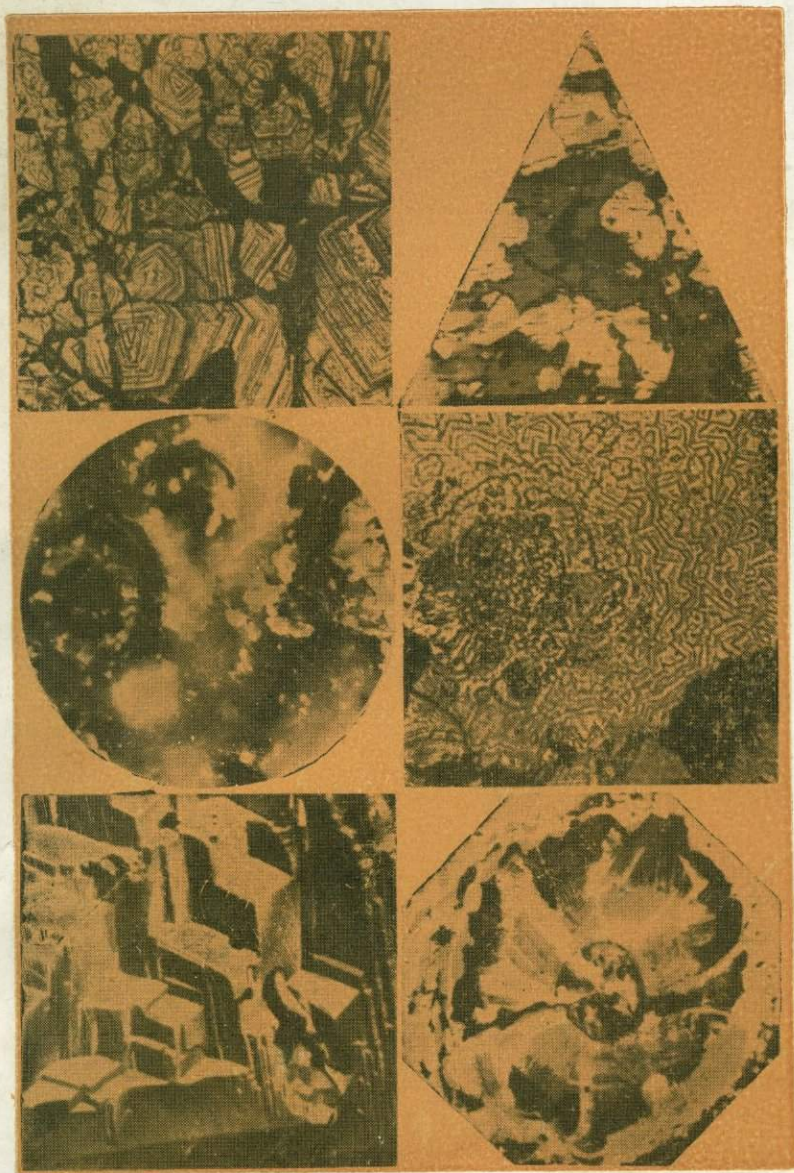


П.Я. ЯРОШ

# ДИАГЕНЕЗ И МЕТАМОРФИЗМ КОЛЧЕДАНЫХ РУД НА УРАЛЕ



ИЗДАТЕЛЬСТВО · НАУКА ·

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

УРАЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР

ИНСТИТУТ ГЕОЛОГИИ И ГЕОХИМИИ  
ИМ. АКАД. А. Н. ЗАВАРИЦКОГО

П. Я. ЯРОШ

ДИАГЕНЕЗ И МЕТАМОРФИЗМ  
КОЛЧЕДАНЫХ РУД НА УРАЛЕ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»

МОСКВА 1973



597  
765

Ярош П. Я. **Диагенез и метаморфизм колчеданных руд на Урале.** Издательство «Наука», 1973.

Работа представляет собой подробную сводку о метаморфизме колчеданных руд Урала.

Показано, что первоначально колчеданные руды отлагались главным образом в виде тонкодисперсных масс. В дальнейшем такие массы претерпевали *диагенетические изменения* и превращались в зернистые агрегаты сульфидов. После диагенеза руды вместе с вмещающими породами подвергались контактовому и региональному метаморфизму.

Для диагностики минералов применены *новые методики*, позволившие получить на давно изученных рудах оригинальные важные в научном отношении результаты.

Особо ценной является информация о фотолюминесценции сфалерита и радиоактивных двориках в рудных минералах.

Илл. 121. Табл. 3. Библ. назв. 305.

## ВВЕДЕНИЕ

Колчеданные месторождения Урала представляют большую и своеобразную группу эндогенных месторождений, широко развитых и в других частях нашей страны — в Карелии, Тянь-Шане, Западном Саяне, Бурятии, на Кавказе и т. д., а также за рубежом — в Канаде, Норвегии, Австралии, Испании, Португалии, Федеративной Республике Германии, Турции, Японии, Финляндии и других странах. Эти месторождения отличаются от других сульфидных месторождений комплексом определенных признаков (Иванов, 1955<sub>3</sub>).

В уральских медноколчеданных месторождениях содержится значительная часть запасов меди страны. Поэтому закономерно, что со стороны геологов упомянутым месторождениям уже давно уделялось и уделяется в настоящее время большое внимание.

Изучение уральских колчеданных месторождений связано с именами многих исследователей. Наиболее ощутимый вклад в познание этих объектов внесен А. Н. Заварицким (1927, 1936, 1941, 1943, 1950), С. Н. Ивановым (1937, 1939, 1943, 1947, 1959, 1960, 1962, 1964<sub>1,2</sub>, 1965), М. Б. Бородаевской (1962, 1963<sub>1,2</sub>, 1964<sub>1,2</sub>, 1965, 1966<sub>1,2</sub>, 1967, 1968, 1970), П. М. Замятиным (1929), Л. М. Афанасьевым (1939), Д. К. Суловым и М. И. Меркуловым (1932), А. А. Амраслановым (1934, 1935, 1937, 1955), Е. Е. Захаровым (1927; Захаров, Юшко, 1936), Т. Н. Шадлун (1941, 1942, 1947, 1949, 1950<sub>1,2</sub>), Г. Б. Роговером (1939), Е. К. Лазаренко (1947, 1953, 1954, 1955, 1958, 1959), В. П. Логиновым (1950, 1958), А. А. Филимоновой (1949, 1952, 1964), А. Д. Ракчевым (1956, 1962), Н. В. Петровской (1960, 1961<sub>1,2</sub>, 1962, 1963, 1964, 1968), Г. Ф. Яковлевым (1966, 1968), Г. Ф. Червяковским (1955, 1959<sub>1</sub>, 1962, 1964), И. В. Ленных (1959), В. А. Прокиным (1959, 1960, 1967) и многими другими.

История изучения упомянутых месторождений довольно четко делится на два периода. Первый период с 1860 г., когда в трудах Антипова появились научные сведения о месторождениях, до 1936 г. Второй период — с 1936 г. по настоящее время. Представления геологов в первый период сильно менялись по мере изучения месторождений и общего развития теории рудообразования. Так, В. Никитин в 1900—1906 гг. полагал, что Калатинское месторождение образовалось вследствие сравнительно высокотемпературного пневматолитового процесса. С 1908 по 1927 г. колчеданным месторождениям приписывалось гидротермальное мета-

соматическое происхождение в связи с интрузиями кислых гранитных пород. В 1927 г. А. Н. Заварицкий (1927) допускал, что колчеданные месторождения Урала есть результат инъекции сульфидной магмы типа остаточного расплава, способной производить метасоматические замещения вмещающих пород.

В 1936 г. А. Н. Заварицкий (1936) высказал новую гипотезу об образовании колчеданных месторождений Урала. Суть этой гипотезы, как известно, сводится к тому, что упомянутые месторождения образовались в начальный период развития уральской геосинклинали метасоматическим путем из минерализованных гидротермальных растворов, поступавших из магматических очагов, питавших вулканогенные комплексы вслед за их образованием. Впоследствии месторождения вместе с вмещающими породами были метаморфизованы.

Сопоставляя особенности колчеданных месторождений Среднего и Южного Урала, А. Н. Заварицкий указывал: «Решение вопроса о возможных позднейших влияниях на месторождения, об их возможном метаморфизме является ключем к их генезису» (Заварицкий, 1943, стр. 6). И далее: «Представление о влиянии метаморфизма на форму залежей было бы лишено почвы, если бы мы не имели в самом рудном веществе прямых указаний на динамические воздействия на это вещество» (там же, стр. 9). Из цитированного видно, сколь большое значение метаморфическим изменениям колчеданных месторождений придавал один из крупнейших исследователей нашей страны и что многие проблемы теоретического и прикладного характера, связанные с изучением указанных месторождений, неразрешимы без учета метаморфизма последних.

Работы А. Н. Заварицкого приковали к себе внимание многих геологов, и исследования были направлены на отыскание и раскрытие в самих рудах признаков, которые бы указывали на их метаморфизм. Были опубликованы результаты новых исследований, свидетельствовавших о том, что колчеданные руды после своего образования, особенно на Среднем Урале, претерпели метаморфические изменения (Иванов, 1950<sub>1</sub>; Шадлун, 1950 и др.). Однако не все геологи в то время разделяли мнение А. Н. Заварицкого и его сторонников. Одни защищали старые позиции, другие выдвигали новые варианты представлений о генезисе колчеданных месторождений. Например, А. В. Пэк (1948, 1950) высказал идею о том, что колчеданные месторождения на Урале образовались вследствие замещения рудой уже метаморфизованных и главным образом карбонатных пород (известняков). Обсуждение вопроса о генезисе указанных месторождений затянулось и приняло дискуссионный характер (Иванов, 1950<sub>2</sub>, 1957, 1959<sub>2</sub>; Червяковский, 1958<sub>1</sub>; Озеров, 1960 и др.).

За последнюю четверть века геологическая наука продвинулась далеко вперед. В частности, получили теоретическое освещение такие важнейшие вопросы: 1) связь подводно-гидротермаль-

ных месторождений с геосинклинальным магматизмом (Смирнов, 1965, 1968; Рослер и соавторы, 1971); 2) источником рудного вещества эндогенных месторождений (Смирнов, 1971); 3) причины образования гидротермальных рудных месторождений (Иванов, 1970); 4) роль метаморфических процессов в формировании земной коры (Винклер, 1969 и др.) и т. д. Исследования геологии дна морей и океанов дали ценнейшую информацию о глубоководных рудных осадках гидротермального генезиса (Батурин, 1971).

Перечисленные вопросы являются общетеоретическими, однако они имеют прямое отношение к изучению истории формирования рудных месторождений на Урале и, в частности, колчеданных.

Расширению и углублению знаний по геологии Урала способствовали работы Е. А. Кузнецова (1941), И. Н. Курека, Н. И. Навковника (1953), В. Н. Котляра (1965), А. В. Пейве (1947), И. А. Штрейса (1951), В. М. Сергиевского (1944, 1947, 1953, 1960<sub>1,2</sub>; 1963), Н. П. Хераскова и А. С. Перфильева (1963), С. Н. Иванова (1955, 1964<sub>1,2</sub>), С. Н. Иванова и В. М. Нечухина (1969), М. Б. Бородаевской (1963, 1964<sub>1,2</sub>; 1965, 1966<sub>1,2</sub>), Л. Н. Овчинникова (1963, 1965), Г. Ф. Яковлева (1968), В. А. Заварицкого (1950), А. А. Пронина (1959, 1960, 1962, 1963, 1965), Д. С. Штейнберга (1955, 1963<sub>1,2</sub>, 1964), И. Д. Соболева (1961, 1963), Г. А. Смирнова (1965), А. Д. Ракчеева (1956, 1962), Г. Ф. Червяковского (1959) и других исследователей. Перечисленные авторы внесли много нового в понимание вопросов металлогении, тектоники, магматизма, возраста и метаморфизма пород, строения рудных полей колчеданных месторождений на Урале и т. д. Большое значение имеют исследования В. И. Смирнова (1960, 1962, 1964, 1965<sub>1,2</sub>, 1967, 1968) и Г. А. Твалчредидзе (1966), в которых история развития уральской геосинклинали и в связи с этим особенности ее металлогении, время и место накопления колчеданных руд рассматриваются в более широком плане и в сравнении с развитием других геосинклиналей.

На Урале в целом, и, в частности, в зонах вулканогенно-осадочных комплексов пород, вмещающих колчеданные месторождения, территориальными геологическими управлениями выполнена большой объем поисковых и геологоразведочных работ, геологическими съемками, в том числе и крупномасштабными, покрыты большие площади. Начали разрабатываться недавно открытые месторождения (Гайское и другие). Таким образом, накопился новый и огромный фактический материал, расширились и конкретизировались представления геологов об истории развития уральской геосинклинали, о генетических связях колчеданного рудообразования с магматическими очагами, давшими накопления больших масс эффузивных и пирокластических образований в трогах геосинклинали на ранней стадии ее развития. Получены новые данные о закономерностях размещения колчеданных месторождений, их возрасте, факторах локализации, метаморфизме руд и т. д.

Геологи, изучающие колчеданные месторождения (может быть, за немногим исключением), признают в настоящее время, что эти месторождения генетически связаны с теми магматическими очагами, которые дали накопления вулканогенных комплексов в трогах уральской геосинклинальной области, однако конкретные связи во времени и пространстве разным исследователям представляются неодинаково. Так, В. И. Смирнов (1968), С. Н. Иванов (1964<sub>1</sub>), С. Н. Иванов и В. Н. Логинов (1965) и другие считают, что колчеданное рудообразование близко или одновременно с накоплением вулканогенных пород и происходит в субмаринных условиях в конце каждого или нескольких вулканических циклов всякий раз после излияния наиболее кислых лав, сменяющих основные и средние эффузивы. Колчеданные месторождения по этим авторам могут быть разделены на три группы: 1) эксгальационно-осадочные, 2) эксгальационно-гидротермальные, 3) гидротермальные плутонические. Для Южного Урала, по В. И. Смирнову, характерна вторая группа. По С. Н. Иванову и Г. Ф. Червяковскому (1964), на Урале есть и месторождения первой группы.

Пространственное размещение месторождений контролируется, по В. И. Смирнову и С. Н. Иванову, главным образом вулкано-купольными структурами.

М. Б. Бородаевская и другие геологи (1969), рассматривая закономерности размещения колчеданных месторождений на Южном Урале, отмечают, что главная масса колчеданных залежей приурочена к деформированным в различной степени вулканическим постройкам центрального типа.

И. С. Вахромеев (1969) и другие считают, что колчеданные месторождения, в частности, в Магнитогорском погружении, являются позднегерцинскими и сформировались после главной складчатости.

Близкой к изложенной точке зрения придерживается и Г. Ф. Червяковский (1962).

С. Н. Иванов (1959<sub>2</sub>) приводит данные, свидетельствующие о том, что колчеданные месторождения на Урале приурочены к крыльям антиклинальных поднятий. Г. Ф. Червяковский по этому вопросу пишет: «Однако, если обратиться к фактам, то оказывается, что на Среднем Урале не имеется ни одной бесспорной антиклинальной структуры» (1962, стр. 165).

Из приведенного видно, что исследователи не пришли к единому мнению по основным вопросам генезиса и закономерностей размещения колчеданных месторождений Урала. Это отрицательно продолжает сказываться на металлогенических обобщениях, прогнозировании и выделении новых площадей для поисков новых месторождений, разведке участков с колчеданными рудопроявлениями и доразведке уже известных месторождений.

Одной из главных причин такого положения дел является то, что изучение указанных месторождений связано с большими

трудностями, а эти трудности обусловлены метаморфизмом месторождений, на что давно указывал А. Н. Заварицкий и другие исследователи. В. И. Смирнов в работе, обобщающей опыт изучения колчеданных месторождений всего мира, так определяет значение метаморфизма колчеданных руд: «Соотношение колчеданного рудообразования с метаморфизмом руд и вмещающих пород является генеральной проблемой генезиса колчеданных месторождений» (1968, стр. 625). Д. И. Горжевский и В. Н. Козеренко, рассматривая вопросы металлогении метаморфогенных месторождений подчеркивают: «Вопрос о значении процессов метаморфизма в образовании и преобразовании месторождений полезных ископаемых важен не только с точки зрения происхождения руд этих месторождений, но имеет большое значение также для расшифровки закономерностей их размещения, т. е. для металлогении» (1965, стр. 198—199). Эти авторы также отмечают, что: 1) «В настоящее время вопрос образования и преобразования руд в связи с процессами метаморфизма находится еще в начальной стадии познания» (стр. 198); 2) «Вопрос о метаморфизме сульфидных месторождений является одним из наиболее сложных и дискуссионных в учении о полезных ископаемых» (стр. 219); 3) «Что касается признаков метаморфизма сульфидных руд, то они требуют чрезвычайно внимательных и тонких исследований» (стр. 219). Цитированное несомненно относится и к уральским колчеданным месторождениям.

Таким образом, из изложенного выше ясно, что одной из первостепенных задач сегодняшнего дня в проблеме колчеданных месторождений, в частности на Урале, является раскрытие и установление конкретных признаков метаморфизма колчеданных месторождений и относительного времени его проявления. Решение этой задачи имеет большое теоретическое и прикладное значение. Новые данные по метаморфизму руд колчеданных месторождений Урала будут иметь и более широкий смысл, так как Урал, как отмечалось выше,— важнейшая провинция колчеданного рудообразования не только в СССР, но и во всем мире. Кроме того, такие данные могут быть использованы хотя бы косвенно для расшифровки истории формирования руд неколчеданного типа.

Выше приведены работы ряда авторов, в которых метаморфизму колчеданных руд уделено большое внимание. Однако остался широкий круг недостаточно полно освещенных или не освещенных совсем вопросов, тесно связанных с историей формирования рудных агрегатов в колчеданных месторождениях Урала и с историей преобразования самих месторождений.

В настоящей работе излагаются результаты наших многолетних исследований руд уральских колчеданных месторождений. Исследования проводились целенаправленно с таким расчетом, чтобы получить новую информацию, которая бы последовательно и в деталях раскрывала цепь сложных явлений, связанных с изменением руд после того, как они были отложены. Знакомство

с опубликованными источниками и фондовыми материалами, а также наш собственный опыт показали, что сложные изменения руд, обусловленные в конечном счете метаморфизмом, могут быть расшифрованы и правильно поняты в том случае, если: а) наряду с обычными методами изучения руд будут применены новейшие методики, которые позволят обнаружить неизвестные или слабо изученные явления, значительно раздвигающие рамки наших представлений о жизни минералов; б) будут раскрыты особенности механизма диагенетических изменений руд, предшествовавших метаморфизму; в) с доступной детальностью и полнотой будут изучены последовательность и особенности изменений, связанных с диагенезом и метаморфизмом в главных рудных минералах — пирите, сфалерите и халькопирите; г) результаты изучения руд будут увязываться и сопоставляться с данными по истории геологического развития уральской геосинклинальной области и особенно с данными по геологии и структуре рудных полей отдельных месторождений. В соответствии со сказанным при изучении руд нами широко применялся электронный микроскоп, ультрафиолетовый свет и т. д. Уделено много внимания диагенезу руд, а также главным рудным минералам — пириту, сфалериту и халькопириту и нерудному минералу серициту. Параллельно с исследованием колчеданных руд мы изучали геологию и структуры рудных полей месторождений им. III Интернационала, Зюзельского и отчасти Карабашских.

Наши детальные исследования коснулись руд месторождений Тарньерского, им. III Интернационала, Зюзельского, Карабашских, Сибайского, Гайского, Блявинского и Комсомольского. Для сравнения изучались руды Чернушинского, Красногвардейского, Левихинской группы, Пьянко-Ломовского, Белореченского, Чадарского, Ольховского, Маукского, Учалинского, им. XIX партсъезда, Озерного, Молодежного, Александринского, Юбилейного, им. 50 лет Октября и Приорского, а также руды рудных участков Чусовского и Светлореченского в Полевском районе на Среднем Урале. Кроме того, нами получена небольшая информация по рудам месторождений Ахтальского, Алавердского, Тандзутского, Кафанского (Закавказье), Майкани, Атасуйской группы (Казахстан), Золотушинского (Алтай) и Озерного (Бурятия).

Учитывая направленность и специфику исследований, мы не останавливались специально на всех текстурно-структурных особенностях руд и полном списке рудных и нерудных минералов, которые встречаются в этих рудах. Эти вопросы широко освещены в литературе, а нами с той или иной детальностью освещались по ходу раскрытия механизма раскристаллизации тонкодисперсных масс сульфидов и других явлений.

Полученные нами результаты в значительной мере дополняют уже известную информацию по диагенезу и метаморфизму указанных руд и заново освещают многие вопросы в этом направлении. В частности, автором показаны: 1) механизм раскристал-

лизации тонкодисперсных выделений сульфидов простого и сложного состава; 2) причины образования резко выраженных зон роста I в зернах пирита; 3) природа брекчиевых и брекчиевидных текстур в рудах; 4) хрупкие и пластические деформации в рудных агрегатах 5) изменения главных рудных минералов — пирита, сфалерита и халькопирита; 6) широкие масштабы метасоматических замещений в рудах; 7) природа полосчатых текстур руд; 8) особенности и причины проявления фотолюминесценции сфалерита; 9) радиоактивные дворики в пирите, сфалерите и других минералах и генетическое значение таких двориков; 10) влияние на колчеданные руды контактового метаморфизма под воздействием интрузий гранитоидов, с которыми генетически связаны контактово-метасоматические месторождения железа и меди, а также динамического регионального метаморфизма, связанного с орогенной стадией развития Урала.

# I.

## КРАТКИЙ ОЧЕРК ГЕОЛОГИИ КОЛЧЕДАНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УРАЛА

Прежде чем приступить к изложению конкретного материала по диагенетическим и метаморфическим изменениям руд в уральских колчеданных месторождениях, необходимо остановиться на ряде общих и частных вопросов геологии этих месторождений.

Из обширной литературы, освещающей историю развития уральской геосинклинальной области, известно, что колчеданные месторождения в пределах последней приурочены к поясам зеленокаменных пород, которые представляют собой мощные толщи вулканических накоплений, выполнявших трогии палеозойской геосинклинальной области. Эти породы сильно дислоцированы и метаморфизованы. Выделяются четыре колчеданосных пояса зеленокаменных пород, которые вытянуты преимущественно вдоль восточного склона Урала на 2000 км. Основная масса месторождений и рудопроявлений сосредоточена в наиболее хорошо изученной западной полосе — Тагило-Магнитогорском прогибе.

Пояса вулканогенных пород формировались в течение длительной ранней стадии палеозойского цикла развития, охватывающей период от кембрия до нижнего карбона включительно. В. И. Смирнов отмечает, что «при этом интенсивность вулканической деятельности и сопутствующего ей колчеданного рудообразования смещалась с севера на юг и с запада на восток. В этих же направлениях уменьшается степень метаморфизма рудоносных пород и месторождений» (1968, стр. 592).

Колчеданные месторождения связаны с геосинклинальными вулканогенными комплексами базальтоидного магматизма и среди них с ранними субмаринными натриевыми сериями. Наиболее крупные из месторождений преимущественно приурочены к дифференцированным, в первую очередь к контрастно-дифференцированным комплексам (спилито-кварц-альбитофировой, диабазо-кварц-альбитофировой, диабазо-дацит-кварц-альбитофировой формациям).

Вулканогенные колчеданные толщи (натровые серии) отчлениваются по условиям формирования и металлогенической специализации от образований кали-натриевой серии. Колчеданосные толщи относятся к субмаринным достаточно глубоководным образованиям; сменяющие их в разрезе кали-натриевые серии характеризуются признаками мелководных фаций и с ними связано скарново-магнетитовое оруденение.

