геологоразведочных работ. М., Недра, 1981.
9. Григорьев Д. П. Онтогенез минералов. Львов, Изд-во Львовск. гос. ун-та, 1961.
10. Григорьев Д. П., Жабин А. Г. Онтогенез минералов. Индивиду. М., Наука, 1975.
11. Девдариани А. С. Код летописи Земли. Сер. Наука о Земле, № 2. М., Знание, 1978.
12. Дымков Ю. М. Урановая минерализация Рудных гор. М., Атомиздат, 1960.
13. Евзикова Н. З. Практический аспект кристалломорфологии касситерита.— Зап. Всесоюз. минерал. о-ва, 1972, ч. 101, вып. 2, с. 237—249.
14. Есикова Е. М., Жабин А. Г., Мухитдинов Г. Н. Минералогия и геохимия редких элементов Вишневых гор. М., Наука, 1964.
15. Жабин А. Г. Онтогенез минералов. Агрегаты. М., Наука, 1979.
16. Жильный кварц восточного склона Урала/Г. Н. Вертушков, Ф. Ф. Борисков, Э. Ф. Емлин и др.— Тр. Свердловск. горного ин-та. Ч. 1 и 2, 1969; ч. 3, 1970.
17. Ильин К. Б. Региональная металлогения СССР. М., Недра, 1974.
18. Каледонский комплекс ультраосновных щелочных пород и карбонатов Кольского полуострова и Северной Карелии (геология, петрология и геохимия)/А. А. Кухаренко и др. М., Недра, 1965.
19. Кепежинская К. Б. Статистический анализ хлоритов и их парагенетические типы. М., Наука, 1965.
20. Костерин А. В. Шляхominералогический и шликсгеохимический методы поисков рудных месторождений. Новосибирск, Наука, 1972.
21. Костов И. Генетические типы габитусов кристаллов.— Минерал. сборник Львовск. геол. о-ва, 1962, № 16, с. 75—90.
22. Красников В. И. Основы рациональной методики поисков рудных месторождений. М., Госгеолтехиздат, 1959.
23. Лазаренко С. К., Габінет М. Г., Сливко О. П. Минералогія осадочних утворень Прикарпаття. Львів, Вид-во Львівск. ун-ту, 1962.
24. Лазаренко Е. К., Сребродольский Б. І. Минералогія Поділля. Львів, Вид-во Львівск. ун-ту, 1969.
25. Ломоносов М. В. Полное собрание сочинений. Т. 5. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1954.
26. Ляхович В. В. Аксессуары минералы горных пород. М., Недра, 1979.
27. Методическое руководство по геологической съемке масштаба 1:50 000. Т. 1 и 2. Ред. А. С. Кумпан. Л., Недра, 1978.

28. *Минералогия* Донецкого бассейна. Ч. 1 и 2./Е. К. Лазаренко, Б. С. Павлов, В. И. Павлишин и др. Киев. Наукова думка, 1975.
29. *Минералогия* и генезис камерных пегматитов Вольни/Е. К. Лазаренко, В. И. Павлишин, В. Т. Латыш и др. Львов, Вища школа, 1973.
30. *Минералогия* Криворожского бассейна/Е. К. Лазаренко, Ю. Г. Гершойг, Н. И. Бучинская и др. Киев, Наукова думка, 1977.
31. *Минералогия* Прибайкалья. Путеводитель Байкальской экскурсии II-го съезда Международной минералогической ассоциации. Под ред. Б. М. Шмакина, Иркутск, 1978.
32. *Минералогия* Урала. Т. 2. М., Изд-во АН СССР, 1941.
33. *Минералы* Хибинского массива. Т. 1 и 2./Е. Е. Костылева-Лабунцова, Б. Е. Борущкий и др. М., Наука, 1978.
34. *Минералы* Рудного Алтая. Т. 1—3./Б. И. Вейц, Г. П. Долгов, Н. М. Петровская и др. Алма-Ата. Изд-во АН КазССР, 1957—1959.
35. *Минералы* СССР. Под ред. А. Е. Ферсмана. Т. 1. Самородные элементы. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1940.
36. *Минералы* Узбекистана. Под ред. С. Г. Бадалова; в 4-х т. Ташкент, Изд-во ФАН, т. I, II — 1975; т. III, IV — 1976.
37. *Неженский И. А., Рундквист Д. В.* Количественная характеристика зональности оруденения месторождений полезных ископаемых. Л., Недра, 1976.
38. *Овчинников Л. Н., Баранов В. Д.* Проблема стереометаллогении.— В кн.: *Проблемы металлогении и рудогенезиса*. Алма-Ата, 1974, с. 54—71.
39. *Основные принципы* составления металлогенетических и прогнозных карт/Е. Т. Шаталов, А. В. Орлова, К. В. Яблоков и др. М., Недра, 1964.