Генетическая связь колчеданного оруденения с ранними комплексами базальтоидного магматизма определяет приуроченность

колчеданных руд в целом к нижним частям (натриевая серия) и отсутствие их в верхних частях (кали-натриевые серии) отдельного малого цикла геосинклинального разреза, включающего последовательно проявляющиеся магматические ассоциации. Оруденение связано с дифференцированными натриевыми комплексами, сменяющими обычно самые ранние педифференцированные спилит-диабазовые ассоциации. В условиях длительного развития эвгеосинклинали ранние этапы и их циклы базальтоидного магматизма могут появляться в разных структурных зонах такой сложной области на неодинаковых возрастных уровнях. Колчеданные толщи в разных структурных зонах известны в венлоке и венлоке-нижнем лудлове (Тагильская зона), силуре и среднем девоне (Магнитогорская зона), среднем девоне (Восточно-Уральская зона), намюре (Иргизская зона). Причиной это может быть связано со смещением во времени заложения структурных зон и повторяемостью цикла базальтоидного магматизма.

Колчеданное рудообразование связано с региональным зеленокаменным метаморфизмом. Многие месторождения располагаются на границе фаций региональных изменений вмещающих толщ — хлорит-эпидотовой и пумпеллит-пренитовой.

Наблюдается связь колчеданных месторождений с ацверолитами — остатками древних подводных вулканических построек; последние отмечаются вдоль крупных тектонических зон и обычно характеризуются: а) накоплениями грубых обломочных пирокластических, иногда ингибритоподобных пород, пронизанных силлами, дайками, субинтрузиями; нередко в непосредственной близости встречаются красные радиоляриевые яшмы и более поздние биогермные известняки; б) блоковой синвулканической тектоникой; в) следами более позднего сжатия, приводящего к образованию «вулканических брахиантиклиналей».

Большинство колчеданных месторождений приурочено к участкам наибольших мощностей вулканогенных пород. Рудные тела чаще всего располагаются на контактах кислых пород и лав основного состава, среди перемежающихся лав и обломочных образований.

Многие исследователи отмечают, что колчеданные рудные тела на всем Урале залегают в общем согласно с вмещающими их породами и что околорудные изменения наиболее интенсивны со стороны лежащих боков месторождений. Из работ А. Н. Заварицкого, С. Н. Иванова и других авторов известно, что морфология колчеданных рудных тел находится в прямой зависимости от степени метаморфизма вмещающих пород, т. е. на Среднем Урале рудные тела, залегающие в своем большинстве среди кварцево-хлорит-серицитовых и кварцево-серицитовых сланцев, представлены уплощенными линзами с характерным пальцеванием на выклинках по простираанию; на Южном Урале, где вмещающие породы метаморфизованы слабее, а околорудные изменения менее значительны и в ряде месторождений, особенно со сторо-

ны висячих боков, проявлены крайне слабо или практически отсутствуют (Блява, Комсомольское), рудные тела морфологически более сложны и проявляют большую изометричность.

По многим наиболее известным и сравнительно хорошо изученным месторождениям конкретные сведения об их геологии, особенностях строения, характеристике руд приведем в работах ряда исследователей — А. А. Амирасланова (1934, 1935), Л. М. Афанасьева (1936<sub>1,2</sub>), М. Б. Бородаевской и соавторов (1965<sub>1</sub>, 1967<sub>1</sub>, 1970), С. А. Вахромеева (1948), И. С. Вахромеева (1965, 1967), Н. Е. Галдина (1961), Н. А. Горелова (1958), Г. Г. Гудалина и Ф. И. Ковалева (1951), Л. Д. Герман-Русаковой (1962), Л. Дюпарк и Б. Сигга (1914), А. Н. Заварицкого (1936), П. М. Замятина (1929), Е. Е. Захарова (1927), Е. Е. Захарова и С. А. Юшко (1936), С. Н. Иванова и М. И. Меркулова (1937), С. Н. Иванова и П. И. Егорова (1958), С. Н. Иванова (1947), Ф. И. Ковалева (1944), В. М. Крейтера и Г. Б. Роговера (1935), Е. К. Лазаренко (1947, 1953), В. П. Логинова (1950), В. В. Мерлица (1945), Ю. К. Озерова (1959), А. П. Переляева (1959), А. П. Переляева и Е. В. Праховой (1959), В. П. Первова (1958<sub>1,2</sub>), Ф. М. Поткина (1958), А. В. Пэка (1950), Н. В. Петровской (1961), Н. В. Петровской и соавторов (1960), Г. Н. Пшеничного и Т. Н. Шадлун (1962), А. Д. Ракчеева (1962), Г. В. Роговера (1939), В. И. Скрипиля (1961), Ю. М. Столярова (1965), Д. К. Сулова и М. И. Меркулова (1932), Стикнея (1915), Г. Ф. Червяковского (1958<sub>2</sub>), Т. Н. Шадлун (1942), Л. И. Яковлева (1959) и многих других.

## II.

### ДИАГЕНЕЗ КОЛЧЕДАНЫХ РУД

#### ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Термин «диагенез (диагенезис)», как известно из справочной литературы, означает процесс превращения осадка в горную породу. При этом различаются ранний и поздний диагенез. Рядом исследователей поздний диагенез принимается как синоним термина «эпигенез». Применительно к магматическим породам диагенез — это совокупность изменений, совершающихся в этих породах после их формирования и не связанных с выветриванием и метаморфизмом. В этом же смысле упомянутый термин применим и к рудам эндогенных и, в частности, колчеданных месторождений (Переляев, 1959; Смирнов, 1965; Петровская, 1967 и др.).

Установление характера изменений в рудах, после того как они были отложены, имеет большое значение в раскрытии истории образования месторождений. В. И. Смирнов указывает: «Ни одно месторождение полезных ископаемых не сохраняется в его первозданном виде, подвергаясь той или иной степени изменения после своего образования. Все месторождения проходят стадию диагенеза, т. е. превращения минерального осадка в минеральный агрегат. Большинство месторождений проходят и следующую стадию эпигенеза, характеризующуюся относительно слабым изменением состава и строения минерального вещества без резкой смены геологических условий нахождения тел полезных ископаемых» (1965, стр. 82). Уральские колчеданные месторождения, образовавшись в раннюю стадию развития геосинклинали от кембрия до нижнего карбона включительно, естественно, в течение последующего длительного геологического времени претерпевали изменения и преобразовывались. Если интенсивность колчеданного оруденения и вулканической деятельности в уральской геосинклинали, как отмечалось выше, смещалась с севера на юг и с запада на восток, и в этих же направлениях уменьшалась степень метаморфизма рудовмещающих пород и месторождений, то на Южном Урале следует ожидать, что, по крайней мере не во всех случаях, но в ряде районов месторождения до наших дней сохранили близкий к первоначальному облик, пройдя только стадию диагенеза и эпигенеза, не претерпев совсем метаморфических изменений или такие изменения проявлены в них слабо. В действительности так и есть, и это давно уже отмечено А. Н. Заварицким и другими исследователями.

К числу месторождений, в наибольшей степени сохранивших свой первоначальный облик, относятся Блявинское, Комсомоль-

ское, Сибайское, Яман-Касы и некоторые другие. Чтобы получить новую информацию и в деталях увидеть те изменения в рудах, которые обусловлены диагенезом, а не метаморфизмом, мы и обратились именно к первым трем из перечисленных месторождений. Руды месторождения Яман-Касы подробно описаны Т. Н. Шадлуном (1942).

## МАКРОПРИЗНАКИ ДИАГЕНЕТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ В РУДАХ

### Блявинское месторождение

Сведения о геологическом строении месторождения, а также о минералогическом составе и текстурно-структурных особенностях руд содержатся в ряде работ (Роговер, 1939; Герман-Русакова, 1962; Кропачев и др. 1968; Герман, Русакова, 1962; Чакраварти, 1966; Ручкин, Николайчук, 1968; Ручкин, Демин, 1969 и др.).

Разработка месторождения открытым способом дает возможность при дневном освещении одновременно наблюдать большие массы руды и вмещающих пород, что является определенным преимуществом сравнительно с наблюдениями в подземных выработках. И. С. Волинский (Крейтер и др., 1958) приводит небольшой список гипогенных минералов в рудах месторождения и разнообразие форм выделения преобладающего компонента  $FeS_2$ . Он указывает на обилие в рудах сажистого и скрытокристаллического дисульфида железа и считает главной особенностью руд Блявы и Сибая тонкодисперсный метаколлоидный характер структур.

При макроскопическом изучении блявинской руды в карьере (Северная линза) на глубинах 150—170 м от дневной поверхности видно следующее. В северной части рудного тела на его выклинивании преобладает серный колчедан с брекчиевой и брекчиевидной текстурами. Такие же текстуры наблюдаются висячем и лежачем боках рудного тела, что также отмечено и И. В. Волинским. Центральная часть рудного тела, особенно в местах наибольших его мощностей, сложена главным образом тонкодисперсным (землистая черная масса) дисульфидом железа. Между пиритной рудой и черной землистой наблюдаются постепенные переходы. Встречаются исключения — в ряде участков тонкодисперсная руда находится в непосредственном контакте с вмещающими породами.

Тонкодисперсная масса дисульфида железа не поддается надежному изучению под оптическим микроскопом в отраженном свете, так как из нее очень трудно приготовить представительные полированные шлифы. Строение такой массы обнаруживается под электронным микроскопом (рис. 1). Повсеместно в рудном теле упомянутая масса черной руды разбита трещинами, которые



1. Строение тонкодисперсной (землистой) руды. Реплика со скола. Блявинское месторождение, увел. 24 000



2. Контракционные трещины в землистой руде (черное), выполненные пиритом (светлое). Блявинское месторождение.  $\frac{1}{3}$  натур. вел.

выполнены крустификационно-колломорфным или зернистым пиритом, реже пиритом и кварцем (рис. 2). В. М. Крейтер и Г. Б. Роговер (1935) брекчиевидные текстуры в рудах считают результатом дробления. И. С. Волинский (Крейтер и др., 1958) интенсивную трещиноватость в рудном теле Блява объясняет дегидратацией тонкодисперсной рудной массы.

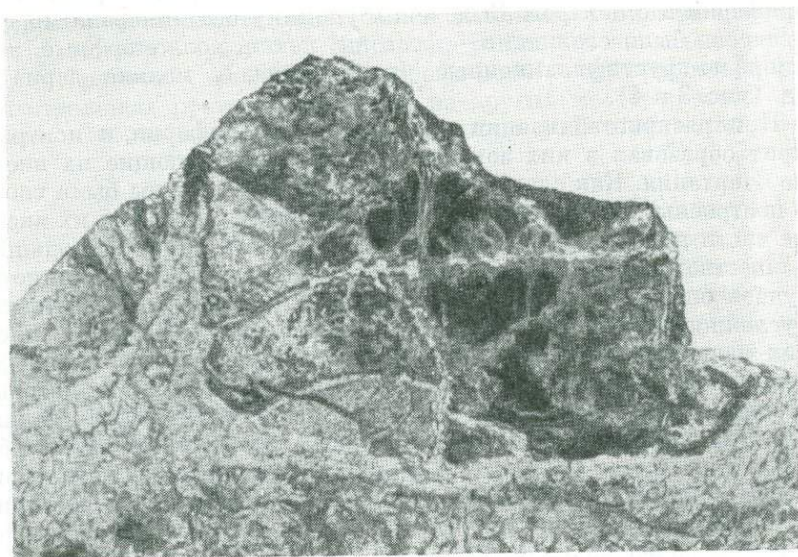
Трещины, пересекающие руду, не выходят за пределы рудного тела во вмещающие породы. На плоских поверхностях крупных глыб и в забоях видно, что трещины в руде образуют сетку, аналогичную той, которая возникает на поверхности усыхающей грязи и желатиновых пленок (Чухров, 1955; см. рис. 18). Отдельные ячейки сетки очень близко напоминают пчелиные соты. Если же брать не плоские поверхности, а пространство по трем координатам, то трещины, пересекаясь между собой, разбивают руду на изометричные полиэдры, размер которых от 0,5 м (редко больше) до десятых долей миллиметра в поперечнике, т. е. до размеров, едва заметных не вооруженным глазом (ниже будет показано, что полиэдры в руде наблюдаются и под микроскопом при больших увеличениях). В любых плоскостных срезах полиэдров (внешние их контуры) не образуют замкнутых многогранников, число сторон которых было бы больше шести.

Соотношения между различными системами трещин показывают, что сами трещины, а следовательно, и образуемые ими полиэдры, возникали в руде не одновременно. Вновь появившиеся трещины внутри ранее возникших полиэдров и разбивающие последние на более мелкие полиэдры в большинстве случаев не выходят за пределы первых. Представляется очевидным, что расчеты Хьюса (Hewes, 1948), выполненные для полигонов, образуемых контракционными трещинами на плоских поверхностях, применимы и для рассматриваемого случая.

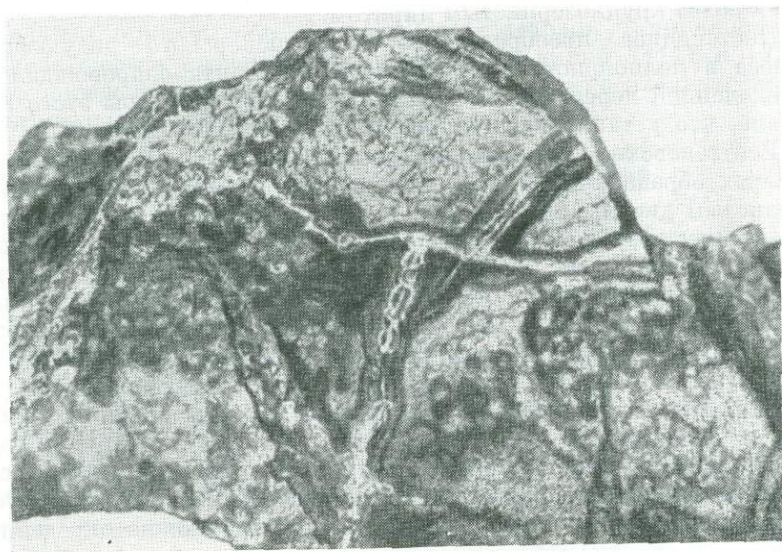
Сказанное свидетельствует, что упомянутые выше трещины обусловлены не тектоническими напряжениями, а являются контракционными, возникшими вследствие уменьшения объема тонкодисперсной рудной массы при ее раскристаллизации.

Раскристаллизация тонкодисперсного дисульфида железа протекала сложно и неравномерно как в масштабе рудного тела, так и в его небольших участках и даже в отдельно взятых полиэдрах. Прослеживаются постепенные переходы черной землистой массы в зернистые, колломорфно-зернистые агрегаты пирита; об этом свидетельствуют рис. 2 и 3. На рис. 2 пирит выделился только в трещинах, разбивших землистую руду на полиэдры с резкими очертаниями, на рис. 3 видно, что землистая руда более чем на 50% превратилась в агрегат зернистого пирита.

Раскристаллизация землистого дисульфида железа в пирит хорошо видна на отдельных полиэдрах. В последних устанавливаются важные детали и особенности указанного процесса. Макроскопически видимый пирит в полиэдрах появляется по пери-



3. Развитие пирита (светлое) в контракционных трещинах, пересекающих полиэдр землистой руды (черное). Блявинское месторождение, натур. вел.



4. Раскристаллизация тонкодисперсного дисульфида железа (черное), светлое — пирит. Блявинское месторождение, натур. вел.

ферии, в центральных частях во всем объеме, одновременно с периферии и с центров. Выделения упомянутого минерала морфологически были сложными — фестоны, почки, колломорфные, колломорфно-крустификационные (в трещинах), мелкие зерна и т. д. (рис. 3 и 4).

При раскristаллизации полиэдров от периферии к центрам, пирит образовал в них зоны или каймы, повторяющие их внешние очертания. Как следует из сказанного выше, зоны были сложно построены. По мере постепенного развития таких зон их внешние части превращались в агрегаты зернистого пирита с большим количеством пор и пустот и полостей отслаивания. В большинстве случаев описанный ход раскristаллизации полиэдров нарушался и усложнялся. Как указывалось выше, черная землистая масса в их центральных частях разбивалась новыми контракционными трещинами на более мелкие полиэдры (рис. 2 и 4), в которых в свою очередь начиналась видимая раскristаллизация. Мелкие полиэдры внутри крупных в дальнейшем разбивались на еще более мелкие и так до тех пор, пока тонкодисперсный дисульфид железа полностью или почти полностью превращался в пирит.

Раскristаллизация дисульфида железа протекала и таким образом: сравнительно крупные полиэдры разбивались тончайшими трещинками на очень мелкие части (тоже полиэдры). Они превращались в пирит более или менее равномерно (макроскопически). В результате в руде возникала своеобразная текстура, когда тонкозернистая масса пирита разбита трещинами, выполненными более крупнозернистым пиритом.

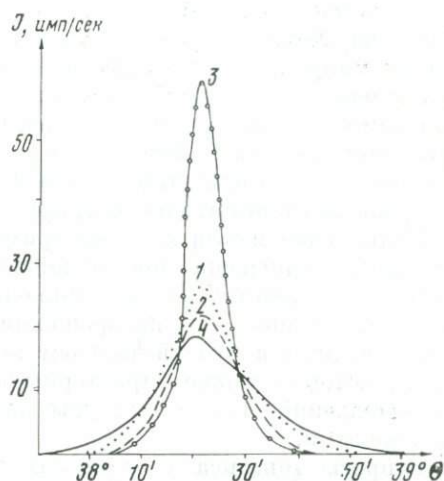
Постепенное преобразование тонкодисперсного дисульфида железа в полнокristаллический агрегат пирита сопровождалось определенной перестройкой кристаллической структуры этого минерала, что устанавливается рентгеноструктурным анализом.

Рентгеновские исследования выполнены А. А. Никуловой на четырех образцах пирита из Блявы. Обр. 1 представлен черным землистым дисульфидом железа, строение которого можно видеть только под электронным микроскопом (рис. 1). Обр. 2 — тонкозернистый пирит из трещинок, окружающих черные землистые полиэдры (рис. 3). Обр. 3 — крупнозернистый пирит из трещин в черной землистой руде. Обр. 4 представлен дисульфидом железа, в котором появились центры раскristаллизации. Во всех образцах изучался характер несовершенства кристаллической решетки пирита. Как было показано Патерсоном (Paterson, 1959), Гроссом и Патерсоном (Gross, Paterson, 1965), Гроссом (Gross, 1965), ширина дифракционных линий реальных кристаллов есть функция несовершенства их кристаллической решетки. При этом по характеру профилей дифракционных линий можно определить степень несовершенства структуры минералов.

На дифрактометре УРС-50И в железном  $K_2$  излучении методом счета импульсов были определены профили дифракционных линий (111) и (222). При съемке этих профилей была введена

поправка на инструментальное расширение линий (Stokes, 1948). Ширина указанных дифракционных линий всех образцов оказалась различной (рис. 5). Наименее размытой является линия обр. 3. Сравнение этой линии с профилями соответствующих линий отдельных кристаллов пирита из других месторождений показало, что она имеет минимальную ширину. Это обстоятельство

5. Профили дифракционной линии (222) в образцах пирита из Блявинского месторождения. 1—4 — номера образцов



позволило принять обр. 3 за эталон. Методом гармонического анализа формы профилей дифракционных линий (111) и (222) были определены размеры блоков мозаики и относительная величина микродеформаций решетки пирита (табл. 1).

Таблица 1. Размеры блоков мозаики ( $D$ ) и относительная величина микродеформаций ( $E$ )

Образец	$D$ , см	$E$
1	$(2,5-3,0) \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$
4	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$
2	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$0,5 \cdot 10^{-3}$

Приведенные данные показывают, что кристаллическая решетка пирита, представленного обр. 1, характеризуется весьма крупными блоками и значительными микронапряжениями. Образование такого пирита возможно при сравнительно быстром его выпадении из пересыщенного коллоидного раствора. Мелкие округлые частицы, представленные на электронной

микрофотографии, по размерам соответствуют блокам шпирита этого образца.

Напряженное состояние кристаллической решетки шпирита является метастабильным и с течением времени должно происходить снятие напряжений. Одним из способов снятия напряжений является разделение блоков мозаики на ряд мелких фрагментов, т. е. полигонизация. Уменьшение размеров блоков мозаики устанавливается в обр. 4, однако при этом в силу ряда причин (Сиренко, Хоткевич, 1962; Уманский и др., 1955) не происходит снятия микронапряжений. В дальнейшем даже при незначительных изменениях условий существования вещества (в первую очередь температуры) может начаться процесс рекристаллизации шпирита, сопровождающийся снятием остаточных напряжений, но величина блоков при этом не изменится. Такой этап структурных превращений в шпирите иллюстрируется обр. 2.

Блявинское месторождение примечательно тем, что на его рудах макроскопически прослеживаются многочисленные детали процесса раскристаллизации тонкодисперсного дисульфида железа и постепенного его превращения в зернистый серный колчедан. При этом в руде возникают широко распространенные текстуры, которые также характерны и для других южноуральских месторождений. Такие текстуры называют брекчиевидными, или брекчиевыми.

Вопросы генезиса упомянутых текстур в рудах уральских колчеданных месторождений неоднократно обсуждались в печати. Происхождение этих текстур разными авторами трактуется неодинаково. Мнения геологов сводятся к следующему: брекчиевидные и брекчиевые текстуры в колчеданных рудах возникали в результате замещения рудой обломочных пород (Иванов, 1947; Шадлун, 1950; Бетехтин и соавторы, 1964), при дроблении одного рудного агрегата и цементации другим рудным агрегатом, образовавшимся в более поздние стадии процесса рудоотложения (Вахромеев, 1955; Петровская, Касьянов, 1960; Петровская, 1961; Бетехтин и др., 1964) и как результат дробления вследствие усыхания кристаллизующихся телевых масс (Шадлун, 1954; Бетехтин и др., 1964; Ярош и др., 1969). Большинство исследователей признают, что брекчиевидные и брекчиевые текстуры в рудах колчеданных месторождений Урала обусловлены различными причинами, однако главными считаются первые две из трех перечисленных (Бетехтин и др., 1964, стр. 185).

Фактические данные, полученные нами при изучении руд Блявинского месторождения и приведенные выше, свидетельствуют, что одной из главных первопричин образования указанных текстур, является неравномерность раскристаллизации тонкодисперсных масс дисульфида железа.

Проведенные нами исследования на Блявинском месторождении позволили уяснить, как однородные тонкодисперсные массы дисульфида железа превращались в зернистые агрегаты серного

колчедана с брекчиевидной и брекчиевой текстурами. Однако не менее важно и необходимо знать, как изменялись тонкодисперсные, но сложные по составу сульфидные руды в указанном процессе, какие текстурные рисунки появились в них после раскристаллизации. На Блявинском месторождении карьером вскрыты преимущественно руды, представленные главным образом пиритом, марказитом и тонкодисперсным дисульфидом железа. Первичные сфалерит и халькопирит в таких рудах встречаются сравнительно в небольших количествах и почти всегда несут признаки гипергенного изменения. Каменный же материал (кern скважин) с нижних горизонтов месторождения, где встречаются в неизменном виде упомянутые два минерала, в настоящее время не доступен для исследования (руда быстро окисляется и превращается в сыпучую массу с большим количеством новообразований сульфатов). Поэтому, чтобы получить соответствующую информацию, мы обратились к рудам других месторождений, где в больших количествах содержатся сфалерит и халькопирит, не подвергавшиеся вторичным изменениям.

### Сибайское месторождение

Сведения о геологическом строении этого месторождения, характеристике руд и другим вопросам приведены в работах С. Н. Иванова (1947), В. А. Прокина и М. В. Рудакова (1959), В. С. Шарфмана и Т. П. Степанова (1971) и других исследователей. По И. С. Волинскому, руды Сибая в основных чертах похожи на руды Блявы. Этот исследователь, так же как и другие, подчеркивает исключительную пестроту и частую смену в пространстве тончайших структурных рисунков. Кроме того, он обращает внимание на то, что преобладающая масса этих руд представлена разнообразными типами метаколлоидных образований, характеризующихся: 1) крайне малыми размерами мономинеральных частиц или монокристаллов (обычно не превышающих сотых долей миллиметров) и 2) наличием тончайших (до субмикроскопических) смесей минералов в разных сочетаниях (Крейтер и др., 1958, стр. 174). В связи с этим И. С. Волинский заключает: «Установить последовательность кристаллизации минералов в описанных рудах пока не представляется возможным. Несмотря на значительное количество просмотренного под микроскопом материала, критерии относительного возраста минералов оказываются настолько неясными или противоречивыми, что создается впечатление близкой по времени кристаллизации всех компонентов руды. В связи с этим схема последовательности, приводимая С. Н. Ивановым, в частности, отмечаемые этой схемой четыре генерации серного колчедана, представляется необоснованной и неправдоподобной» (там же, стр. 176).

Руды упомянутого месторождения более кристалличны, нежели в Бляве. В этих рудах меньше кварца и значительно меньше землистого  $\text{FeS}_2$ . В них повсеместно (на верхних горизонтах, вскрытых карьером и доступных наблюдению) распространены брекчиевидные и брекчиевые текстуры. В ряде случаев такие текстуры заметны плохо, но в целом по месторождению они выражены четко. В серном колчедане в средней части рудного тела (линза 1) наблюдается тот же текстурный рисунок, что и в рудах Блявы, и прослеживается тот же механизм его образования. Здесь только вследствие более высокой степени кристалличности руды в ней больше пустот, стенки которых выполнены друзами кристаллов (пентагональные додекаэдры) пирита.

В рудах, где, кроме пирита, присутствуют в разных количествах сфалерит и халькопирит, картина сложнее. Встречаются следующие сочетания минералов в обломках и цементе:

Обломки	Цемент
Пирит (часто с заметными количествами кварца в центрах обломков)	Пирит, сфалерит (преобладает то первый, то второй), кварц, незначительные примеси халькопирита
Пирит и халькопирит (различные соотношения до преобладания второго)	То же
Сфалерит и пирит (первый резко преобладает над вторым)	Пирит, кварц, сфалерит
Халькопирит с незначительными примесями пирита и сфалерита	Пирит, сфалерит, халькопирит

В различных участках рудных тел может преобладать тот или иной вариант сочетаний минералов в обломках и цементе, однако по месторождению в целом встречается первый. Встречаются и такие участки, где обломки представлены всеми четырьмя вариантами, а цемент состоит преимущественно из пирита и подчиненных ему сфалерита, кварца и халькопирита.

Количественные соотношения обломков и цементирующего обломки минерального агрегата в рудах Сибая непостоянны. Иногда резко преобладают обломки над цементом, иногда наоборот.

Обломки, представленные серным колчеданом, часто имеют более или менее равномернозернистое строение, а центральные их части в той или иной степени обогащены кварцем. Однако есть и такие обломки того же состава, внутреннее строение которых в общем зональное (наружные зоны до деталей повторяют внешние контуры обломков), но довольно сложное. Отдельные зоны таких обломков представляют собой колломорфные, колломорфно-крустификационные обособления пирита. В таких обособлениях часты пустоты отслоения, стенки которых увенчаны почками пирита. В центрах колломорфных обособлений и почек нередко встречается сохранившийся от раскристаллизации тонкодисперсный (землистый) дисульфид железа. В некоторых облом-

как, наряду со сложным зональным строением в периферии, в центральных участках сохранился тот же землистый дисульфид железа (часто с кварцем), разбитый трещинками (выполнены пиритом) на мелкие полиэдры. Трещинки обычно не выходят за пределы землистой массы.

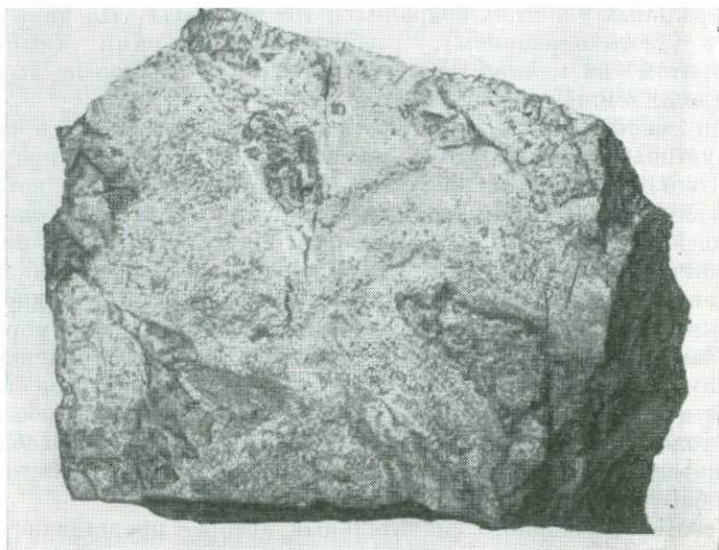
При сопоставлении многочисленных обломков серного колчедана устанавливается, что в прошлом все они были представлены тонкодисперсным  $\text{FeS}_2$ , при раскристаллизации которого возникал только что описанный сложный текстурный рисунок. При последующей перекристаллизации этот рисунок утрачивался.

Сложный текстурный рисунок наблюдается и в обломках существенно сфалеритовых. Благодаря такому рисунку видно, что обломки представляют собой крупные и мелкие колломорфные обособления, в которых тонкие зоны сфалерита перемежаются с такими же зонами пирита (рис. 6). Прослеживается постепенное исчезновение зонально-колломорфного рисунка в обособлениях только что отмеченного состава. Когда такие обособления становятся зернистыми, тогда они не отличаются от тектонических обломков.

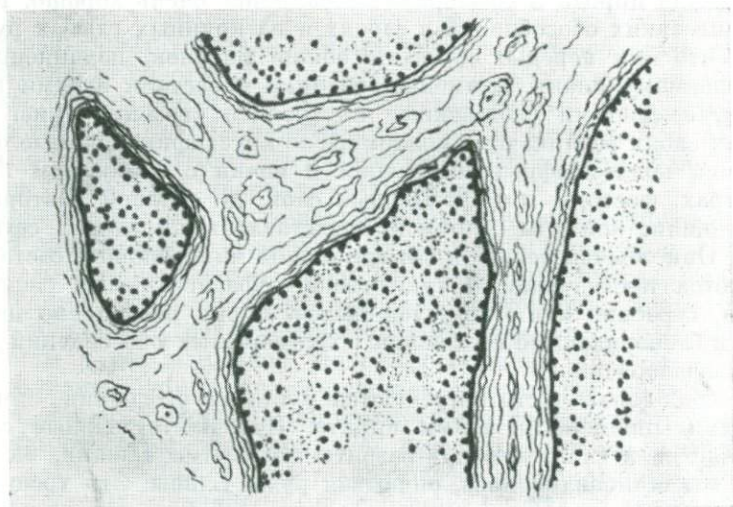
В свете изложенного значительный интерес представляет текстурный рисунок пирит-сфалеритовых агрегатов, цементирующих обломки разного состава, в частности серноколчеданные. Так же как и в обломках, в упомянутых агрегатах прослеживаются постепенные переходы от участков с зернистым строением к участкам, где почки, колломорфные, колломорфно-крустификационные обособления пирита и сфалерита сохранились очень хорошо. При изучении таких обособлений в забоях и на крупных глыбах руды видно, что они нередко образуют общий рисунок, подчиненный определенному плану, а именно, обломки обрастали слоями или зонами, имеющими сложнейшее внутреннее строение (рис. 7). В таких слоях различаются колломорфно-крустификационные обособления, колломорфные выделения и почки с землистым  $\text{FeS}_2$  в центрах, фестоны и т. д. Первые слои, до деталей повторяющие внешние контуры обломков, представлены пиритом и сфалеритом. Они обычно резко (в смысле смены минерального состава) сменяются последующими существенно сфалеритовыми слоями-зонами, строение которых усложняется, и они постепенно переходят в беспорядочные скопления колломорфных обособлений пирита и сфалерита.

В слоях-зонах часто встречаются пустотки отслоения, стенки которых выполнены почками пирита. Нередко отдельные слои или участки в слоях бывают разбиты системами трещин, на которых мы останавливались, описывая руды Блявы. Эти трещины обычно выполнены пиритом или пиритом и сфалеритом (колломорфно-крустификационные выполнения).

Таким образом, из приведенного материала видно, что в сплошных рудах Сибая как обломкам, так и цементирующему их минеральному агрегату, присущи одинаковые текстурные рисун-



6. Колломорфные обособления (темно-серое), представленные сфалеритом и в меньшей мере пиритом, сцементированные пиритом, Сибайское месторождение, натур. вел.



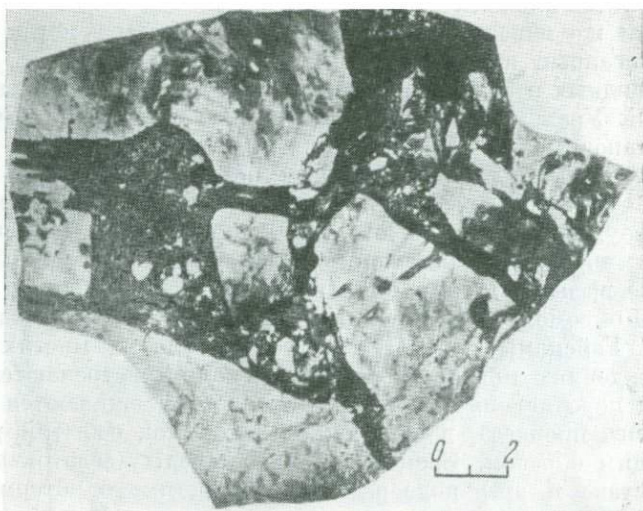
7. Зональное строение обломков пирита, сцементированных сфалеритом и пиритом. Около обломков пирита в цементе также видно зональное строение; отчетливо видны колломорфные выделения сфалерита и пирита. Сибайское месторождение. Зарисовка штуфа руды. Уменьшено в 5 раз.

ки, свидетельствующие об одинаковых условиях образования рудных агрегатов в целом.

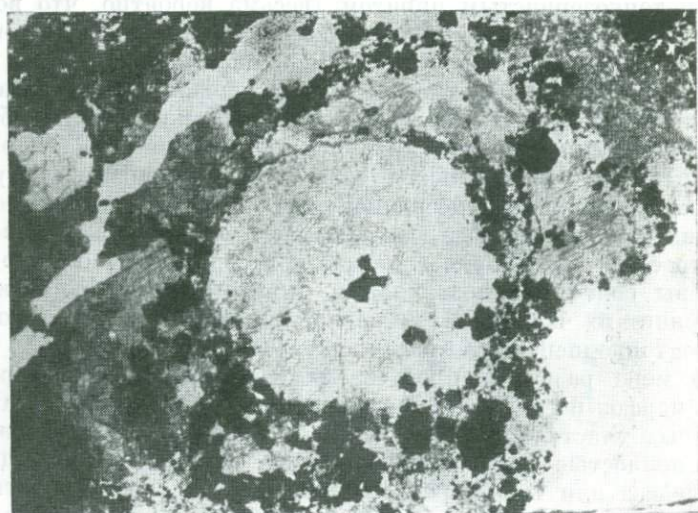
Каким же образом в рудах сложного состава могли возникнуть описанные явления? Выше было указано, что о генезисе брекчиевидных и брекчиевых текстур в рудах колчеданных месторождений Урала исследователями высказаны разные точки зрения. Остановимся на этих точках зрения подробнее.

1. *Замещение рудой обломочных пород.* Опубликованы данные, однозначно свидетельствующие о псевдоморфном замещении рудой фауны (Иванов и др., 1960), порфиритов (Ярош, 1963) и других пород. Метасоматические замещения обломочных пород рудой не вызывают сомнения (рис. 8 и 9). В Сибире, а также в Бляве, Комсомольском, Учалинском, им. XIX партсъезда, Юбилейном, Гайском, им. III Интернационала и многих других месторождениях признаки таких замещений встречаются часто. В рудах перечисленных месторождений прослеживаются все стадии такого процесса, в общих же чертах ход событий рисуется следующим образом. Брекчированные породы (эффузивы основного состава и др.) подвергались дорудному гидротермальному изменению, выражающемуся прежде всего в окварцевании и хлоритизации. Мелко продробленные и милонитизированные участки в породах подвергались окварцеванию в наибольшей степени, а в более крупных обломках значительно развивался хлорит. Именно такие обломки и начинали с периферии псевдоморфно замещаться тонкодисперсным дисульфидом железа или скрытокристаллическим и тонкозернистым пиритом (весьма вероятно, что во многих случаях пирит возник вследствие раскristаллизации тонкодисперсного дисульфида железа). Замещение обломков пород рудой было при этом избирательным, т. е. в начале процесса замещению подвергались только единичные обломки. Таким образом, в брекчированных зонах наряду с многочисленными хлоритизированными обломками пород оказались единичные или редкие псевдоморфозы и полупсевдоморфозы руды по этим обломкам. В таких псевдоморфозах довольно часто обнаруживается зональное строение. Периферические части псевдоморфоз обычно представлены более крупнозернистым пиритом, в то время как во внутренних их частях этот минерал тонкозернистый и часто переходит в тонкодисперсную массу дисульфида железа.

По мере развития процесса замещения количество рудных псевдоморфоз по обломкам пород все увеличивалось. Когда в тех или иных участках брекчированных зон все обломки были замещены полностью или почти полностью, тонкодисперсный дисульфид железа или тонкозернистый пирит начинали развиваться по окварцованному цементу брекчий. Отрезки времени, в течение которых происходило замещение пород рудой, естественно, определить трудно, однако такие отрезки были достаточными для того, чтобы ранние псевдоморфозы того же тонкодисперсного дисульфида железа и тонкозернистого пирита по хлоритизирован-



8. Выделение колчеданной руды (темно-серое) по продробленным участкам в органическом известняке (светло-серое). Месторождение им. XIX партсъезда, приполированный штуф



9. Замещение колчеданной рудой (черное) органических остатков — криноидей (центр фото). Проходящий свет, без анализатора, увел. 23. Шлиф изготовлен из штуфа (рис. 8)

ным обломкам пород изменили свой облик, пока заканчивался процесс замещения рудой окварцованного цемента брекчий. В указанных псевдоморфозах внешние контуры сохранились, сохранился, видимо, в основном и их объем, однако наряду с этим внутреннее строение псевдоморфоз стало иным. Тонкодисперсный дисульфид железа в них в значительной своей массе раскристаллизовался в зернистые агрегаты пирита, а тонкие зерна тоже раннего пирита значительно укрупнились. В результате одни псевдоморфозы утратили полностью или почти полностью прежнее зональное строение и выглядят однородными, а другие сохранили в своих центральных частях тонкодисперсный дисульфид железа, в котором видны контракционные трещины, выполненные кварцем. Таким образом, серноколчеданная руда, избирательно и псевдоморфно замещающая брекчированные породы, до деталей унаследует их текстурный рисунок. При этом ранние псевдоморфозы руды по обломкам пород представлены более крупнозернистым пиритом по сравнению с цементирующей их массой того же минерала и тонкодисперсным дисульфидом железа.

После того, как одни участки брекчированных пород заместились серноколчеданной рудой полностью, а другие только частично, следовало медное, медно-цинковое или цинковое оруденение, и продолжали выделяться тонкодисперсный дисульфид железа и пирит. Халькопирит и сфалерит по отдельности или в тонких сростаниях в первую очередь псевдоморфно замещали псевдоморфозы тонкодисперсного дисульфида железа, возникшие как по обломкам пород, так и по материалу, цементирующему такие обломки. Указанные минералы замещали и зерна пирита, причем сначала самые мелкие, а потом и более крупные. В зональных псевдоморфозах серного колчедана по обломкам пород халькопирит и сфалерит избирательно замещали зоны, сложенные скрытокристаллическим и тонкозернистым пиритом, а также центральные части псевдоморфоз, где сохранялся тонкодисперсный дисульфид железа.

Вследствие все того же избирательного замещения, но уже серного колчедана халькопиритом или сфалеритом в руде, рядом с частыми псевдоморфозами зернистого пирита по обломкам пород появились отдельные псевдоморфозы по этим псевдоморфозам, представленные тем или иным из упомянутых двух минералов или обоими вместе.

При наблюдениях в забоях рудников или в керне скважин руд, метасоматически развившихся по брекчированным породам, как псевдоморфозы серного колчедана по обломкам пород, так псевдоморфозы халькопирита или сфалерита, возникшие по этим псевдоморфозам, выглядят как типичные обломки руды в руде. Создается впечатление, что рудные тела, будучи уже сформированными, подвергались сильному дроблению.

Говоря о псевдоморфном замещении брекчированных пород рудой, следует иметь в виду, что при этом рудное вещество выде-

лялось главным образом в виде тонкодисперсной фазы, т. е., вероятнее всего, осуществлялся гелевый рудный метасоматоз. На возможность таких замещений Линдгрэн (Lindgren, 1915) указывал более 50 лет тому назад, а А. Н. Заварицкий об этом же писал в 1943 г. Ф. В. Чухров (1955), Н. В. Петровская (1969) и другие исследователи приводят данные о явлениях метасоматоза при участии коллоидных растворов.

Свидетельства гелевого метасоматоза встречаются не только в рудах. М. Б. Бородаевская и Н. К. Курбанов (1963<sub>2</sub>), М. Б. Бородаевская и А. И. Кривцов (1970) признаки указанного метасоматоза обнаружили во вмещающих колчеданные месторождения пород. Гелевый метасоматоз описан в современных сульфидных образованиях (Озерова и др., 1971).

Вследствие гелевого метасоматоза в Сибире, а также и в других южноуральских месторождениях, на месте обломочных пород возникали тонкодисперсные массы руды. Если замещение породы рудой было псевдоморфным, то вторая в общем унаследовала текстурный рисунок первой. Последующие диагенетические изменения, безусловно, сказались на руде, однако нередко упомянутый рисунок в ней сохранился до настоящего времени.

2. *Дробление одного рудного агрегата и цементация другими рудными агрегатами, образовавшимися в более поздние стадии процесса рудоотложения.* В большинстве колчеданных месторождений Урала наблюдаются признаки дробления руд вследствие динамического воздействия на них. На Среднем Урале такие признаки выражены четко и проявлены широко. В результате в рудах таких месторождений, как Карабашские и других, возникли своеобразные гнейсовидные текстуры (Ярош, 1964). Кроме того, в рудных телах часто встречаются трещины, выполненные теми минералами, которые входят в состав руд (жилки альбийского типа). Например, в Карабаше, в Южном месторождении рудные тела в отдельных участках разбиты трещинами, которые вертикальны или почти вертикальны и очень часто перпендикулярны к контактам рудных тел и к плоскостям сланцеватости во вмещающих сланцах. Это трещины разрыва. На стенках таких трещин выросли друзы кристаллов халькопиритов, реже халькопирита, сфалерита, кварца и теннантита. Размер кристаллов указанных минералов от нескольких миллиметров до трех и больше сантиметров в поперечнике. Образцы с такими друзами украшают витрины Уральского геологического музея. Однако дело не в этом. Трещины обычно не выходят за пределы рудных тел, а минералы в них встречаются только те, которые слагают рудное тело и которые по сравнению с пиритом, составляющим основную массу руды, легче переотлагаются.

В южноуральских месторождениях признаки динамического воздействия на руды проявлены гораздо слабее, а в некоторых из них такие признаки не обнаруживаются вовсе. В Сибире тектонические трещины встречаются. Они чаще всего выполнены сфа-

леритом, однако этот минерал переотложен из руд в эти трещины. Он резко отличается от основной массы сфалерита, входящего в состав руд. Об этом будет сказано подробнее при описании метаморфических изменений упомянутого минерала.

Если полагать, что в том же Сибее серный колчедан, выделившийся в ранние стадии оруденения, был раздроблен и его обломки сцементированы более поздним пиритом, сфелиритом, халькопиритом и нерудными минералами, то не совсем понятно следующее. Во многих участках рудных тел минеральные агрегаты, выделившиеся в более поздние стадии оруденения и цементирующие обломки серного колчедана, количественно преобладают над последними. Обломки серного колчедана в таких случаях разобщены между собой и как бы плавают в цементе. Каким образом такие обломки сохранили свое положение в пространстве, особенно в верхних частях рудных тел, почему они не опустились в нижние части последних? Естественно, что обломки серного колчедана не могли висеть в пустом пространстве, пока оно заполнялось минералами последующих за ранним пиритом стадий оруденения. Можно допустить, что пространство между крупными обломками серного колчедана было выполнено мелкими обломками того же состава, а в дальнейшем такие обломки заместились более поздними сульфидами, в том числе и пиритом. Однако, если обломки пирита (псевдоморфозы по обломкам породы) избирательно и замещались халькопиритом и сфалеритом, то признаков замещений пирита пиритом же не обнаруживается. Как в обломках, так и в цементе наблюдаются одни и те же текстурные рисунки. В том и другом случаях видны признаки раскристаллизации тонкодисперсных масс сульфидов.

В агрегатах сульфидов, цементирующих обломки серного колчедана, часто пирит преобладает над другими минералами и, в частности, над сфалеритом. Этот пирит нередко колломорфный, в нем встречаются реликты землистого дисульфида железа. Трудно допустить, чтобы такой пирит, а вместе с ним и тонкодисперсный дисульфид железа развивались метасоматически по зернистому серному колчедану, который в виде мелких обломков заполнял пространство между крупными обломками. Подобные явления исследователями нигде не отмечались и теоретически труднодопустимы.

Можно предположить, хотя к этому и нет оснований, что во время дробления серного колчедана в рудные тела внедрилась какая-то порода, которая цементировала обломки и впоследствии заместилась рудой. Но, во-первых, в окружающей геологической обстановке не видно следов такого внедрения, во-вторых, в самой руде нет реликтов этой породы и не устанавливаются следы ее замещения.

В свете рассматриваемого механизма образования брекчиевидных и брекчиевых текстур в колчеданных рудах еще более непонятны и противоречивы случаи, когда обломки представлены

существенно сфалеритом или халькопиритом и находятся рядом с серноколчеданными обломками, а цемент — агрегатом пирита и сфалерита, т. е. тем же агрегатом, который цементирует только серноколчеданные обломки и которому присущи уже описанные колломорфные и колломорфно-кристификационные текстуры. Эти обломки, так же как и серноколчеданные, разобщены в пространстве. Можно допустить, что руда, состоящая из серного колчедана, была раздроблена и сцементирована сфалеритом или халькопиритом, затем дробление повторилось снова, и уже обломки, разные по составу, были сцементированы сульфидами еще более поздних стадий оруденения. Но из сказанного видно, что один и тот же минеральный агрегат, выделившийся во вторую стадию оруденения, цементирует обломки этой же стадии и раздробленный серный колчедан самого раннего образования. Нет данных для того, чтобы можно было минеральный агрегат, цементирующий только обломки серного колчедана, отличить от минерального агрегата, выполняющего пространство между такими же обломками и обломками сфалерита и халькопирита.

Далее должны быть явные признаки дробления не только цемента, выделившегося во вторую стадию оруденения, а и серноколчеданных обломков, включенных в этот цемент. Таких признаков не устанавливается (мы не говорим о многочисленных полых трещинах в рудных телах, являющихся явно пострудными), если не считать двух случаев, которые не имеют отношения к рассматриваемому вопросу:

А. В рудах Сибая встречаются трещинки, пересекающие как обломки разного состава, так и цементирующий их материал, такие трещинки выполнены, как уже отмечалось, чаще сфалеритом или другими минералами. Однако таких трещинок очень мало, чтобы о них говорить как о факторе, обусловившем обломки сфалерита и халькопирита в руде.