40. *Петровская Н. В.* О минералогическом картировании при изучении колчеданных месторождений Урала.— Тр. ЦНИГРИ, 1959, вып. 29, с. 13—28.
41. *Попов В. И.* К проблеме синхронизации в минералогии.— В кн.: *Материалы к минералогии Урала*.— Тр. Ильменского заповедника, 1976, вып. 13, с. 23—43.
42. *Попов В. А.* К модели гидротермального процесса на основе онтогенетических наблюдений.— В кн.: *Проблемы минералогии Урала*. Свердловск, 1976, с. 3—17. (Тр. Ильменского заповедника, вып. 14).
43. *Попов С. П.* *Минералогия* Крыма. М., ОНТИ, 1938.
44. *Ронесон Б. М.* Опыт применения парагенетического анализа при геологической съемке.— В сб.: *Минеральное сырье*, вып. 14, М., 1960, с. 65—126.
45. *Рундквист Д. В., Неженский И. А.* Зональность эндогенных рудных месторождений. Л., Недра, 1975.
46. *Севергин В. М.* Опыт минералогического землеописания Государства Российского. Т. 1 и 2. СПб, 1809.
47. *Семенов Е. И.* *Минералогия* Ловозерского щелочного массива. М., Наука, 1972.
48. *Сидоренко А. В.* *Геология — наука будущего*. М., Знание, 1964.
49. *Смирнов В. И., Еремич Н. И.* О минералого-геохимической зональности сульфидных рудных тел.— Зап. Всесоюз. минерал. о-ва, 1976, ч. 105, с. 598—616.
50. *Смирнов С. С.* *Зона окисления сульфидных месторождений*. М., Изд-во АН СССР, 1955.
51. *Степанов В. И.* О целях и методах при исследовании последовательности кристаллизации в минеральных агрегатах руд.— В кн.: *Исследования в области прикладной минералогии и кристаллохимии*. М., 1974, с. 3—10.
52. *Туровский С. Д., Ким В. Ф.* Методика и значение минералогической съемки.— Изв. АН КиргССР. Сер. ест. и техн. наук. 1960, т. 2, вып. 9, с. 85—106.
53. *Фекличев В. Г.* *Диагностика минералов*. М., Наука, 1975.
54. *Фекличев В. Г.* О минералогическом картировании и других пространственно-минералогических исследованиях.— В кн.: *Новые методы изучения условий формирования и закономерностей распределения горных пород, минералов и руд*. Элиста, 1978, с. 193—217.
55. *Ферсман А. Е.* *Избранные труды*. Т. 2. М., Академиздат, 1953.

56. Харькив А. Д. Минералогические основы поисков алмазных россыпей. М., Недра, 1978.
57. Чесноков Б. В. Относительный возраст минеральных индивидов и агрегатов. М., Недра, 1974.
58. Чесноков Б. В. Минералогическое картирование как метод оценки перспективности рудных районов (на примере Березовского рудного района на Среднем Урале).—В кн.: Минералогия и петрография Урала. 1975, с. 27—37. (Тр. Свердловского горного ин-та, вып. 106).
59. Шафрановский И. И. Очерки по минералогической кристаллографии. Л., Недра, 1974.
60. Юшкин Н. П. Теория и методы минералогии. Л., Наука, 1977.
61. Юшкин Н. П. Опыт среднемасштабной топоминералогии. Пайхойско-Южноновоземельская минералогическая провинция. Л., Наука, 1980.
62. Carte métallogénique des massifs des Voges et de la Forêt—Noire/ J. Agard, P. Fluck, W. Wimmenauer. *Git. Min. France BRGM*, n° 87, 1975.
63. Eyles V. A. Mineralogical mars as forerunners of modern geological mars.—*Cartogr. Journ.*, 1972, 9, N 2.
64. *Inventaire minéralogique de la France*./R. Pierrot, P. Picot, et al. Le Cantal, 1971, 112 p; Les Hautes—Alpes, 1972, 184; Le Finistère, 1973, 118 p; Les Alpes — Maritimes, 1974, 168 p; Les Côtes — du-Nord, 1975, 220 p; Le Tarn, 1976, 147 p; L'Aveyron, 1977, 223 p; La Haute — Garrone, 1978, 153 p.
65. Kratochvíl J. *Topografická mineralogie* Cech. Praha, 1957—1964, t. 1—7.
66. *Mineralogie* Československa/J. N. Bernard, F. Cech, A. Dudek, D. Hovorka. Praha, Academia, 1969, 396 с.
67. *Минералите в България*/И. Костов, В. Бресковска, И. Стефанова, Г. Н. Киров. София, Изд. БАН, 1964. 540 с.