Б. Кроме случаев, когда минеральный агрегат, цементирующий серноколчеданные обломки, преобладает над последними, встречаются участки в рудных телах, где наблюдается обратное явление. В таких участках видно, что цементирующий обломки материал выполняет и трещины, секущие обломки. Не часто, но отмечаются и такие факты, когда и обломки серного колчедана и пересекающие их трещины, выполненные пиритом и сфалеритом (колломорфно-кристификационное выполнение), пересекаются новыми трещинами. Последние выполнены теми же пиритом и сфалеритом. Такие трещины обычно соединяются с ранними более крупными слоями, состоящими из только что упомянутых минералов, являясь их непосредственными ответвлениями. Описанное явление отмечено раньше нас Н. В. Петровской (1962<sub>2</sub>; см. рис. 9). Сопоставляя наши данные и рисунки Н. В. Петровской, можно видеть, что сетка, образуемая трещинами, не может быть объяснена как результат дробления руды вследствие тектонических напряжений. Это сетка, образуемая

пересечением контракционных трещин, возникших при общем сокращении объема рудной массы при ее раскристаллизации.

Приведенные факты сами по себе интересны, однако их нельзя использовать для того, чтобы объяснить, как сфалеритовые и халькопиритовые обломки оказались сцементированными тем же минеральным агрегатом, который выполняет пространство и между серноколчеданными обломками и в котором не видно следов дробления, а также пластических деформаций.

Как следует из сказанного, объяснение механизма образования брекчиевидных и брекчиевых текстур в колчеданных рудах путем дробления вследствие проявления тектоники ранее выделившегося серного колчедана и цементации его обломков сульфидами поздних стадий оруденения не увязывается с наблюдаемыми фактами.

3. *Образование брекчиевидных и брекчиевых текстур вследствие усыхания кристаллизующихся гелевых масс.* Из приведенной литературы видно, что главными причинами образования упомянутых текстур в колчеданных рудах исследователи считают только что рассмотренные выше. Т. Н. Шадлун (1954<sub>2</sub>) высказывает ряд важных положений.

1. Брекчиевые текстуры, занимающие значительное место в первичных неметаморфизованных колчеданных рудах, возникли благодаря массовому старению гелей, влекущему значительное сокращение объема и в связи с этим дробление. Обломки, как правило, тут же крустифицируются теми же минералами, которые слагают главную массу руд.

2. Помимо текстур, образующихся в начальные стадии формирования руд из одного раствора, есть брекчиевые текстуры, возникшие в конечные стадии формирования и отложения минералов из остаточных растворов, которые по составу отличаются значительно. Примером такого типа текстур может служить брекчия руды, сцементированная баритом, или кальцитом, или кварцем. Брекчирование происходит вдоль крустификационных зон или полос, образовавшихся при кристаллизации гелевых масс.

3. Все данные, относящиеся к строению почковидных агрегатов сложного состава, свидетельствуют об одновременном (в одну стадию) выделении минералов, слагающих эти агрегаты. Отложение минералов из остаточных растворов на конечных стадиях формирования первичных руд нередко может создать ложное впечатление наложения новых фаз оруденения.

И. С. Вольтский (Крейтер и др., 1958), проводивший исследования руд Блявинского и Сибайского месторождений, пришел к следующим выводам: 1) золото в рудах более или менее распределено равномерно; 2) видимого под микроскопом золота в рудах не обнаруживается, но находится в них в тонкодисперсном состоянии; 3) слагающие руду минералы находятся в столь тонких и своеобразных сростаниях, что невольно создается впечатление одновременности их выделения из коллоидного раствора.



10. Обтекание пирит-сфалеритовой рудой линзообразных обломков серного колчедана (центр фото). Южное месторождение (Карабаш).  $\frac{1}{5}$  натур. вел.

П. М. Татаринов и П. А. Строна (1967), рассматривая особенности месторождений, связанных с вулканогенными формациями, отмечают, что быстрый лавинообразно развивающийся процесс рудоотложения исключает возможность фракционирования растворов и отлагающегося из них материала.

Проведенные нами исследования позволили получить новую информацию, которая в значительной мере дополняет уже известные фактические данные и свидетельствует о том, что выводы Т. Н. Шадлун, И. С. Вольнского, П. М. Татаринова и П. А. Строна верны. Руды южноуральских колчеданных месторождений выпадали из коллоидных растворов, которые, вероятнее всего, возникали из пересыщенных истинных растворов в местах резких перепадов давления и температуры. После выпадения руды представляли собой гелеподобную массу, которая образуется и в настоящее время на дне морей и океанов (Батурин, 1971). Эта масса в процессе диагенеза раскристаллизовывалась. В такой массе вследствие уменьшения объема появлялись контракционные трещины, которые выполнялись минералами, входящими в состав первоначально отложенных тонкодисперсных руд.

При раскристаллизации гелеподобных рудных масс происходила дифференциация вещества. Первым выкристаллизовывался пирит, как количественно преобладающее минеральное вещество в системе, имеющее наибольшую силу кристаллизации, затем пирит, сфалерит и халькопирит, в более поздние стадии процесса

раскristаллизации — сфалерит, халькопирит и пирит. И, наконец, в конечные стадии превращения тонкодисперсного вещества в кристаллические руды выделялись нерудные минералы — барит, ангидрит, кварц и кальцит.

Расчленение контракционными трещинами гелеподобных рудных масс на полиэдры, неравномерность раскristаллизации этих масс и их дифференциация обусловили в рудах образование брекчиевидных и брекчиевых текстур. Такие текстуры в рудах южноуральских месторождений развиты широко.

Указанная причина образования брекчиевидных и брекчиевых текстур является одной из главных. Однако такие же текстуры возникают в рудах и вследствие метасоматических замещений брекчированных пород рудой, о чем было сказано выше.

Выводы относительно генезиса указанных текстур справедливы и для месторождений Среднего Урала. Реликты брекчиевидных и брекчиевых текстур, то отчетливые, то с трудом распознаваемые, довольно часто встречаются в рудах этих месторождений. Например, на Левихе X текстурные рисунки в отдельных участках рудных тел очень близки к таким же рисункам в Сибаяе и даже в Бляве. В Карабаше, на III Интернационале, в Кабане V и других месторождениях крупные и мелкие обломки, представленные существенно пиритом, вследствие интенсивных динамических воздействий на руду, приобрели линзообразную форму и обтекаются пирит-сфалеритовым или пирит-сфалерит-халькопиритовым агрегатом, приобретшим четкое полосчатое строение (рис. 10).

#### РЕЗУЛЬТАТЫ МИКРОСКОПИЧЕСКОГО ИЗУЧЕНИЯ РУД МЕСТОРОЖДЕНИЙ БЛЯВИНСКОГО, СИБАЙСКОГО И КОМСОМОЛЬСКОГО

Мы подробно остановились на фактах, наблюдаемых макроскопически и свидетельствующих о раскristаллизации тонкодисперсных рудных масс. При этом осветили и механизм образования наиболее распространенных в колчеданных рудах Южного Урала брекчиевидных и брекчиевых текстур.

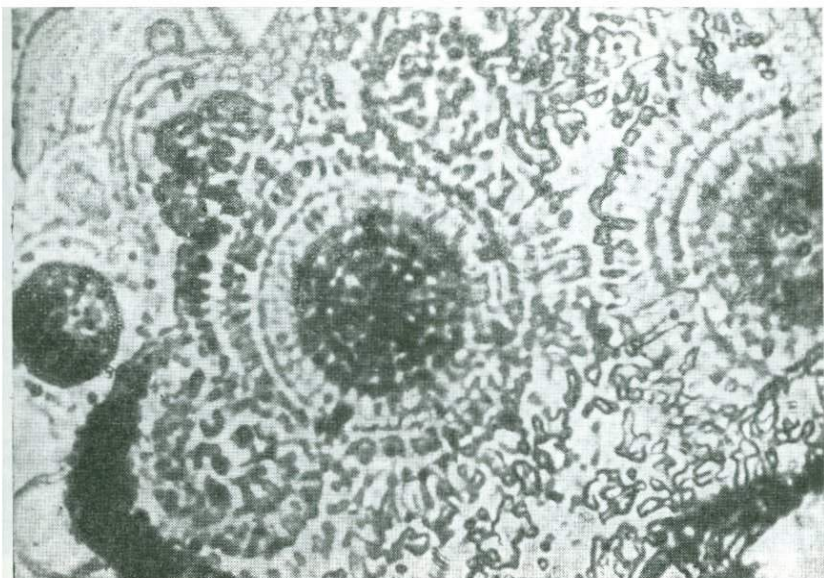
Рассмотрим теперь результаты микроскопических исследований, которые дополняют и подтверждают макроскопические наблюдения руд Блявы и Сибая. Следует оговориться, что Л. Д. Герман-Русакова (1962) считает тонкодисперсные руды Блявы результатом гипергенных изменений. Поэтому мы изучали под микроскопом не только руды упомянутых месторождений, но и руды месторождений Комсомольского и отчасти Яман-Касы. Руды последних двух объектов необходимо было исследовать потому, что в отличие от руд Блявы в них отсутствуют признаки окисления и вторичного обогащения (на Комсомольском месторождении руды для изучения взяты с глубин 400—952 м),

помимо пирита, они содержат заметные количества сфалерита и халькопирита. Кроме того, и это очень важно, оба месторождения залегают в аналогичной с обстановкой Блявы геологической обстановке (особенно Комсомольское, расположенное от Блявы на юг в 2,5—3 км), их руды тонкодисперсные и мелкокристаллические, в них не обнаруживаются признаки наложения динамометаморфизма.

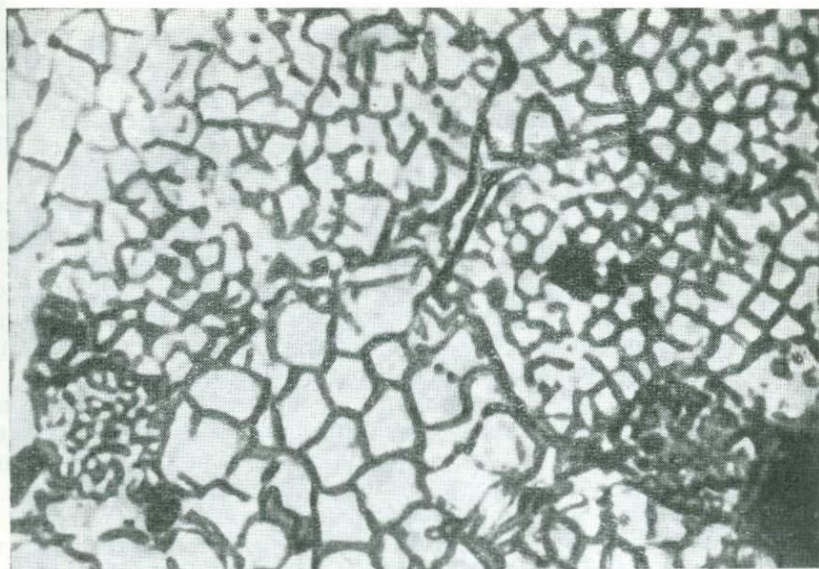
На рис. 1 показано строение дисперсной массы дисульфида железа в Бляве. Видно, что основными структурными единицами, слагающими руду, являются мельчайшие округлые тельца. Они объединяются в цепочки и агрегаты, а последние в ряде случаев приобрели уже форму зерен с нечеткими контурами. На приведенном рисунке отображен только один нюанс начала процесса раскristаллизации дисульфида железа, однако этот процесс во времени и пространстве проявлен сложно. При помощи светового (отраженный свет) и электронного микроскопов вскрываются интересные стороны и детали этого процесса.

Раскristаллизация тонкодисперсной рудной массы прежде всего началась с образования очень мелких выделений пирита, которые имеют шарообразную или близкую к этому форму и сложное или простое строение. Такие выделения принято называть колломорфными обособлениями (рис. 11), глобулями, или фрамбоидами (рис. 12). В дальнейшем упомянутые выделения укрупнялись и объединялись в агрегаты. Агрегаты являлись центрами, вокруг которых нарастали более крупные колломорфные обособления (рис. 13, 14).

С теоретической точки зрения образование указанных обособлений понятно. Г. Реми (1966), описывая поверхностную активность коллоидных веществ, указывает, что на 10,5 г серебра объемом в 1 см<sup>3</sup> и площадью 6 см<sup>2</sup> при измельчении до размеров частиц с диаметром 1 нм число частиц (кубиков) будет равно 10<sup>21</sup>, а суммарная поверхность их составит 60 млн. см<sup>2</sup>. Общеизвестно, что поверхностная активность (энергия) таких частиц огромная сравнительно с кубиком серебра, общая площадь которого равна 6 см<sup>2</sup>. Тот же Г. Реми (1966, стр. 720 и 721) отмечает: «Возникновение поверхностных сил объясняется неполным валентным насыщением атомов или ионов, расположенных на поверхности». И далее: «Измельчение сопровождается не только увеличением собственно поверхности, но и в гораздо большей степени увеличением общей длины ребер и числа углов». Отсюда ясно, что «уменьшение поверхностной энергии, т. е. насыщение валентностей, выходящих на поверхность, может происходить либо в результате поглощения поверхностью другого вещества (адсорбция), либо за счет сокращения самой поверхности». Из сказанного следует, что минеральные обособления, образующиеся при раскristаллизации гелевых масс вследствие стремления к минимальной поверхности, а следовательно, и к минимальной поверхностной энергии при данном объеме, будут иметь в общем



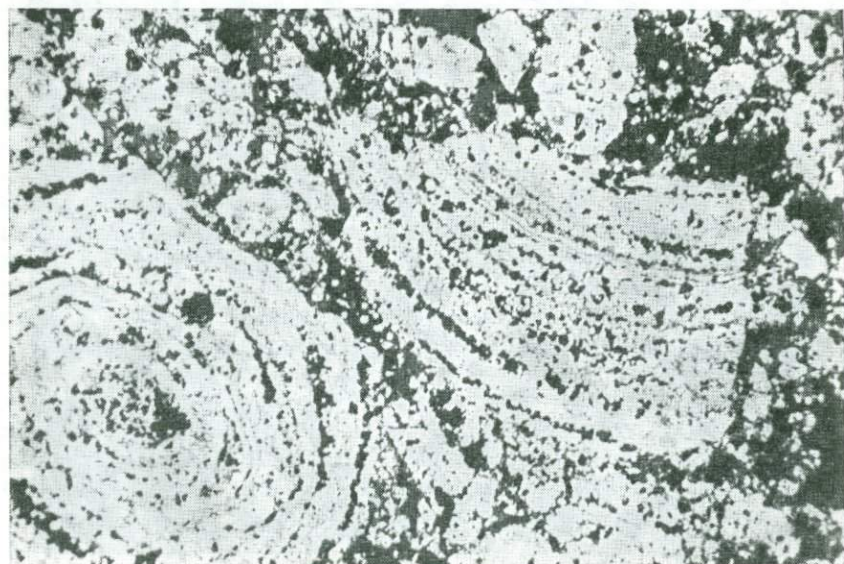
11. Колломорфные структуры пирита. Комсомольское месторождение. Отраженный свет, протравлено, увел. 2600



12. Глобулярное строение пирита. Каждая глобула состоит из мельчайших полиэдров. Сибай. Отраженный свет, протравлено, увел. 2100



13. Сложный узор колломорфных структур пирита. Сибайское месторождение. Отраженный свет, протравлено, увел. 200  
 Белые и идиоморфные зерна — переотложенный пирит, черное (идиоморфное зерно) — кварц, серое (нижний правый угол фото) — сфалерит



14. Колломорфные обособления пирита (светлое), состоящие из массы глобулей. Справа на фото виден обломок такого обособления. Черное — нерудные минералы, серое (в колломорфных обособлениях) — сфалерит. Комсомольское месторождение. Отраженный свет, увел. 70



15. Перекристаллизация агрегата мелких колломорфных обособлений пирита в агрегат резко зональных зерен этого же минерала. Комсомольское месторождение. Отраженный свет, протравлено, увел. 675

Черное — нерудные минералы

случае сферическую форму. Сказанное подтверждается и данными коллоидной химии (Каблуков и др., 1949; Шелудко, 1960; Воюцкий, 1964; Чухров, 1955, 1965), а также результатами эксперимента (Берестнева, Каргин, 1955; Лопатина и др., 1960; Лебедев, 1965; Федорова, 1966).

Колломорфные выделения пирита (рис. 11) перекристаллизовывались, и за счет их выростали агрегаты зерен этого же минерала с резкой зональностью роста (рис. 15)<sup>1</sup>.

На зональности роста в зернах и кристаллах пирита следует остановиться подробнее, так как известно (Смирнов, 1968), что в метаморфизованных месторождениях не только Урала и Союза, но и всего мира пирит такой зональностью не обладает.

С. Н. Иванов (1950<sub>1</sub>) первым опубликовал интересные сведения по зональности роста в пирите. Производя травление указанного минерала разработанной совместно с нами методикой, он получил очень важную информацию.

С. Н. Иванов показал, в частности:

1. Зернам пирита из колчеданных месторождений Урала присуща своеобразная резкая зональность роста, которая условно

<sup>1</sup> В рудах Учалинского месторождения аналогичные явления обнаружены в 1966 г. Е. В. Праховой.

была названа им зональностью первого рода. Такая зональность является характерным генетическим признаком зерен пирита из указанных месторождений. В большинстве случаев по зональности роста I без особых затруднений можно отличить пирит из колчеданных месторождений от пирита из месторождений других генетических типов. В колчеданных же месторождениях встречается пирит с иной зональностью, названной тем же исследователем зональностью второго рода. Зональность II травлением обнаруживается в зернах и кристаллах пирита, выросших при метаморфизме руд.

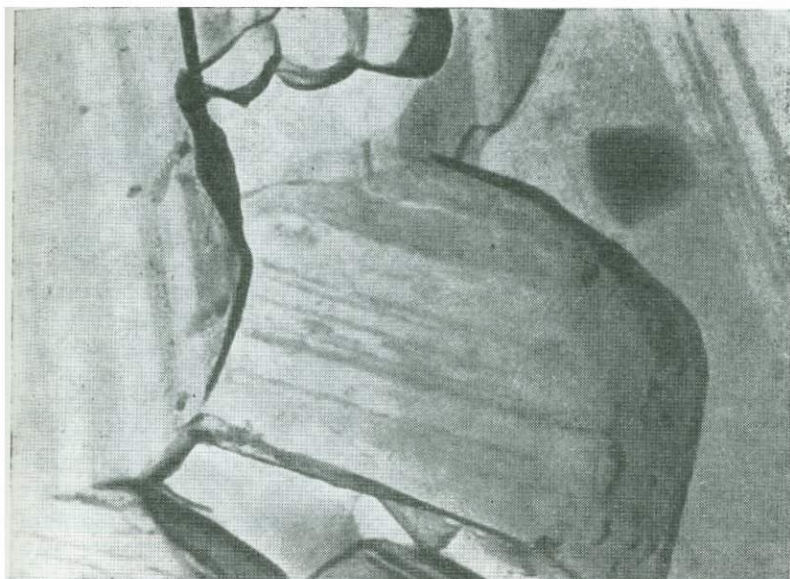
2. Зональность роста I в зернах пирита не оставалась без изменений. Она исчезала, когда руды подвергались метаморфическим изменениям.

С. Н. Иванов и другие исследователи опубликовали ряд работ, в которых на основании изучения зональности роста в пирите они пришли к важным выводам относительно истории формирования колчеданных руд. Однако природа зональности роста I в зернах пирита оставалась при этом неразгаданной, и нам пришлось потратить немало времени и усилий, чтобы получить по этому вопросу новую информацию.

Результаты исследования руд под электронным микроскопом частично уже приведены выше. Нами совместно с Ф. П. Буслаевым и Л. А. Шерстобитовой (Ярош и др., 1968) было проведено изучение под электронным микроскопом реплик<sup>1</sup> со сколов тонкодисперсных выделений дисульфида железа, тонко- и среднезернистых агрегатов зерен, а также с граней отдельных кристаллов пирита из Блявинского, Комсомольского, Сибайского, Маукского, Карабашских и других колчеданных и неколчеданных месторождений. Исследования выполнены на настольном электронном микроскопе BS-242A. Отдельные детализационные снимки получены на микроскопе УМВЭ-100.

Выше уже отмечалось, что в рудных агрегатах из колчеданных месторождений Урала, особенно Южного, наблюдаются постепенные переходы от тонкодисперсного дисульфида железа к зернистому пириту. В таких агрегатах всегда обнаруживаются пустоты, стенки которых увенчаны и колломорфно-крупификационными выделениями того же пирита и друзьями хорошо ограниченных его кристаллов. Размер кристаллов в большинстве случаев зависит от размеров пустот, а последние бывают от нескольких сантиметров до сотых долей миллиметра и меньше в поперечнике. Из сказанного ясно, что на поверхностях, образующихся при раскалывании образцов указанных агрегатов, кроме сколов и контактных граней отдельных зерен пирита, будут встречаться кристаллики этого минерала с четко выраженными гранями. Зерна и кристаллики пирита имеют различные размеры (от

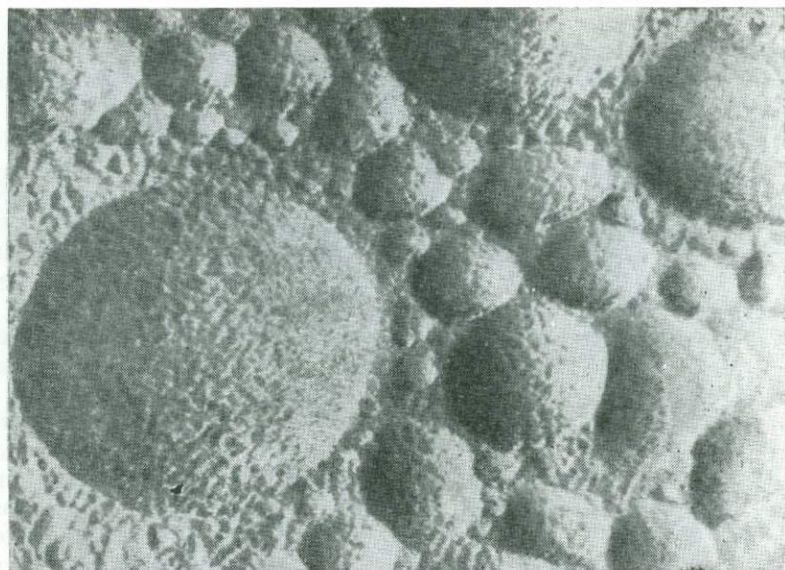
<sup>1</sup> Угольные реплики с последующим оттенением хромом изготовлены по стандартной методике (Гридаенко и др., 1961).



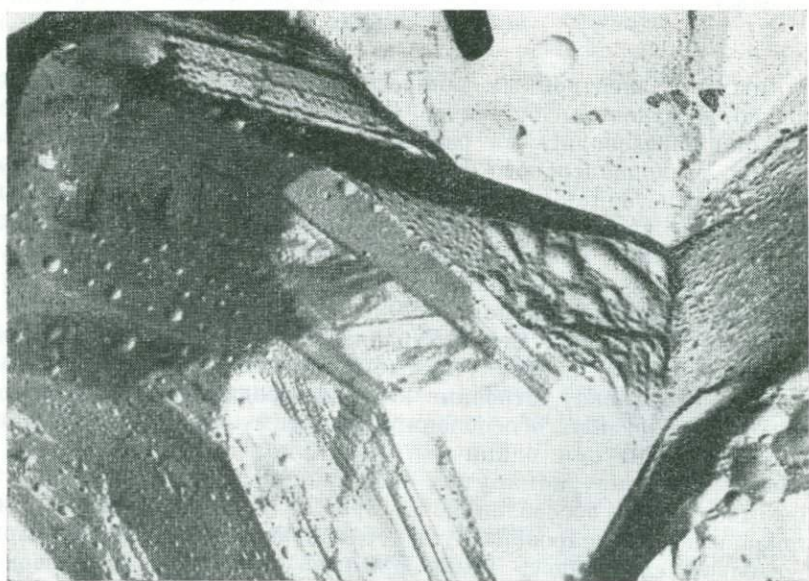
16. Каплеобразные обособления и комбинационная штриховка на гранях субмикроскопических кристалликов пирита. Сибай, фото под электронным микроскопом, увел. 48 000

видимых под электронным микроскопом при увеличениях в несколько десятков тысяч раз до 1 мкм и больше в поперечнике), т. е. они образовались на разных стадиях процесса раскристаллизации тонкодисперсного  $\text{FeS}_2$ . Тонкая скульптура контактных граней зерен, а также граней кристалликов минерала должны представлять значительный интерес. По логике вещей такие грани должны дать нам информацию о механизме роста самих зерен и кристалликов и об особенностях их внутреннего строения, обусловленных этим механизмом.

На рис. 16 видно, что на гранях субмикроскопических кристалликов пирита имеются темные и светлые полосы (комбинационная штриховка), строение которых неодинаково: в одних — масса каплеобразных обособлений, в других — таких обособлений нет совсем или они единичны. Более полное представление о размерах и форме упомянутых обособлений дает рис. 17. Рис. 18 показывает, что обособления на гранях зерен и кристалликов пирита имеют и шарообразную и близкую к этому форму. Примечательно следующее. Каплеобразные и вообще сферические обособления на гранях зерен и кристалликов пирита сливаются в более крупные образования. Поэтому в непосредственной близости от последних обычно не наблюдается аналогичных по величине обособлений.



17. Строение каплеобразных обособлений пирита на границах субмикроскопических кристалликов этого же минерала. Сябай. Фото под электронным микроскопом, увел. 96 000



18. Линейное расположение каплеобразных обособлений на границах субмикроскопического кристаллика пирита (левый верхний угол фото). Пространство около крупных «капель» свободно от мелких «капель». Блява. Фото под электронным микроскопом, увел. 22 500

Каплеобразные и вообще сферические обособления на зернах и кристалликах пирита располагаются небеспорядочно. Они всегда приурочены к определенным кристаллографическим направлениям таких зерен и кристалликов (рис. 16, 18).

Что же представляют собой только что описанные обособления, и почему они так закономерно располагаются на гравях кристалликов и зерен пирита? Следующие факты дают ответ на поставленный вопрос.

На многочисленных препаратах устанавливается, что каплеобразные и шарообразные обособления встречаются на тех зернах и кристалликах пирита, которым присуща зональность роста I, обнаруживаемая травлением. На зернах и кристаллах пирита, не обладающих такой зональностью, независимо от того, взяты ли они из Карабаша, Березовска или других колчеданных и неколчеданных месторождений, упомянутые обособления не обнаруживаются.

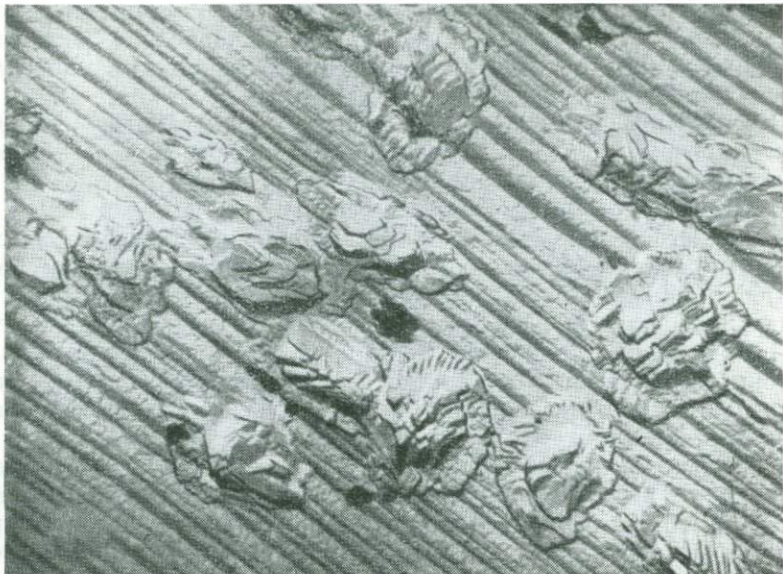
В зернах пирита из Маукского месторождения, которое интенсивно метаморфизовано, зональность I сохранилась в виде реликтов, при этом хорошо видно, как при перекристаллизации (рекристаллизации) каплеобразные обособления сливаются в плотные участки (рис. 19, 20). Приведенные рисунки свидетельствуют о сложных преобразованиях в пирите упомянутого месторождения. Такие преобразования в конечном счете приводят к тому, что внутреннее строение зерен пирита становится более совершенным. В них исчезает зональность роста I.

Из приведенного видно, что каплеобразные и вообще сферические обособления на зернах и кристалликах пирита принадлежат этому же минералу. Об этом свидетельствуют и рентгенометрические исследования, а также то, что обособления не имеют резких границ с гранями зерен пирита, на которых они находятся. Они составляют единое целое с такими гранями, являясь их недооформленными участками.

Сравнивая рис. 1 с рис. 18, легко можно убедиться, что в обоих случаях видны одни и те же мельчайшие частицы  $FeS_2$ , которые приобрели сферическую или близкую к этому форму в связи с общей тенденцией тел к минимуму свободной поверхностной энергии.

Рис. 1 отображает начальную стадию образования зерен за счет указанных частиц; на рис. же 16 видно, что зерна этого минерала уже более совершенны, однако их гравями адсорбированы сферические частицы.

Адсорбция коллоидных частиц и их агрегатов на поверхностях растущих зерен минералов широко распространена в природе (Чухров, 1955, стр. 236). В первую очередь такие частицы, как следует из высказываний Реми (1966, стр. 720—721), будут адсорбированы ребрами, углами и вообще острыми выступами на поверхностях зерен и кристаллов минералов. Приведенные нами рисунки убедительно это подтверждают. Понятно при этом,



19. Исчезновение комбинационной штриховки и каплеобразных обособлений на грани кристаллика пирита вследствие появления новых центров кристаллизации. Маук. Фото под электронным микроскопом, увел. 4000



20. То же, что и на рис. 19, увел. 12 000

что если частицы по химическому составу неодинаковы с зернами минералов, которые их адсорбировали, то они не будут участвовать в строении кристаллической решетки этих зерен.

В рассматриваемом нами случае частицы, адсорбируемые поверхностями растущих зерен пирита, являются питательной средой для последних и с течением времени поглощаются ими. Следовательно, каплеобразные частицы  $\text{FeS}_2$  на гранях зерен пирита отображают определенную степень несовершенства внутреннего строения самих зерен, что в них и проявляется в виде резкой зональности роста первого рода.

Наряду с колломорфными, колломорфно-крустификационными обособлениями пирита встречаются и выделения указанного минерала в виде глобуль или фрамбоидов. Довольно полная информация по таким образованиям пирита приведена в ряде публикаций (Love, Amstutz, 1966 и др.), тем не менее полученные нами данные при изучении этих образований заслуживают внимания.

В рудах южноуральских колчеданных месторождений глобулярные выделения пирита — обычное явление. Сравнительно реже, однако, во многих месторождениях Среднего Урала указанные выделения также встречаются.

Размер глобулей пирита от 0,9 до 0,005 мм в поперечнике. В колчеданных рудах они рассеяны среди минеральных агрегатов или чаще образуют сплошные скопления в виде: а) отдельных глобулитов или агрегатов последних; б) округлых агрегатов с зональным внутренним строением (см. рис. 14); в) цементирующего (с другими минералами) обломки раннего пирита. Для глобулитов и округлых скоплений последних характерны особенности внутреннего строения. Центральные части таких образований пористые, или глобули в них сцементированы другими рудными и нерудными минералами. В описываемых образованиях обычными являются полости отслоений, контракционные трещины.

Цементирующим материалом в скоплениях глобуль бывают различные нерудные и рудные минералы, в том числе тонкопористый пирит или развившийся по нему марказит. Такой пирит имеет меньшую отражательную способность сравнительно с пиритом в глобулях и очень легко затравливается всеми травителями. Внутреннее строение глобулей пирита от мелких колломорфных образований (см. рис. 11) отличается тем, что каждая глобуля, независимо от ее размеров, состоит из стандартных по форме субмикроскопических полиэдров (см. рис. 12). На приведенном рисунке видно, что в отдельно взятых глобулях есть мелкие и крупные полиэдры. Это зависит от того, что плоскость шлифа не всегда проходит через центры полиэдров.

В плоскостных срезах полиэдры имеют форму многоугольников, однако количество сторон таких многоугольников не превышает шести. Под электронным микроскопом новых данных по внутреннему строению глобуль не устанавливается.

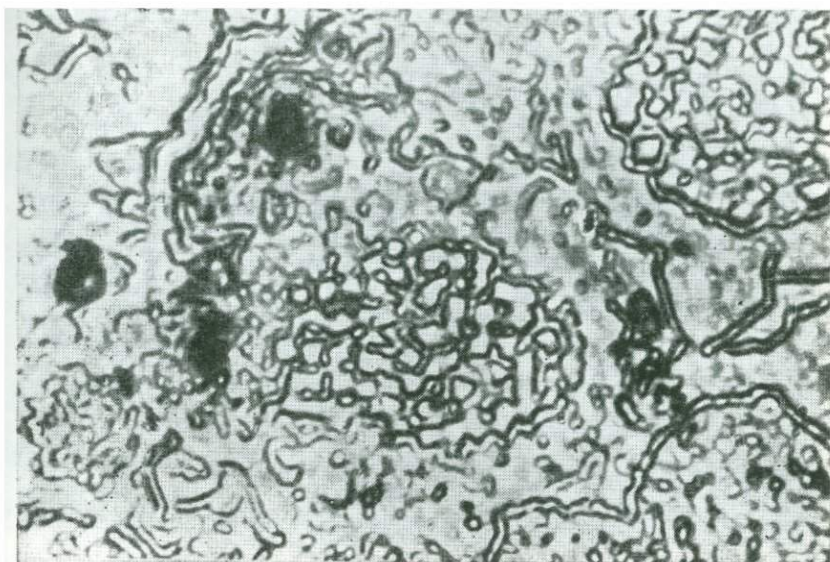
Описанная картина внутреннего строения глобулей не отличается по своему существу от сеток, образуемых контракционными трещинами на плоских поверхностях тонкодисперсного дисульфида железа и наблюдаемых макроскопически. В обоих случаях полиэдры в плоскостных срезах очень близко напоминают пчелиные соты. Более сложное внутреннее строение глобулей пирита обнаруживается в осадочной породе висячего бока Учалинского месторождения. Здесь без травления под микроскопом видны почти все те случаи, которые приведены Love и Amstutz в табл. 1—3 и 6 их статьи (1966).

Глобули пирита, как следует из приведенного, своим внутренним строением резко отличаются от таких же по размерам шарообразных телец пирита (см. рис. 11). Строение последних может быть весьма разнообразным. Перехода глобулей в такие тельца и наоборот не устанавливается, хотя обрастание глобулей колломорфным пиритом имеет место. Это свидетельствует, что образование глобулей отображает какие-то специфические условия перехода тонкодисперсного дисульфида железа в пирит, или возможно, что глобули или часть их — это псевдоморфозы пирита по органическим остаткам, как полагают другие исследователи (Kalliokoski, 1966).

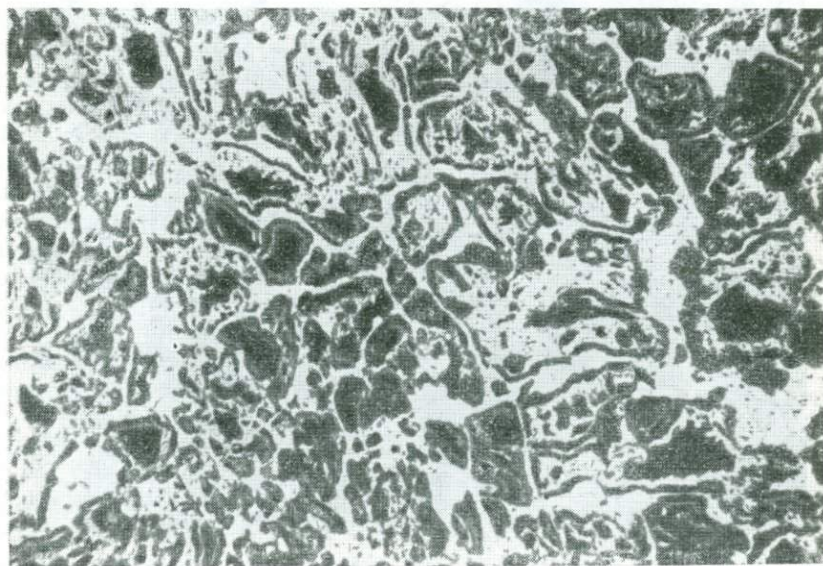
Глобули пирита, как и его колломорфные обособления, не оставались неизменными. Они постепенно видоизменялись и в конечном счете превращались в зернистые агрегаты пирита, обрастали последним. Необходимо при этом подчеркнуть, что если колломорфные образования пирита при раскристаллизации превращаются в зерна с резкой зональностью роста I (рис. 15), то за счет глобулей зерна с такой зональностью не образуются (рис. 21). Сказанное справедливо не только для глобулей пирита из уральских колчеданных месторождений. Пирит в ритмично-слоистых рудах Жайремского месторождения (Атасуйская группа, Казахстан) представлен такими же глобулями, как и на нашем рис. 12. В таких же рудах Озерного месторождения (Бурятия), наряду с мелкими, но почти стандартными по размерам оолитоподобными выделениями пирита, встречается немало и глобулей. В обоих случаях при микроскопических исследованиях видно, что за счет глобулей образуются зерна пирита, однако резко зональные рисунки отсутствуют.

Раскристаллизация тонкодисперсного дисульфида железа в зональные зерна пирита обуславливала общее сокращение объема всей рудной массы и появление в ней как крупных, так и массы микроскопических трещин, которые выполнялись пиритом (рис. 22). В мелких обломках — полиэдрах, образуемых такими трещинами, появлялись более мелкие трещинки, также заполнявшиеся пиритом. Процесс шел таким образом до тех пор, пока на месте тонкодисперсной массы дисульфида железа возникали тонкозернистые агрегаты пирита.

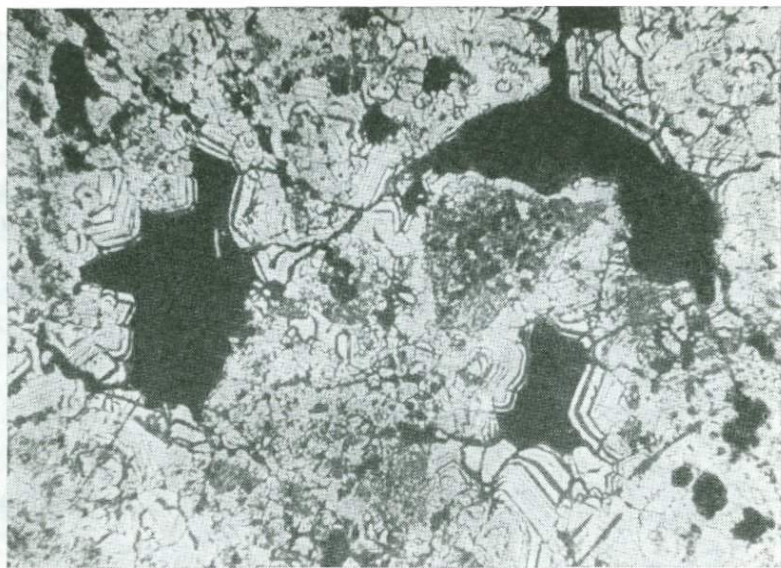
В ходе раскристаллизации тонкодисперсного дисульфида



21. Границы глобулей пирита и полиэдры в них становятся незаметными вследствие перекристаллизации. Сибай. Отраженный свет, протравлено, увел. 2500



22. Масса contractionных трещинок, разбивающих землистую руду (черное) и выполненных пиритом (светлое). Сибай. Отраженный свет, увел. 38

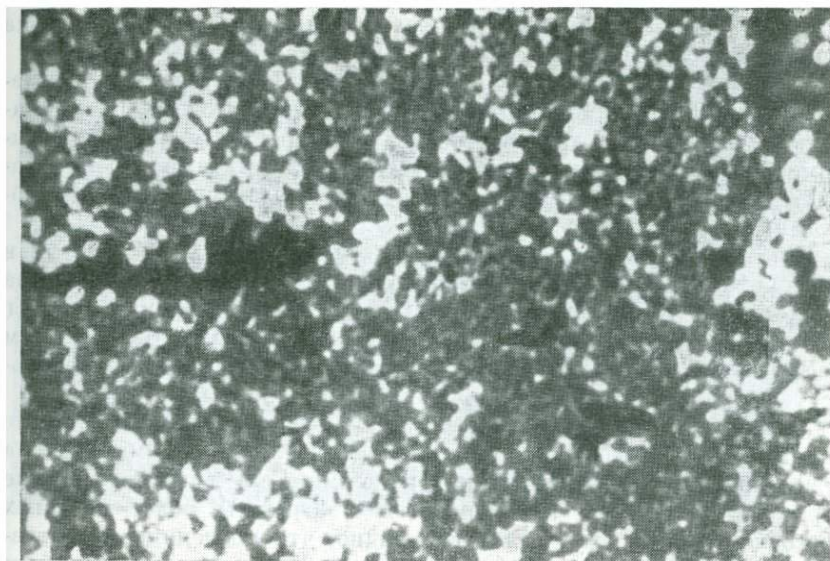


23. Преимущественный рост зональных зерен пирита в направлении пустот (черное). Сибай. Отраженный свет, протравлено, увел. 120



24. То же, что на рис. 23. Южное месторождение (Карабаш). Отраженный свет, протравлено, увел. 35

Черное — пустотки, темно-серое — пустотки, выполненные нерудными минералами



25. Губчатый агрегат пирита (или марказита) (светлое), возникший при раскристаллизации тонкодисперсной руды (черное). Блява, Отраженный свет, увел. 3360

железа наряду с массой контракционных трещин появлялось и большое количество пор и пустот. Примечательно, что рост зональных зерен пирита за счет тонкодисперсного дисульфида железа осуществлялся в направлении пустот (рис. 23).

Явления, отображенные рис. 23, весьма характерны и широко распространены не только в рудах южноуральских, но и в среднеуральских колчеданных месторождениях. И если в первых прослеживаются все детали процесса, то во вторых на месте тонкодисперсного  $\text{FeS}_2$  сравнительно редко сохраняются реликты колломорфных обособлений пирита, которые с периферии обрамлены каймами зональных зерен пирита, росших также в направлении пустоток (рис. 24). Обычно же на месте колломорфных обособлений пирита выросли уже зерна этого минерала, которые в направлении к пустоткам постепенно укрупняются. Зональность роста в зернах пирита в таких случаях не оставляет сомнения (а также реликты колломорфного строения), что и в среднеуральских месторождениях до их метаморфизма протекал тот же процесс раскристаллизации тонкодисперсных рудных масс.

Появление шарообразных и округлых выделений пирита и более крупных колломорфных его обособлений в начальные стадии раскристаллизации тонкодисперсного дисульфида железа не обязательно. Вместе с такими обособлениями, вперемежку с ними и самостоятельно возникали губчатые агрегаты (рис. 25),

которые впоследствии также превращались в зональные зерна пирита.

В рудах Сибая, Комсомольского и других месторождений вместе с пиритом и отдельно от него выкристаллизовывался марказит, который образует сложнейшие по внутреннему строению колломорфные обособления или представлен агрегатами зерен с характерными для этого минерала морфологическими особенностями.

Учитывая мнение Герман-Русаковой (1962) о том, что в Блявинском месторождении тонкодисперсный дисульфид железа является результатом вторичных изменений первичных руд, мы исследовали пирит и марказит из таких участков в этом месторождении, где хорошо сохранился халькопирит, свидетельствующий об отсутствии вторичных изменений.

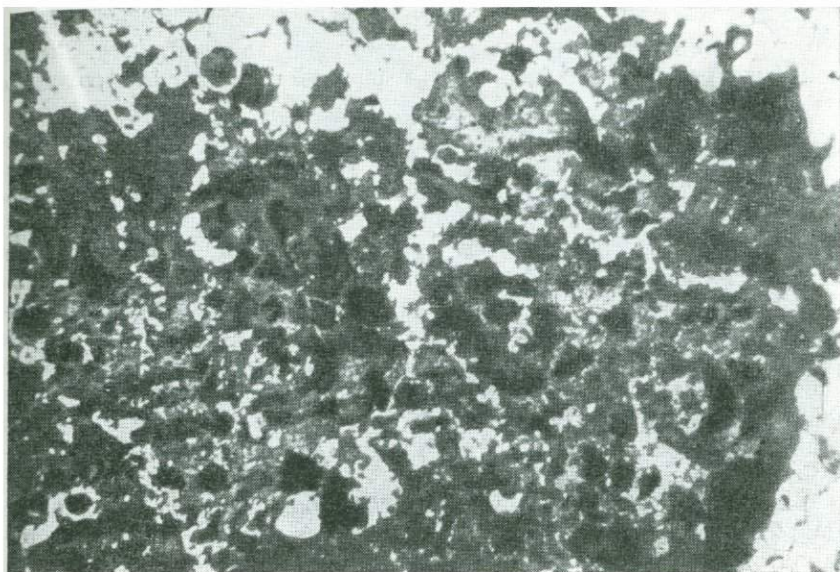
На рис. 26 представлена обычная руда из Блявы. Черные участки на фотографии при больших увеличениях микроскопа представлены тонкогубчатыми агрегатами  $\text{FeS}_2$  (рис. 25). Такие агрегаты постепенно превращаются в агрегаты более крупных обособлений, при этом отчетливо видно, что последние представлены весьма тонкозернистым марказитом. По марказиту в стороны от трещинок, с периферии обособлений марказита развивается пирит (рис. 27). Превращение марказита в пирит протекало неравномерно. Часто этот процесс наиболее интенсивно проявлен в небольших локальных участках. Такие участки в дальнейшем, вследствие перекристаллизации, превращались в сравнительно крупные порфиробласты пирита, внутреннее строение которых (зональность II) отличается от зерен пирита, выросших при раскристаллизации тонкодисперсного  $\text{FeS}_2$  (зональность I). Макроскопически упомянутые порфиробласты обнаруживаются редко, однако они достигают 1 см в поперечнике.

Кроме отмеченных выделений марказита, последний образует четкие колломорфные обособления. Последние состоят из тех же весьма тонких зерен этого минерала и также превращаются в пирит.

Встречаются своеобразные ритмично-зональные шарообразные выделения мелких зерен марказита и развившегося по нему пирита (рис. 28). Они в дальнейшем раскристаллизуются, ритмичность в них исчезает, но когда они соприкасаются друг с другом, то их контуры хорошо видны и в результате образуется сетка, напоминающая соты.

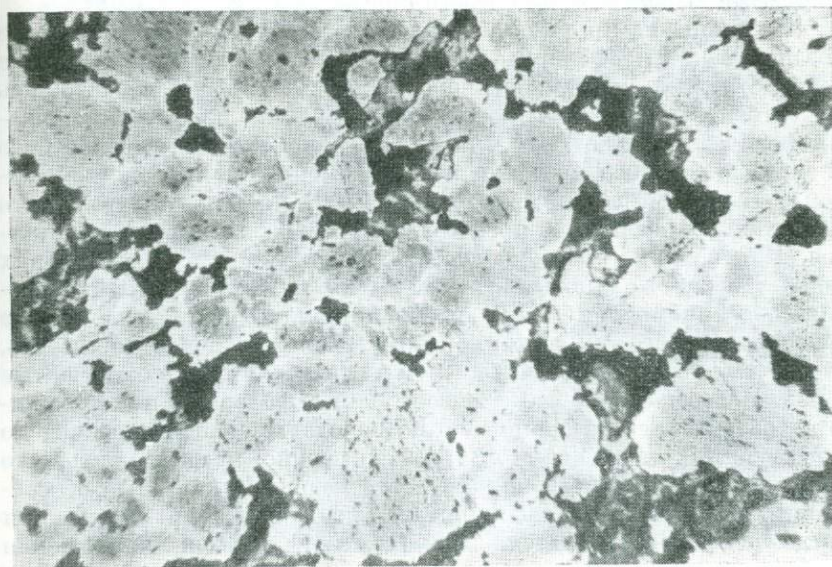
Итак, из приведенного видно, что в рудах Блявинского месторождения по тонкодисперсному  $\text{FeS}_2$  развивается марказит, а по последнему — пирит. Встречаются и обратные явления, однако их меньше.