68. Rădulescu D., Dimitrescu R. *Mineralogia topografica a Romaniei*. Ed. Acad. RSR, 1966, 376 p.
69. Smith A. F., Cook D. R. *Minerals of the United States*.—*The Mineralogical Record*, 1979, vol. 10, N 1, p.13—28.

Предисловие . . . . .	4
Введение . . . . .	6
<b>Глава I. Основные этапы развития и современное состояние топоминералогических исследований . . . . .</b>	<b>8</b>
Ранняя история топоминералогии . . . . .	8
Топоминералогические исследования в России . . . . .	10
Становление научной топоминералогии . . . . .	12
Минералогическая изученность СССР . . . . .	14
Топоминералогические исследования за рубежом . . . . .	18
Современное состояние и основные тенденции развития топоминералогических исследований . . . . .	20
<b>Глава II. Главные направления топоминералогических исследований</b>	<b>23</b>
Минералогия космических систем (космическая минералогия) . . . . .	24
Минералогия планет и астероидов . . . . .	28
Минералогия планетосфер . . . . .	30
Региональная минералогия . . . . .	41
Минералогия горных пород . . . . .	43
Минералогия минеральных месторождений . . . . .	48
Специальные топоминералогические исследования . . . . .	51
<b>Глава III. Задачи и структура топоминералогических исследований</b>	<b>53</b>
<b>Глава IV. Минералогическое районирование . . . . .</b>	<b>56</b>
Принципы минералогического районирования . . . . .	56
Понятие о минералогической провинции . . . . .	56
Иерархия минералогических регионов . . . . .	58
Минералогическое районирование СССР . . . . .	61
<b>Глава V. Комплексное изучение минералогии геологических объектов.</b>	
<b>Минеральный кадастр объекта . . . . .</b>	<b>61</b>
Цели, принципы и методы составления минерального кадастра . . . . .	63
Форма минеральных кадастров . . . . .	70
Сравнительный анализ минеральных кадастров . . . . .	71
<b>Глава VI. Исследование структуры, состава и свойств минералов . . . . .</b>	<b>81</b>
Обзор конституционных особенностей и свойств минералов . . . . .	82
Взаимосвязь конституции и свойств . . . . .	84
Методы исследования минералов и их применение в топоминералогии . . . . .	86
Топоминералогические задачи, решаемые на основе данных изучения конституции и свойств минералов . . . . .	88
Понятие об информативности свойств . . . . .	91
Вопросы обработки данных . . . . .	92
<b>Глава VII. Исследование пространственных и временных взаимоотношений между минералами и минеральными ассоциациями . . . . .</b>	<b>93</b>
Методические проблемы . . . . .	93
Онтогенетический метод изучения пространственно-временных взаимоотношений минералов . . . . .	95
Синхронизация и возрастная корреляция пространственно-разоб- щенных минералов . . . . .	102
	287

Выделение генераций минералов . . . . .	105
Пространственно-временные топоминералогические модели . . . . .	107
Пространственно-временные минералогические ряды . . . . .	112
<b>Глава VIII. Минералогенетические реконструкции . . . . .</b>	<b>114</b>
Качественные минералогенетические реконструкции . . . . .	114
Принципы количественных минералогенетических реконструкций . . . . .	119
Минералогенетические индикаторы . . . . .	121
Минералогенетические модели . . . . .	121
<b>Глава IX. Минералогическое картирование . . . . .</b>	<b>136</b>
Современное состояние минералогического картирования . . . . .	137
Элементы минералогического картирования . . . . .	144
Минералогические карты . . . . .	175
<b>Глава X. Стереоминералогия . . . . .</b>	<b>189</b>
Состояние стереоминералогических исследований . . . . .	190
Методы стереоминералогических исследований . . . . .	190
Методы генерализации стереоминералогических данных . . . . .	193
Стереоминералогическое прогнозирование . . . . .	198
<b>Глава XI. Топоминералогия и металлогения. Топоминералогическое прогнозирование . . . . .</b>	<b>203</b>
Взаимосвязь методов топоминералогии и металлогении . . . . .	206
Минералогическая информация на металлогенических картах . . . . .	209
Прогнозирование рудоносности и прогнозные карты . . . . .	212
<b>Глава XII. Минералогические поиски . . . . .</b>	<b>219</b>
Общие принципы поисково-оценочной минералогии . . . . .	222
Минералогические поисковые индикаторы . . . . .	227
Предпоисковое прогнозирование и определение поисковых площадей . . . . .	240
Минералогические поиски . . . . .	245
Минералогические методы оценки перспективных минералопроявлений и месторождений . . . . .	271
<b>Заключение . . . . .</b>	<b>280</b>
<b>Список литературы . . . . .</b>	<b>284</b>