В Комсомольском месторождении, как указано выше, руды для исследования взяты с больших глубин (400—952 м). В этих рудах марказит — часто встречающийся минерал. Он развивался по системе трещин в нерудных минералах, однако чаще всего



26. Раскристаллизация тонкодисперсного дисульфида железа (черное). Блява. Отраженный свет, увел. 70

Белое — пирит



27. Развитие пирита (белое) по марказиту (серое, основной фон). Блява. Отраженный свет, увел. 115

Черное — пустоты; 1 — халькопирит

его выделения приурочены к сфалериту и халькопириту. Рис. 29 показывает, что марказит — более поздний минерал относительно последних двух.

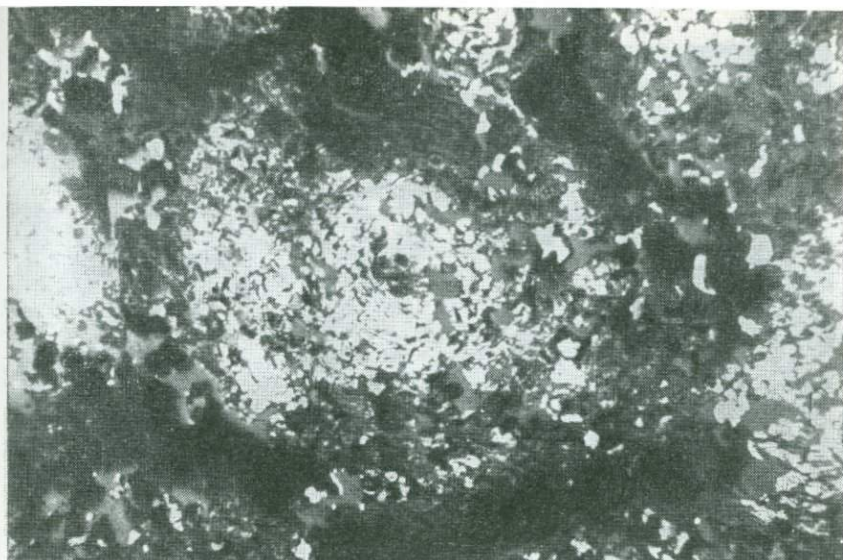
В полированных шлифах устанавливается несомненное псевдоморфное замещение марказитом морфологически разнообразных выделений пирита. Указанный минерал развивается по зернам, почкам, сложным колломорфным обособлениям и по глобулям пирита. Прослеживаются все детали замещений. Например, в скоплениях глобуль последнего марказит сначала развивается по цементу (пирит) таких глобуль. Затем его развитие продолжается по морфологически стандартным субмикроскопическим полиэдрам, из которых состоят глобули (замещение полиэдров начинается обычно с периферии глобуль). Любопытно, что когда глобули пирита полностью замещены марказитом, то их размеры и внешняя форма остаются прежними, а внутреннее строение — типичные сферолиты.

В рудах Комсомольского же месторождения марказит замещается пиритом. Сферолиты при этом сохраняют внешние очертания, но утрачивают характерное для марказита внутреннее строение. Пластинчатые выделения марказита также псевдоморфно замещаются пиритом и это надо иметь в виду.

С. Н. Иванов (1947) считает, что в Сибире наблюдавшиеся им пластинки пирита внешне похожи на зерна плагиоклаза. По этому признаку он сделал вывод о замещении рудой породы с порфиrowыми выделениями полевого шпата.

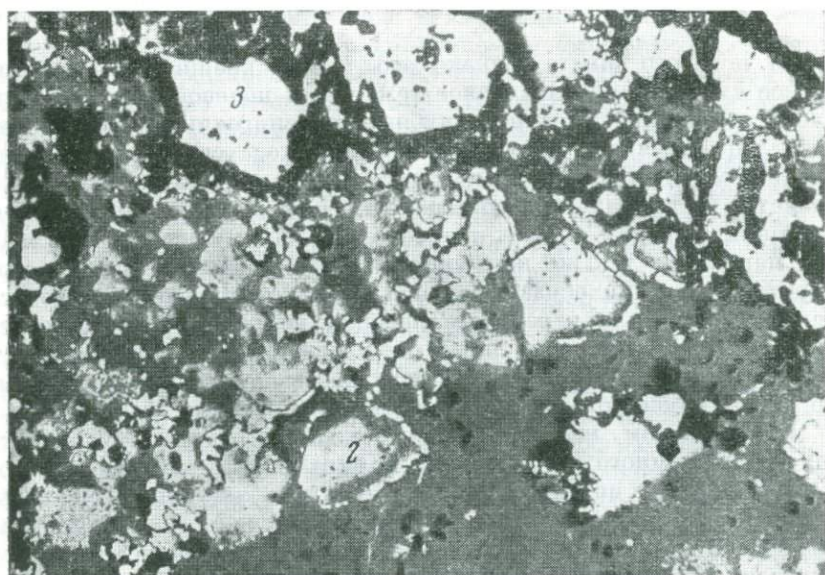
Как видно из приведенного рис. 29, развитие марказита более позднее, нежели сфалерита и халькопирита, а последние в ходе раскристаллизации тонкодисперсных рудных масс обособлялись после основной массы пирита. Однако сами пластинки марказита свидетельствуют, что они образовались из тонкодисперсного дисульфида железа (речь не идет о замещении пирита марказитом). В самом деле, глядя на рис. 30, можно убедиться, что пластинки марказита не представляют собой однородных кристаллов. Центральные части таких пластинок состоят из тончайших зерен указанного минерала, в них видны мелкие поры. С периферии пластинки постепенно раскристаллизовываются наподобие тонкодисперсного пирита в мелких блоках. Трудно допустить, чтобы выделения марказита, в том числе и его пластинчатые зерна, пересекая округлые обособления сфалерита и халькопирита, развивались псевдоморфно по породе, имеющей порфиrowую структуру. В таком случае надо неизбежно предположить, что порода выделялась в трещинах, пересекающих указанные обособления сфалерита и халькопирита. Признаков такого выделения нигде не устанавливается. Кроме того, если бы предположение отображало действительное положение вещей, тогда правомерен был вывод не о замещении породы рудой, а наоборот, что противоречило бы всей совокупности наблюдаемых фактов.

Пластинчатые выделения марказита действительно похожи на



28. Шарообразные скопления марказита и пирита (светлое). Блява, Отраженный свет, увел. 35

Черное — пустотки; темно-серое — нерудный минерал



29. Выделения марказита в контактах зерен халькопирита и сфалерита (серое). Комсомольское месторождение. Отраженный свет, увел. 45

1 — марказит; 2 — халькопирит; 3 — пирит; черное — пустотки и нерудные минералы



30. Пластинчатые выделения марказита пористые внутри и однородные по периферии. Комсомольское месторождение. Отраженный свет, увел. 340

Темно-серое — нерудные минералы, черное — пустотки

зерна полевого шпата, однако это только внешнее морфологическое сходство, обусловленное тем, что и полевой шпат, и марказит кристаллизуются не в кубической сингонии. Зерна марказита, как и всякого другого минерала, в ходе своего формирования стремятся приобрести присущую им форму, по которой определяется их принадлежность к ромбической сингонии. Ромбическая сингония в общем случае и определяет облик зерен и кристаллов марказита, так же как, например, кубическая — облик зерен пирита, когда они образуются при раскристаллизации тонкодисперсного  $\text{FeS}_2$  или перекристаллизации колломорфных обособлений. В случае с пиритом никто не предполагает, да к этому нет и оснований, что зерна этого минерала псевдоморфно развивались по зернам какого-то минерала кубической сингонии.

В Сибайском месторождении также встречается марказит, однако здесь много псевдоморфоз пирита по выделениям первого. Псевдоморфозы пирита по марказиту, так же как и реликты последнего, в большинстве случаев приурочены к выделениям сфалерита. Ясно при этом видно, что до замещения пиритом марказит развивался в трещинках, пересекающих сфалерит, замещающий последний.

Приведенные фактические данные свидетельствуют:

1. Марказит в рудах колчеданных месторождений Урала является первичным гипогенным минералом. Развитие его по

тонкодисперсным массам  $\text{FeS}_2$ , по пириту, а также замещение его пиритом связано с колебаниями режима щелочности — кислотности раскристаллизующихся тонкодисперсных систем.

2. Пластинчатый облик выделений марказита не является результатом псевдоморфного замещения этим минералом зерен полевого шпата. Такая форма присуща самим зернам марказита.

Теоретические предпосылки (Чухров, 1955 и др.), а также данные эксперимента (Лопатина и др., 1960 и др.) показывают, что при раскристаллизации гелей сложного состава происходит дифференциация вещества. В первую очередь из таких гелей выпадают минералы, составляющие компоненты которых количественно преобладали над другими компонентами в коллоидном растворе, и минералы с максимальной энергией кристаллических решеток. На примере руд колчеданных месторождений Урала сказанное блестящим образом подтверждается. На ранних стадиях раскристаллизации тонкодисперсных рудных масс выпадал пирит. Морфологически сложные выделения этого минерала вместе с еще не раскристаллизовавшейся тонкодисперсной рудой дробились контракционными трещинами, которые выполнялись только пиритом же. В дальнейшем вместе с пиритом начали выделяться сфалерит, халькопирит и кварц. Выделения перечисленных минералов образуют тончайшие смеси и прорастания. Кроме того, последние три выпадали в виде мельчайших шарообразных телец.

Колломорфные, крустификационно-колломорфные обособления, как видно из сказанного, становились уже неоднородными. В них, как справедливо отметила Т. Н. Шадлун (1942), различается множество тончайших слоев-ритмов, представленных перечисленными минералами. В еще более поздних выделениях сфалерит и халькопирит резко преобладали над пиритом вплоть до отсутствия последнего. Наконец, в последние стадии процесса раскристаллизации тонкодисперсной руды над сульфидами преобладали нерудные минералы — кварц, барит, ангидрит и др.

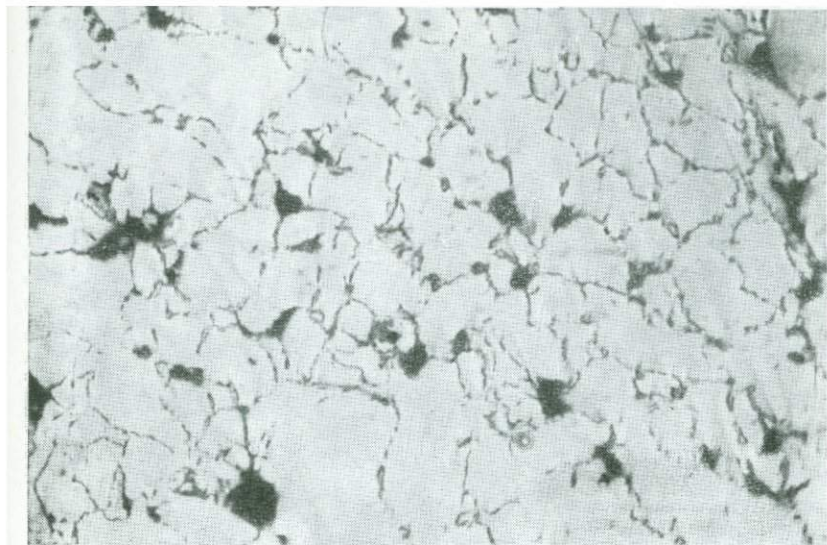
Среди выделений поздних стадий раскристаллизации теллодобных рудных масс различаются смеси: а) пирита и сфалерита; б) пирита и халькопирита; в) пирита, сфалерита и халькопирита; г) сфалерита и халькопирита. В таких смесях преобладал тот или иной минерал. Компоненты, содержащиеся в тонкодисперсной раскристаллизовавшейся массе в малых количествах, не образовывали видимых даже при больших увеличениях микроскопа минералов. Эти компоненты образовали более или менее равномерно распределенные дисперсные примеси в рудах. Это убедительно показал И. С. Волинский на примере золота в рудах Сибая и Блявы (Крейтер и др., 1958).

По ходу раскристаллизации объем рудной массы все время уменьшался, и она разбивалась все новыми и новыми контракционными трещинами. Эти трещины выполнялись указанными смесями, и таким образом ранние выделения пирита оказались сцементированными такими смесями и нерудными минералами.

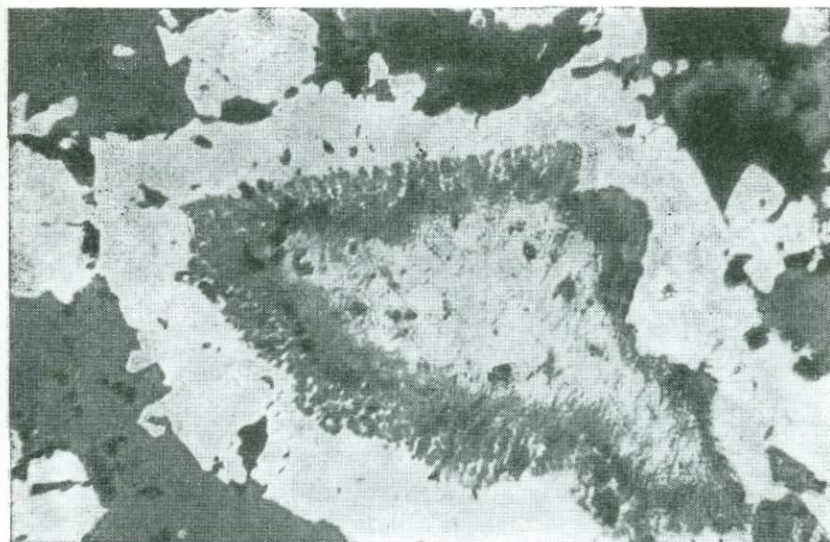
Вследствие этого в рудных агрегатах возникли такие пространственные соотношения между слагающими их минералами, что без тщательного изучения и сопоставления всей совокупности фактов, освещающих процесс раскristаллизации, эти соотношения можно ошибочно принять за доказательство нескольких стадий оруденения, разорванных во времени.

Выше перечисленные смеси минералов, естественно, не оставались всегда как таковые. Они во времени и пространстве претерпевали своеобразные изменения, усложняя этим и без того сложные и запутанные соотношения между отдельными минералами и текстурно-структурные рисунки в рудах. Сущность изменений сложных минеральных смесей состоит в их разделении — распаде на составляющие их минералы, т. е. в собирательной перекристаллизации. На разных стадиях этого процесса возникали столь сложные соотношения между отдельными минералами, что без систематического просмотра большого количества полированных шлифов бывает весьма трудно разобраться в существе явлений. Например, если рассматривать рис. 31—33 как отдельно взятые факты, то, очевидно, нельзя прийти к выводу, что во всех трех случаях агрегаты сульфидов образовались при распаде когда-то почти гомогенных субмикроскопических смесей, хотя в действительности это и так.

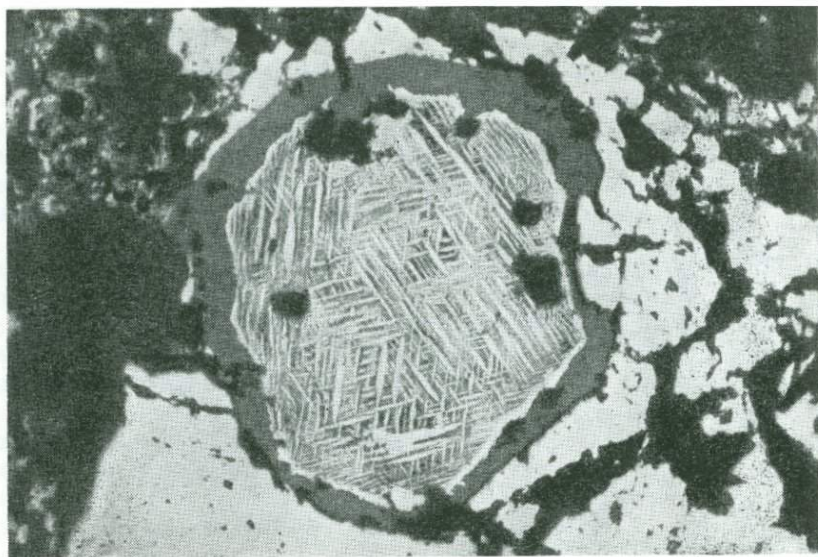
В рудах южноуральских месторождений наблюдаются все нюансы, все детали распада сложных по составу смесей. На рис. 34 представлена частично распавшаяся смесь пирита, сфалерита и халькопирита, выделившаяся в контракционной трещине тонкозернистого пирита. На фотографии видны округлые обособления тонкосросшихся обособлений перечисленных минералов. В таких обособлениях имеются участки чистого халькопирита, а сами обособления сцементированы сфалеритом. Рис. 35, 36 являются деталями рис. 34. Такие детали очень важны. Они раскрывают ход событий в обособлениях сложных по составу минеральных смесей. По системе контракционных трещинок (а они разновозрастные и образуют сетку, уже неоднократно упоминавшуюся) выделяется пирит. И это закономерно. Пирит как обладающий наибольшей кристаллизационной способностью минерал должен первым выпадать из сложной и тонкой смеси. Сфалерит же и халькопирит (основной серый фон на фото) остаются при этом в столь тонких срастаниях, которые не всегда можно увидеть под микроскопом при увеличениях 2—3 тыс. раз. На рис. 36 видно, как из округлых обособлений сфалерита и халькопирита, пересеченных мелкими трещинками, выполненными пиритом, халькопирит «освобождается» от двух своих близких спутников. Эти спутники — пирит и сфалерит — переместились в трещины, разъединяющие когда-то однородную и сложную смесь на округлые обособления — полиэдры. Рис. 37 также подтверждает распад смесей. Этот рисунок помогает понять, как возникли срастания, представленные на рис. 31—33.



31. Выделение пирита в тонких контракционных трещинках, пересекающих халькопирит (основной фон). Комсомольское месторождение. Отраженный свет, увел. 200  
Черное — пустотки



32. Обрастание тонкой смеси халькопирита и сфалерита (центр) бахромчатой каймой сфалерита и пирита, а этой каймы пиритом (белое). Комсомольское месторождение. Отраженный свет, увел. 675  
Черное — пустотки, темно-серое — нерудные минералы



33. Распад смеси халькопирита (светлые ламельки) и сфалерита (серое). Комсомольское месторождение. Отраженный свет, увел. 200

Белое — пирит, черное — пустотки и нерудные минералы



34. Частично распавшаяся смесь пирита (белые рельефные зерна), сфалерита (серое) и халькопирита (1); черное — пустотки и нерудные минералы. Комсомольское месторождение. Отраженный свет, увел. 70



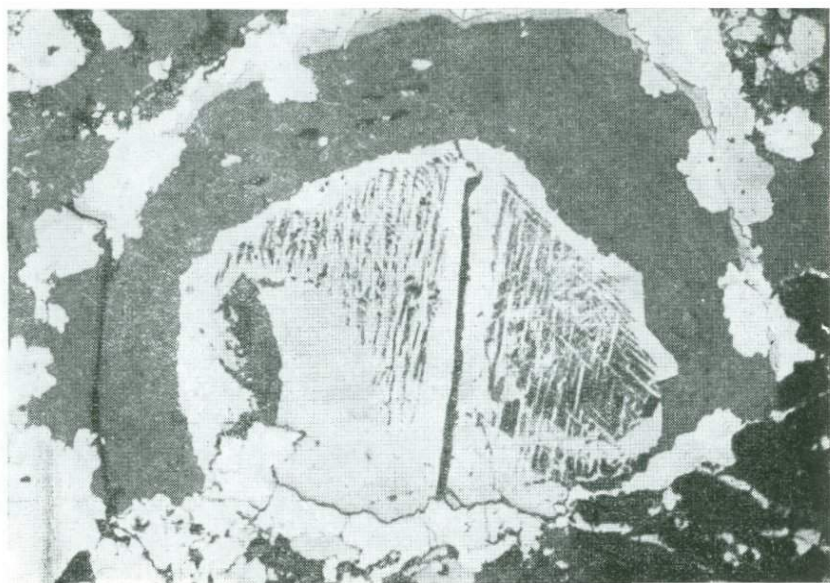
35. Деталь рис. 34, увел. 600

Белое в трещинках — пирит, серое (основной фон) — смесь сфалерита и халькопирита



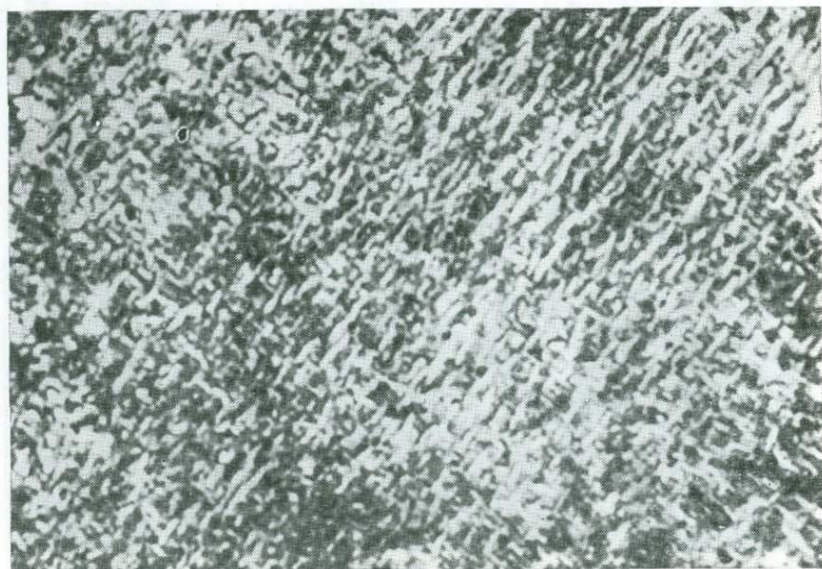
36. Деталь рис. 34 (верхняя часть фото), увел. 600

Белое (в трещинках) — пирит; серое — сфалерит; 1 — смесь сфалерита и халькопирита; 2 — халькопирит



37. Распад смеси сфалерита (серое) и халькопирита (светлое). Комсомольское месторождение. Отраженный свет, увел. 240

Белое — пирит, черное — нерудные минералы и пустотки



38. Распад смеси халькопирита (светлое) и сфалерита (серое). Комсомольское месторождение. Отраженный свет, увел. 2625

Распад сложных минеральных смесей иногда происходит с образованием закономерных структур распада (рис. 38). Это чаще бывает в смесях, в которых преобладают сфалерит и халькопирит. В смесях, представленных пиритом и халькопиритом, указанные структуры встречаются гораздо реже. Как правило, упомянутые структуры сохранились в центральных участках округлых обособлений пирита и халькопирита. Периферия таких обособлений вместо сфалерита (в примере с рис. 33) представлена пиритом. Детали взаимоотношений между пиритом и халькопиритом, образующих закономерные структуры распада, можно увидеть только при больших увеличениях микроскопа (рис. 39).

При изменениях смесей, в которых сфалерит преобладает над халькопиритом, нередко образуются зональные зерна первого, а халькопирит в виде тонких пластиночек (эмульсия) обособляется по зонам таких зерен или образует сплошные скопления в их центрах.

В зональных и незональных зернах сфалерита, возникших при распаде смесей при малых и даже средних увеличениях микроскопа (отраженный свет), включения халькопирита часто не видны, а при скрещенных николях такие зерна проявляют довольно четкую анизотропию. Учитывая последнюю, многие зерна сфалерита можно было бы отнести к вюртциту, однако оснований для этого нет и дело здесь в следующем. При больших увеличениях микроскопа (особенно в иммерсии) в зернах указанного минерала становятся хорошо заметными тонкие включения халькопирита, которые обычно удлинены и приурочены к трещинкам спайности упомянутых зерен. Такие включения халькопирита и обуславливают эффекты анизотропии в сфалерите. Заслуживают внимания такие важные детали. В зернах сфалерита часто видны трещинки, не выходящие за их пределы. Такие трещинки могут пересекать и зоны роста или двойники в указанных зернах. В стороны от трещинок сфалерит освобождается от тонких включений халькопирита. Последний скапливается тут же в трещинках. При скрещенных николях микроскопа в таких случаях всегда видно одно и то же: участки в зернах сфалерита, содержащие включения халькопирита, анизотропны, участки же, свободные от таких включений, изотропны.

В месторождениях Среднего Урала тонкие включения халькопирита (эмульсиевидные включения) бывают чаще эпигеничными к зернам сфалерита, в которых они находятся (об этом подробнее будет сказано ниже), т. е. халькопирит проникает в зерна сфалерита с периферии последних или в стороны от пересекающих их трещинок. Участки зерен сфалерита, куда проник халькопирит, анизотропны.

Проводя свои исследования, мы строго следили за тем, чтобы не пропустить вюртцит в рудах южноуральских месторождений, где, по данным Т. Н. Шадлун (1942), этот минерал встречается довольно часто. Однако ни в одном случае указанный минерал



39. Распад тонкодисперсной смеси сульфидов железа и меди (черное) на халькопирит (1) и пирит (2). Комсомольское месторождение. Отраженный свет, увел. 1680

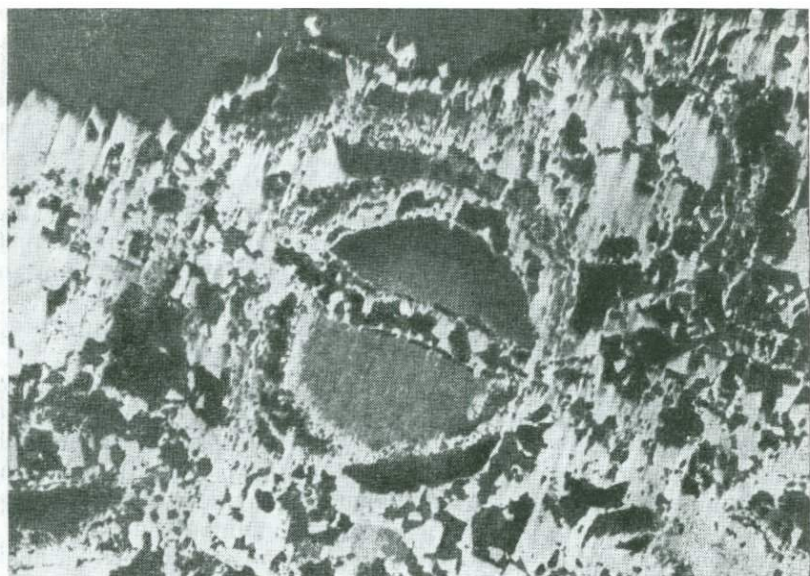
не был обнаружен. Т. Н. Шадлун в своих работах не приводит других доказательств отличия вюртцита от сфалерита, кроме анизотропии. Вероятно, в прошлом ею не учтены предупреждения П. Рамдора (1962) по этому вопросу и то, что изложено выше и в связи с этим допущены неточности в диагностике вюртцита. В начальные стадии диагенеза вюртцит в колчеданных рудах, вероятнее всего, присутствовал. В последующее же время этот минерал превратился в сфалерит.

Минеральным выделениям, возникавшим в начальные стадии процесса раскристаллизации тонкодисперсных масс сульфидов, как видно из приведенного выше, присущи характерные, но сложные текстурно-структурные рисунки (колломорфные, колломорфно-крустификационные, губчатые и другие образования). Сами выделения были метастабильными и претерпевали изменения при дальнейшей раскристаллизации упомянутых масс. Естественно при этом менялись и текстурно-структурные рисунки минеральных выделений. Изменения обусловлены, как хорошо известно, стремлением вещества к такому состоянию, при котором его внутренняя энергия была бы минимальной. Рентгенометрические исследования, например, показали, что в выделениях пирита совершенствуется кристаллическая решетка. Несомненно, что это происходит и в других минералах, что хорошо видно и под микроскопом. Таким образом, пока еще значительные массы руды оста-

вались тонкодисперсными, минеральные выделения, образовавшиеся на ранних стадиях раскristаллизации этих масс, постепенно изменялись, преобразовываясь в тонкозернистые агрегаты. При этом надо иметь в виду следующее. Каждый минерал имеет свои кристаллографические особенности и свою кристаллизационную способность. Это в конечном счете приводит к тому, что зерна одного твердого минерала (в рассматриваемом случае пирита), выросшие одновременно с другими более мягкими минералами (халькопирит, сфалерит) или после этих минералов, идиоморфны относительно последних. Создается ложное впечатление об общем порядке выделения минералов в рудных агрегатах. Только совокупность последовательных наблюдений дает возможность правильно понять ход событий в руде.

Последующие порции минеральных выделений, образовавшиеся при раскristаллизации тонкодисперсных масс сульфидов, претерпевали такие же изменения, и так как раскristаллизация таких масс была неравномерной и сопровождалась появлением контракционных трещин, выполнявшихся рудными же минералами, при этом имела место и дифференциация вещества, то в рудах Блявинского, Комсомольского, Яман-Касинского, Сибайского и других южноуральских месторождений возникли такие агрегаты, в которых имеются участки, сложенные относительно крупными зернами сульфидов, а рядом с такими участками располагаются тонкозернистые, скрытокристаллические, колломорфные, колломорфно-крустификационные выделения и реликты тонкодисперсных землистых сульфидов. Если не учитывать тех изменений в рудах, которые обусловлены диагенезом, то при изучении указанных агрегатов можно выделить несколько парагенетических ассоциаций минералов и отнести эти ассоциации к различным стадиям минерализации рудного процесса.

Как следует из приведенных выше наблюдений, процесс раскristаллизации тонкодисперсных гелеподобных масс во времени и пространстве протекал сложно. На ход процесса влияли качество и количество компонентов, входивших в состав геля, температура, давление, гравитационные и магнитные силы и т. д. После выделения первых порций пирита из гелеподобных масс в них появлялись контракционные трещины. Они заполнялись синерической жидкостью. В последней концентрация рудных компонентов была уже меньше, нежели в геле. Жидкость вследствие этого представляла собой смешанный раствор, т. е. коллоидный и истинный, а стенки трещин и пустот являлись границами двух фаз и на них наиболее интенсивно происходило минералообразование. В ходе раскristаллизации гелеподобных масс сульфидов синерическая жидкость имела все меньшие и меньшие концентрации рудных компонентов. Такая жидкость способствовала перекристаллизации и переотложению минералов, выделившихся раньше. В рудах южноуральских месторождений подтверждения сказанному встречаются часто (рис. 40).



40. Пересечение колломорфного обособления сфалерита и халькопирита (центр фото) трещинкой, в которой выделились пирит (белое) и нерудные минералы (темно-серое); черное — пустотки. Сибай. Отраженный свет, увел. 200

Вследствие взаимодействия синерической жидкости с ранее выделившимися минералами последние замещались, например, халькопиритом и другими минералами. Однако вслед за Т. Н. Шадлун следует подчеркнуть, что масштабы таких замещений в рудах южноуральских месторождений незначительны сравнительно с масштабами замещений в метаморфизованных среднеуральских месторождениях.

Вследствие дробления контракционными трещинами ранних выделений пирита, выделения в таких трещинах пирита же, сфалерита и халькопирита (обычно смеси) возникли такие пространственные соотношения между рудными минералами, которые казалось бы убедительно свидетельствуют о тектоническом дроблении раннего серного колчедана и цементации его обломков минералами последующих стадий минерализации. Однако в действительности указанные соотношения отображают лишь определенный период в жизни руд после того, как они отложились, т. е. это результат тех сложных преобразований, о которых подробно уже говорилось. Придавать таким фактам иное генетическое значение нельзя.

Выше приведены данные, свидетельствующие о дифференциации вещества, которая происходила при раскристаллизации отложившихся из растворов тонкодисперсных сульфидных масс сложного состава. В связи с этим нельзя не остановиться на одном

из важных вопросов — это вопрос о стадийности оруденения в колчеданных месторождениях и первичной зональности в них.

В тех же южноуральских месторождениях, которые в наибольшей степени сохранили свой первоначальный облик и в которых признаки метаморфических изменений не обнаруживаются совсем или они проявлены слабо, хорошо видно, что состав тонкодисперсных рудных масс до их раскристаллизации в пределах отдельных рудных тел не везде был одинаков, т. е. одни участки рудных тел представлены серным колчеданом, а другие существенно обогащены сфалеритом и халькопиритом или одним из этих минералов. Более того, в одних и тех же месторождениях как на Южном, так на Среднем Урале одни рудные тела сложены серным колчеданом, а рядом находящиеся — пиритом, халькопиритом и сфалеритом. Иными словами, в большинстве уральских колчеданных месторождений вне зависимости от того, метаморфизованы они сильно или слабо, отмечается неравномерность в распределении рудных минералов как в отдельных рудных телах, так и в месторождениях в целом, т. е. фиксируется первичная зональность. Переходы от участков рудных тел, сложенных серным колчеданом к участкам, обогащенным другими сульфидами, чаще постепенные. Дифференциация вещества при раскристаллизации тонкодисперсных рудных масс раскрывает нам важный этап в жизни месторождений. Она является одной из причин возникновения кристаллических агрегатов простого и сложного состава. Однако только такая дифференциация не может обусловить неравномерность распределения рудных компонентов в пределах отдельно взятых рудных тел и в масштабе месторождений. Это явление безусловно отображает собой дифференциацию вещества в растворах на путях их следования от магматических очагов к местам рудоотложения и временную последовательность отложения минералов и их ассоциаций.

На неравномерность распределения рудных компонентов как в отдельных колчеданных телах, так и в месторождениях (а последние нередко бывают представлены серией рудных тел, часто соединяющихся между собой по простиранию и падению), исследователи давно обратили внимание и видят в этом одно из доказательств нескольких этапов и стадий оруденения значительно разорванных во времени. При этом единого мнения по данному вопросу не существует. Это указывает на большие трудности в обосновании и достоверном выделении как отдельных этапов, так и стадий оруденения. Если для примера взять работы нескольких авторов, выделяющих стадии оруденения в отдельных месторождениях или в группах таковых, то картина выглядит следующим образом: А. А. Амирасланов (1934) — три фазы; А. Д. Ракчеев (1956) и Е. К. Лазаренко (1947) — две стадии; Н. В. Петровская (1961<sub>2</sub>) — пять стадий; Г. Н. Пшеничный и Т. Н. Шадлун (1962) — четыре стадии; В. И. Смирнов (1968) — три этапа рудообразования; Т. Н. Шадлун (1942) и И. С. Вольтский (Крейтер,

Аристов, Волынский и др., 1958) приводят факты, свидетельствующие об одновременном или близкородственном отложении руд в южноуральских месторождениях.

В качестве обоснований для выделения стадий оруденения в колчеданных месторождениях иногда приводятся данные по изотопному составу серы. Л. Н. Гриненко (1963), например, используя такие данные, выделяет на Сибее три стадии оруденения вместо пяти, выделенных Н. В. Петровской (1961<sub>2</sub>) на этом же месторождении.

Следует заметить, что В. И. Виноградовым (1967), Стантоном и Рафтером (Stanton, Rafter, 1967) и другими убедительно показано, сколь осторожно надо интерпретировать значения  $\delta S^{34}$ , полученные на одних и тех же минералах разных генераций и разных типов руд, на одних и тех же месторождениях.

Сопоставление совокупности всех данных по исследованию руд южноуральских месторождений (а к этим месторождениям надо обращаться в первую очередь, так как они в наибольшей степени сохранили свой первоначальный облик) показывает, что нет веских оснований для того, чтобы в едином процессе рудоотложения усматривать значительно разорванные во времени стадии минералообразования. Упомянутые месторождения образовались в близповерхностных условиях на ранних стадиях развития уральской геосинклинали в конце каждого из вулканических циклов. П. М. Татаринев и П. А. Строна (1967), говоря об особенностях месторождений, связанных с вулканогенными формациями, справедливо отмечают, что образование таких месторождений обусловлено быстрым, лавинообразно развивающимся процессом рудоотложения, исключающим возможность фракционирования растворов и отлагающегося из них материалов. Неравномерность распределения рудных компонентов в месторождениях, как мы уже отметили, объясняется дифференциацией вещества в рудоносных растворах, однако эта дифференциация была далеко не полной. Отложение руд происходило последовательно, сравнительно быстро в один этап и без заметного разрыва во времени из слабо дифференцированных и пересыщенных растворов типа коллоидных. Такой ход событий зафиксирован в самих рудах. Однако нельзя забывать, что на Урале колчеданные месторождения образовывались в разное время. Следовательно, на месторождения, связанные с ранним вулканическим циклом, могли быть наложены рудоносные растворы, питавшие более молодые месторождения в верхних частях вулканогенных комплексов. В таких случаях, естественно, надо ожидать объективных признаков нескольких стадий оруденения, разорванных во времени. Кроме того, многие месторождения на Урале, как это будет показано ниже, несут на себе явные признаки воздействия на них гранитоидных интрузий — продуктов дифференциации габбровой магмы и, вероятно, гранитных интрузий нормального ряда верхнепалеозойского возраста. Под воздействием интрузий в колче-

данных рудных телах осуществлялись в широких масштабах метасоматические замещения, перекристаллизация минеральных агрегатов и дифференциация вещества. Растворами, генетически связанными с гранитоидными и гранитными интрузиями, в рудные тела был привнесен ряд химических элементов — кобальт, молибден, мышьяк, олово, радиоактивные элементы, золото, серебро, бор и др. Таким образом, вследствие перераспределения и переотложения минералов, появления новых минеральных образований в колчеданных месторождениях появились признаки разновременного и качественно различного оруденения.

Нами проведены специально направленные исследования руд ряда представительных месторождений Южного Урала. Можно ли распространять выводы по результатам таких исследований на другие месторождения на Южном и особенно Среднем Урале? Безусловно можно. Нами проводились исследования руд месторождений Учалинского, им. XIX партсъезда, Озерного, Александринского, Молодежного, Гайского. Такие исследования не были столь детальными, как, например, на Бляве, но они вполне достаточны, чтобы заключить, что в только что перечисленных месторождениях руды первоначально отлагались главным образом в виде тонкодисперсных масс и при диагенезе претерпевали такие же изменения, как указано выше. Результаты детальных исследований руд отдельных месторождений других авторов (Прахова, 1968; Петровская, 1968 и др.) не расходятся с нашими данными.

Выше уже отмечалось, что в рудах среднеуральских месторождений встречаются реликты различной сохранности брекчиевидных и брекчиевых текстур, характерных для руд месторождений Южного Урала. Это прямые доказательства того, что руды и среднеуральских месторождений в прошлом были тонкодисперсными и при диагенезе раскристаллизовывались в зернистые агрегаты. Кроме реликтов указанных текстур, сказанное подтверждается и другими фактами. В литературе неоднократно приводились описания колломорфных образований в рудах среднеуральских месторождений (Ярош, 1949<sub>2</sub>, 1964; Червяковский, 1952 и др.). Наши детальные исследования руд месторождений Карабашских, Зюзельского, им. III Интернационала, Ольховского, Ново-Шайтанского, Пьянко-Ломовского, Чернушинского, рудных участков Светлореченского и Чусовского в Полевском районе показали более широкое распространение упомянутых образований и их реликтов, нежели это отмечено в литературе. В Южном месторождении Карабашской группы, кроме описанных нами уже давно реликтов колломорфных структур пирита (Ярош, 1949), в 1962—1967 гг. обнаружены такие же реликты этого минерала лучшей сохранности в центральной части Западной линзы на горизонте 420 м (рис. 41). Так же как и в рудах Южноуральских месторождений, колломорфные выделения пирита в Карабаше постепенно раскристаллизовывались и при этом



41. Реликты колломорфных структур пирита; черное — пустотки. Южное месторождение (Карабаш). Отраженный свет, протравлено, увел. 35



42. Деталь рис. 41. Псевдоморфозы пирита по марказиту, увел. 290

образовались резко зональные (зоны роста I) зерна пирита. В самих колломорфных выделениях часто наблюдаются мелкие пустотки, а между выделениями такие пустотки значительно крупнее. По направлению к таким пустоткам росли зерна пирита. Если сравнивать рис. 24 и 41 с рис. 23, отображающим ход раскристаллизации тонкодисперсного дисульфида железа в Сибире, то никакой разницы не обнаруживается. Пустотки как в том, так и в другом случаях образовались вследствие уменьшения объема раскристаллизуемой тонкодисперсной руды.

В центральных частях реликтов колломорфных выделений пирита в Карабаше встречаются псевдоморфозы пирита по марказиту. Такими псевдоморфозами унаследованы детали внутренне-го строения зерен марказита (рис. 42). Аналогичные псевдоморфозы наблюдаются в рудах Гайского месторождения, где рядом с псевдоморфозами сохранился в реликтах от замещения пиритом марказит.

При изучении многочисленных полированных шлифов из руд Карабашских месторождений и, в частности, из руд Южного месторождения, устанавливаются постепенные переходы от участков, где сохранились колломорфные выделения пирита или реликты таких выделений, к участкам, сложенным зернистым пиритом. В таких участках сохранилось много пустоток и при травлении шлифов легко определяется, что зерна пирита около пустоток крупнее, нежели в удалении от них, и что эти зерна росли в направлении пустоток. Такая картина очень характерна для массивных руд не только Карабаша, но и для Зюсельки, месторождений Кировоградского района и др.

Г. Ф. Червяковским показано, что в рудах месторождения им. III Интернационала, кроме хорошо сохранившихся колломорфных выделений пирита, имеются такие же выделения, в которых видна ритмичность, обусловленная чередованием тонких полосок пирита и других сульфидов (1952). Колломорфные выделения в рудах указанного месторождения имеют сложный состав. В данном случае так же, как в подобных образованиях месторождений Яман-Касы, Комсомольского и других на Южном Урале, нет оснований говорить о одновременном выделении пирита, сфалерита и других минералов.

Наряду с описанными колломорфными выделениями в рудах III Интернационала встречаются глобулы пирита, сфалерита и галенита, которые ничем не отличаются от описанных выше глобул в Комсомольском, Сибайском и других месторождениях.

Так же как и в рудах южноуральских месторождений, на месторождении им. III Интернационала прослеживается в деталях постепенное превращение колломорфных выделений пирита, пирита и других сульфидов в зернистые агрегаты. Однако такие превращения были сложными и сопровождалась дроблением рудного вещества, избирательными замещениями одних минералов другими и т. д. Колломорфные выделения сложного и простого

состава дробились преимущественно по вытянутым зонам, совпадающим по ориентировке с общим направлением сланцеватости во вмещающих породах. Обломки указанных выделений цементировались кварцем, переотложенными сфалеритом, пиритом и другими минералами. Кварц, кроме того, что цементировал обломки колломорфных выделений сульфидов, псевдоморфно и избирательно замещал в таких выделениях сфалерит, галенит и только частично пирит (рис. 43, 44). В результате таких замещений по обломкам или по целым колломорфным выделениям сульфидов образовывались псевдоморфозы кварца, в которых полностью сохранился сложный узор рисунков, присущий незамещенным обособлениям сульфидов (рис. 45). Кроме кварца, по указанным выделениям сульфидов развивались серицит (рис. 45) и хлорит (рис. 46).

Кроме дробления и перечисленных замещений, колломорфные выделения сульфидов перекристаллизовывались; при этом сложный рисунок в них постепенно исчезал, четкие и тонкие полоски-ритмы пирита превращались в зернистый агрегат, а сфалерит и галенит (и халькопирит там, где он есть) из таких же полосок-ритмов выносились полностью или частично оставались в зернистом агрегате пирита.

Мы остановились на колломорфных выделениях в рудах двух среднеуральских месторождений. Можно было бы продолжать примеры и из других месторождений, однако в этом нет никакой надобности, так как эти примеры будут аналогичны приведенным. Следует подчеркнуть только следующее. В разных месторождениях Среднего Урала колломорфные выделения пирита и других сульфидов, а также реликты таких выделений встречаются не в одинаковых количествах. В одних они встречаются сравнительно часто, а в других редко или отсутствуют совсем. Например, в ныне отработанном бывшем Сталинском месторождении, где в рудах широко развиты гнейсовидные текстуры, при самых тщательных исследованиях не удалось обнаружить даже отдаленных признаков указанных образований.

Изложенные выше фактические данные показывают, что и в рудах среднеуральских месторождений за счет раскристаллизации колломорфных обособлений сульфидов образовались зернистые агрегаты последних и, в частности, агрегаты зерен пирита с зональностью роста I. Чтобы стала понятной причина, почему в указанных месторождениях, по сравнению с южноуральскими, руды полнокристалличны и для них характерны иные текстуры и структуры, необходимо рассмотреть признаки и факты, которые свидетельствуют о метаморфизме этих руд. Однако прежде чем это сделать, следует подвести итог всему выше изложенному материалу.

Изучение руд Блявинского, Комсомольского и Сибайского месторождений дает основание сделать следующие главные выводы:

1. Отложение руд в перечисленных и других южноуральских



43. Избирательное и псевдоморфное замещение сфалерита (серое) кварцем (черное) в коллоформных структурах; белое — пирит. Месторождение им. III Интернационала. Отраженный свет, увел. 225



44. То же, что на рис. 43. Тонкие ритмы пирита сохранились в кварце, увел. 225

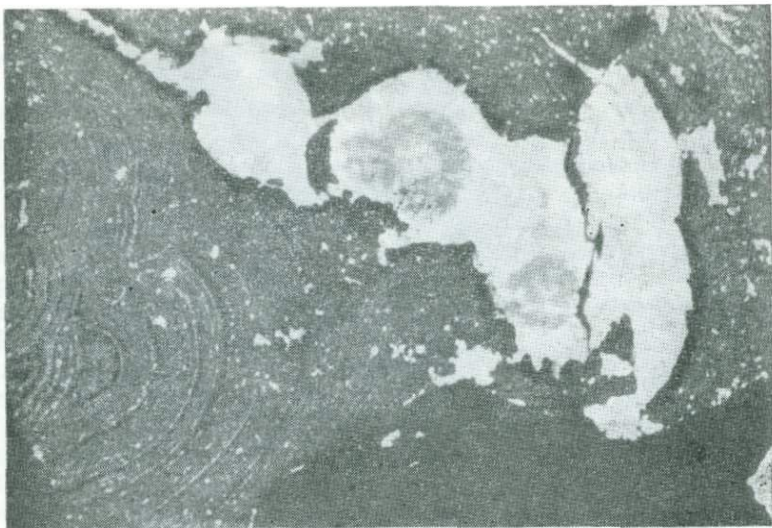
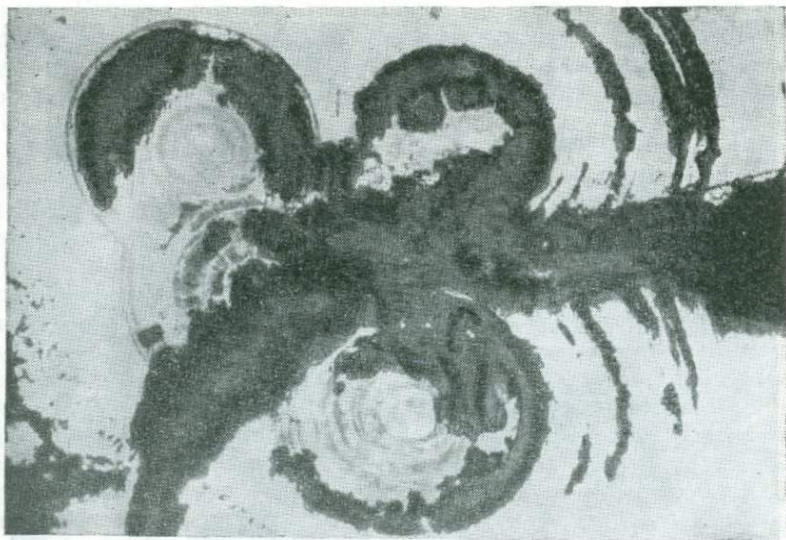


Рис. 45. Псевдоморфозы кварца по колломорфным структурам сфалерита и пирита. Тонкие ритмы пирита сохранились в кварце. В трещинке, секущей пирит, выделился серицит (чешуйки). Месторождение им. III Интернационала. Отраженный свет, увел. 225

Серое — сфалерит, белое — пирит



46. Замещение хлоритом (черное) колломорфных обособлений пирита (белое) и сфалерита (серое). Месторождение им. III Интернационала. Отраженный свет, увел. 225

колчеданных месторождениях происходило сравнительно быстро из пересыщенных растворов типа коллоидных в условиях, исключаяющих резкую дифференциацию вещества. Такие растворы возникли, видимо, из пересыщенных истинных растворов в местах резких перепадов давления и температуры.

2. Отложенные руды первоначально представляли собой гелеподобные тонкодисперсные массы сульфидов простого и сложного состава. В процессе диагенеза такие массы сульфидов претерпевали изменения — они раскристаллизовывались. В результате на месте тонкодисперсных сульфидных масс возникли кристаллические агрегаты с характерными текстурными и структурными рисунками. Зернам главного рудного минерала — пирита из таких агрегатов — присуща четкая зональность роста I рода.

3. Многочисленные реликты метаколлоидных образований, а также реликты брекчиевидных и брекчиевых текстур (характерных для руд южноуральских месторождений) в рудах среднеуральских месторождений свидетельствуют о том, что и здесь первоначально были тонкодисперсные гелеподобные сульфидные массы, которые претерпели диагенетические, а позднее и метаморфические изменения.

### III.

## МЕТАМОРФИЗМ КОЛЧЕДАНЫХ РУД

### ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Значение исследований, направленных на выяснение конкретных признаков метаморфизма колчеданных месторождений, в частности, на Урале, очень велико.

Большой объем приведенного фактического материала показывает, как в результате диагенеза тонкодисперсные массы сульфидов в упомянутых месторождениях в конечном итоге превращались в зернистые агрегаты с целой гаммой характерных текстурно-структурных рисунков. Зернам главного рудного минерала — пирита — в таких агрегатах присуща резкая зональность роста. Образование агрегатов происходило без резкой смены геологических условий нахождения колчеданных рудных тел. В дальнейшем многие месторождения, особенно на Среднем Урале, подвергались метаморфизму под влиянием тепла, механических напряжений и химически активных процессов. В результате руды претерпели радикальные изменения, которые расшифровываются с большим трудом.

Первым из исследователей, кто в 1929 г. высказал предположение о возможном метаморфизме колчеданных месторождений Урала, был А. В. Обручев (Заварицкий, 1936). В этом же году П. М. Замятин (1929) при описании Богомоловской группы месторождений отметил, что пирит часто имеет следы механических деформаций. Тремя годами позднее Д. К. Суслов и М. И. Меркулов (1932) отметили в рудах Карабаша две генерации серицита. По данным этих авторов, серицит второй генерации пронизывает все ранее образовавшиеся сульфиды и жильные минералы, образуя венчики вокруг зерен этих минералов.

Как уже отмечалось, в 1936 г. А. Н. Заварицкий высказал новую гипотезу о генезисе уральских колчеданных месторождений. В этом же году Л. Афанасьев и М. Исаенко (1936<sub>2</sub>) указывали на интенсивную раздробленность пирита в Новоленинском месторождении (Красноуральский район), а Е. Е. Захаров и С. А. Юшко (1936) приводят факты, свидетельствующие о перекристаллизации руд Карнушинского месторождения, обтекания рудных тел сланцами и считают, что эти факты свидетельствуют о метаморфизме руд. С. Н. Иванов и М. И. Меркулов (1937) для Дегтярского месторождения отметили тени давления около пирита, дробление этого минерала, структуры давления в руде и другие признаки динамического воздействия на послед-

нюю. Эти авторы отметили и то, что часть серицита образовалась после рудных минералов.

При жизни А. Н. Заварицкого и вскоре после его смерти были опубликованы результаты интересных исследований колчеданных руд и слагающих их минералов. Особого внимания заслуживают данные по зональности роста в зернах и кристаллах шприта. Эти данные позволили исследователям продвинуться далеко вперед в понимании истории формирования колчеданных руд. Наиболее важными в этом отношении являются работы С. Н. Иванова (1950<sub>1</sub>), Т. Н. Шадлун (1950) и других. Учитывая работы А. Н. Заварицкого, С. Н. Иванова и Т. Н. Шадлун, В. П. Логинов пишет: «В итоге исследования многих колчеданных месторождений Среднего Урала с анализом структурно-текстурных особенностей колчеданных руд (работы А. Н. Заварицкого, С. Н. Иванова, Т. Н. Шадлун и др.) можно считать доказанным интенсивное воздействие динамического и вообще регионального метаморфизма на колчеданные руды» (1958, стр. 357).

Метаморфизм колчеданных месторождений Урала во времени проявлялся сложно и не везде одинаково. В общих чертах это становится понятным, если учесть, что интенсивность колчеданного оруденения (и вулканической деятельности) смещалась с севера на юг и с запада на восток и что в этих же направлениях уменьшается степень метаморфизма рудовмещающих пород и месторождений. Из приведенного следует, что месторождения после своего образования должны были претерпевать различной интенсивности изменения в зависимости от своего возраста и места расположения в пределах вулканогенных рудоносных комплексов. Кроме того, следует иметь в виду, что проявление пострудной тектоники и магматизма не везде были одинаковыми. В одних участках интрузии внедрялись в непосредственной близости от месторождений, обуславливая значительный прогрев последних и соответствующие изменения в них руд и вмещающих пород, в других — колчеданные рудные тела претерпевали изменения в условиях динамического регионального метаморфизма без непосредственного влияния на них интрузий.

Исследования показывают, что не только в различных колчеданных месторождениях того же Среднего Урала, но и в отдельных рудных телах одного и того же месторождения и даже в отдельных участках рудных тел метаморфизм проявлялся неодинаково интенсивно. Разные рудные и нерудные минералы, входящие в состав руд, по-разному реагировали на факторы метаморфизма, что неоднократно подчеркивалось другими исследователями. В рудах возникли новые и сложные картины пространственных соотношений между отдельными минералами и ассоциациями последних, появились минеральные новообразования, изменилось внутреннее строение зерен, слагающих руды минералов, образовались новые текстуры и структуры. Для руд в целом стали характерными ливейные структуры, аналогичные та-

ковым во вмещающих рудные тела породах. Все эти изменения, естественно, взаимосвязаны и взаимообусловлены во времени и пространстве. Следовательно, чтобы показать метаморфические изменения колчеданных руд в целом, необходимо конечные результаты сложных и длительных процессов расчленить на отдельные фрагменты, и может быть, не всегда строго последовательно, но прежде всего раскрыть особенности и тонкости изменений в главных минералах, слагающих рудные агрегаты.

## ПРИЗНАКИ МЕТАМОРФИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ В МИНЕРАЛАХ

Список минералов, входящих в состав руд колчеданных месторождений Урала, довольно большой. Он неоднократно приводился в опубликованных и рукописных работах многих авторов. Наиболее широко распространены сульфиды железа, среди которых преобладает пирит. Сфалерит, халькопирит, борнит и блеклые руды — минералы, определяющие практическую ценность руд, хотя количественно они подчинены сульфидам железа. Магнетит и гематит — частые примеси в колчеданных рудах, а в некоторых месторождениях их выделения бывают значительными. Вместе с борнитом, сфалеритом и халькопиритом нередко присутствует галенит, который в локальных участках рудных тел скапливается иногда до заметных количеств. К малораспространенным и редким минералам относятся халькозин, арсенопирит, молибденит, самородное золото и серебро, аргентит, штроемейерит, станнин, кубанит, алтаит, калаверит и т. д. Из нерудных минералов в колчеданных рудах присутствуют серицит, хлорит, кварц, карбонаты, барит и др.

Если пирит количественно преобладает над другими минералами в колчеданных рудах, то изложение материала по признакам метаморфизма в минералах логично начать с него.

### Пирит

В сплошных и вкрапленных рудах выделения пирита морфологически многообразны. Этот минерал встречается в виде: 1) колломорфных и метаколлоидных обособлений; 2) кристаллических зерен, имеющих неправильные внешние очертания; 3) мелких и крупных идиоморфных кристаллов. Исследователи давно обратили внимание на то, что в среднеуральских месторождениях руды имеют зернистое строение, а метаколлоидные выделения минералов в них, и в частности пирита, имеют сравнительно ограниченное распространение. Наоборот, в рудах южноуральских месторождений колломорфные и метаколлоидные образования и пирита прежде всего — обычное явление. Если взять массу пирита

во всех колчеданных месторождениях Урала и посмотреть на нее с точки зрения преобладания перечисленных выделений, то зерна неправильной формы окажутся на первом месте. Размер таких зерен колеблется в широких пределах — от тысячных и сотых долей до нескольких миллиметров в поперечнике. Кристаллы пирита, имеющие четкие внешние очертания, также не стандартны. Их размер колеблется от едва видимых при больших увеличениях микроскопа до нескольких сантиметров в поперечнике. Кристаллы указанного минерала в южноуральских месторождениях представлены главным образом пентагональными додекаэдрами, в среднеуральских — гексаэдрами, однако на Лёви-хе X, где обнаружены брекчиевые и брекчиевидные текстуры, характерные для руд месторождений Южного Урала, много и пентагональных додекаэдров пирита (обычно в пустотах).

Кристаллы пирита, представляющие крупные (1—2 см и более) гексаэдры, встречаются преимущественно во вмещающих рудные тела сланцах на Среднем Урале, но есть и исключения. В сланцах же встречаются пентагональные додекаэдры, а, например, в Белореченском месторождении, кроме гексаэдров и пентагональных додекаэдров, нами обнаружены в хлоритовом сланце лежащего бока октаэдры, тетрагонтриоктаэдры и кристаллы, представляющие собой комбинации различных простых форм. Размер упомянутых кристаллов пирита до 1 см в поперечнике, и, как правило, все они окружены линзообразными венчиками крупночешуйчатого хлорита.

Наибольшего внимания заслуживают зерна пирита, составляющие основную массу колчеданных руд. Как указано выше, большинство таких зерен имеют неправильные внешние очертания. Иногда в них видны зоны роста вследствие выделения по последним других сульфидов или нерудных минералов. Однако делать определенные выводы об особенностях роста, смене кристаллографических форм и тем более о последующих изменениях зерен пирита по таким зонам нельзя. Внутреннее строение указанных зерен в полной мере раскрывается травлением по методике, разработанной автором совместно С. Н. Ивановым (1950<sub>1</sub>), а также другими методами. Травлением в зернах и кристаллах пирита выявляются скрытые зоны роста, о которых говорилось выше. В зернах пирита с зонами роста I почти не наблюдается пойкилитовых включений других минералов. Пойкилитовые включения других сульфидов и нерудных минералов часты в зернах и кристаллах пирита, выросших при перекристаллизации руд. В таких зернах и кристаллах пирита травлением часто обнаруживается зональность II рода (Иванов, 1950<sub>1</sub>).

Зональность роста I, как уже отмечалось, является самым характерным генетическим признаком основной массы зерен пирита в рудах уральских колчеданных месторождений, что впервые было отмечено С. Н. Ивановым (1950<sub>1</sub>). В расшифровке многих вопросов, связанных с диагенезом и метаморфизмом руд,

эта зональность имеет не меньшее значение, нежели колломорфные структуры и их реликты. Поэтому не случайно тот же С. Н. Иванов, А. Н. Заварицкий и другие исследователи уделяли много внимания указанной зональности. Проследивая особенности диагенетических изменений тонкодисперсных масс сульфидов, нам удалось показать, как образуются зерна пирита с зональностью роста I (рис. 15) и, что очень важно, раскрыть природу самой зональности (Ярош и др., 1968).

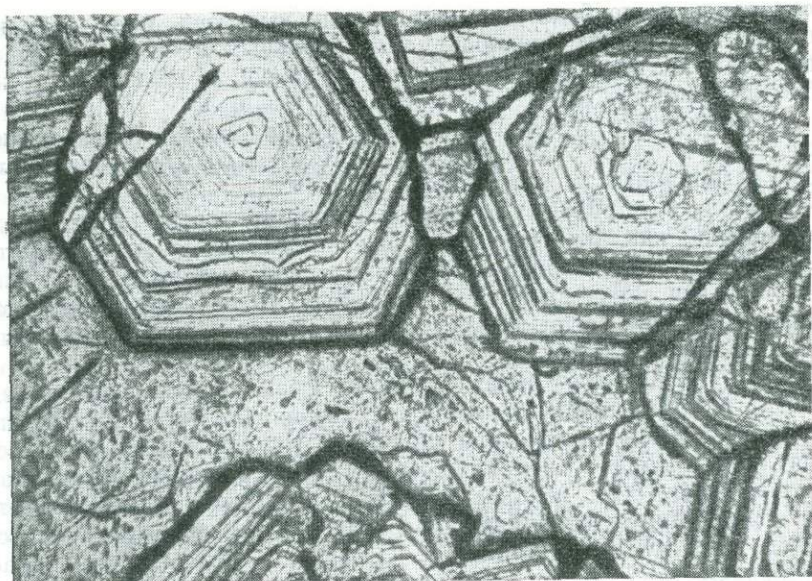
Рисунки, образуемые зональностью I, особенности их проявления в зернах пирита представляют собой интересную область для исследований. При изучении полированных шлифов из колчеданных руд легко можно видеть, что зоны роста I в одних зернах пирита перекрывают всю площадь таких зерен (их плоскостные срезы), в других — зоны вытравливаются только в центрах, а периферические их части свободны от зон роста. Ширина незональных каемок в зернах упомянутого минерала бывает самой разнообразной. В пределах не только одного рудного тела, но даже одного полированного шлифа прослеживаются разнообразные варианты проявления в пирите зон роста I. Нередко можно видеть переходы от агрегатов, в которых зерна зональны во всем своем объеме, к агрегатам, где зерна свободны от зональности.

С. Н. Ивановым было подмечено, что в зернах пирита из южноуральских месторождений свободные от зональности каемки в подавляющем большинстве случаев отсутствуют и наряду с грубыми зонами в них вытравливается масса тонких зон. В зернах же пирита из среднеуральских месторождений сохраняются только грубые зоны. Сказанное подтверждается и нашими рис. 47 и 48.

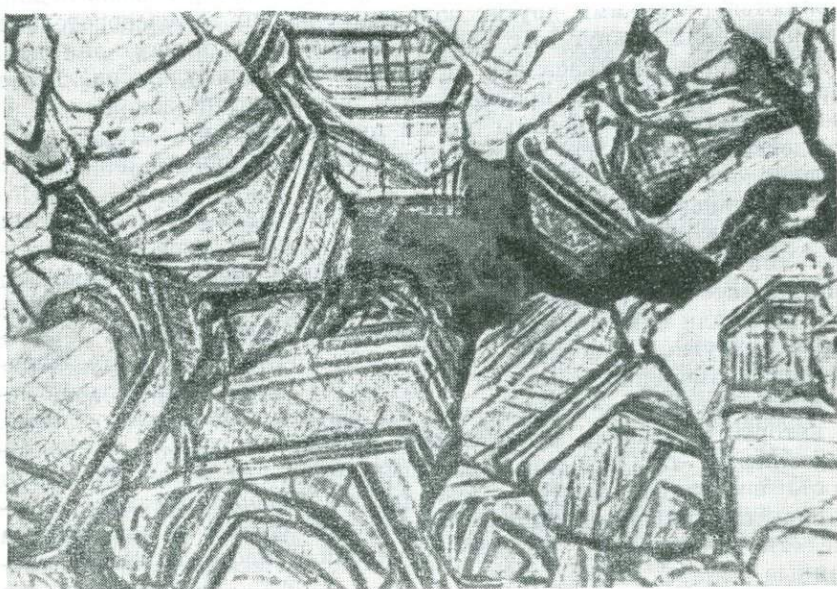
В среднеуральских месторождениях полнозональные зерна пирита встречаются в массивном серном колчедане, особенно в центральных частях рудных тел, где сохранились четкие реликты колломорфных выделений пирита, псевдоморфозы пирита по марказиту в центральных частях таких выделений (см. рис. 41, 42). В полосчатых рудах, где присутствуют в заметных количествах сфалерит, халькопирит и другие минералы, зоны I в зернах пирита не обнаруживаются совсем или приурочены только к центрам последних.

С. Н. Иванов (1950<sub>1</sub>) первым из исследователей дал правильное толкование описанным особенностям проявления зональности роста I в зернах пирита из колчеданных месторождений Урала. Этот исследователь полагал, что кристаллическим зернам упомянутого минерала из колчеданных руд раньше была присуща зональность роста I, которая частично или полностью исчезла при метаморфизме. В 1953 г. нами также были приведены доказательства исчезновения зон роста I в зернах пирита (Ярош, 1953).

Позднее результаты собственных исследований и наши доказательства исчезновения зон роста I в зернах пирита С. Н. Иванову



47. Резко зональные зерна пирита. Сибай. Отраженный свет, протравлено, увел. 70



48. Грубые зоны роста I в пирите. Месторождение им. III Интернационала. Отраженный свет, увел. 70

Черное — нерудный минерал

показались малоубедительными, и он высказал иное возможное, по его мнению, толкование незональных каемок в указанных зернах (Иванов, 1957, 1959<sub>2</sub>). В связи со сказанным, необходимо еще раз уделить внимание этому вопросу.

Прежде всего следует обратить внимание на неувязки и противоречия в новых соображениях С. Н. Иванова по поводу природы незональных каемок в зернах пирита.

1. Если в пиритовых и пирит-халькопиритовых рудах Среднего Урала, как это утверждает названный автор, зерна пирита не подвергались сколько-нибудь заметным деформациям после того, как эти зерна выкристаллизовались, то не ясно, откуда появились обломки зерен того же пирита, которые якобы обрастали незональным пиритом.

2. В колчеданных рудах Среднего Урала очень много зерен пирита с зональными центрами и незональными каемками по периферии. Большие объемы сплошной рудной массы часто состоят почти нацело из таких зерен (примеси других минералов составляют 2—5%). Микроскопическое изучение руд показывает, что зерна пирита выполняют пространство так, что часто не остается даже мелких пустоток, т. е. зерна со всех сторон плотно примыкают друг к другу наружными незональными каемками, а зональные центры при этом не соприкасаются. Незональные каемки во многих случаях составляют как минимум половину объема пиритных зерен. Если зональные центры в последних являются обломками других зональных зерен, то, следовательно, до появления вокруг них каемок незонального пирита они друг с другом не соприкасались, и не понятно, как удерживались в пространстве. Можно предположить, что обломки зональных зерен были сцементированы каким-то материалом, который впоследствии заместился незональным пиритом, однако для такого предположения нет оснований.

Зональность роста I, являясь отображением несовершенства внутреннего строения зерен пирита, выросших при раскристаллизации тонкодисперсных масс дисульфида железа, раскрывает последовательность роста этих зерен, показывает, как в последних исчезали одни простые кристаллографические формы и появлялись другие. Она дает возможность проследить гамму сложнейших изменений в зернах и агрегатах зерен пирита при метаморфизме. Вполне естественно, что физико-химические условия, в которых оказались зерна пирита при метаморфизме, резко отличались от тех условий, в которых росли эти зерна. Во время роста последних, на их гранях, ребрах и вершинах адсорбировались субмикроскопические сферической формы тельца пирита же (см. рис. 16, 18). До смены условий в месторождениях указанные тельца сохранялись в зернах пирита, фиксируя в них зоны роста I. При метаморфизме субмикроскопические тельца в зернах пирита начали исчезать, т. е. при перекристаллизации (гомогенизации) таких зерен они были усвоены последними. Го-

могенизация прежде всего происходила внутри зерен пирита. Тонкие зоны роста в них исчезали, а более грубые сохранялись (см. рис. 47, 48). В дальнейшем наряду с указанным процессом зоны роста I постепенно исчезали с периферии упомянутых зерен и, таким образом, в последних появлялись незональные каемки.

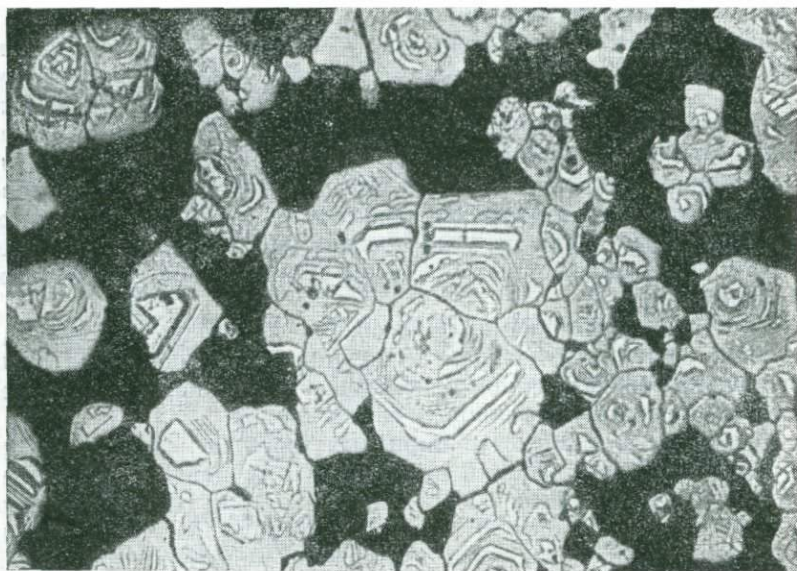
В связи с исчезновением зон роста I внутреннее строение зерен пирита становилось более совершенным. Е. В. Праховой показано, что кристаллическая решетка незональных зерен пирита совершеннее, нежели у зональных, кроме того, микротвердость у первых значительно выше сравнительно со вторыми (Прахова, 1968).

На незональные каемки и особенно переходные участки от каемок к зональным центрам зерен пирита уже обращали и еще раз следует обратить самое пристальное внимание, так как именно здесь скрыт ответ на природу самих каемок.

На огромном количестве пиритных зерен из различных среднеуральских месторождений видно, что в их центрах зоны роста I четкие (черные линии — бороздки) и замкнутые. Это обычно трех-, четырехугольники и другие геометрические фигуры. Ближе к периферии зерен зоны постепенно теряют четкость своих очертаний и становятся тоньше. В одном или нескольких участках зерна они разрываются или как бы растворяются в незональных участках — втеках, которые являются продолжением незональных каемок. Часто самые наружные зоны зональных центров зерен пирита обнаруживаются в виде мелких разобщенных реликтов в незональных каймах. По этим реликтам без труда восстанавливаются размеры и форма бывших когда-то замкнутых зон. Между незональными каемками и зональными центрами зерен пирита не фиксируются границы, наоборот, всегда видно постепенное исчезновение зон в незональных каймах.

Еще более наглядная картина во взаимоотношениях незональных каемок и зон роста I отмечается в зернах пирита, которые разбиты трещинами на отдельные обломки, а такие явления в колчеданных рудах обычны. В таких случаях видно, что незональные каемки имеются и на периферии обломков. Края обломков обнаруживаются не замкнутые зоны, а участки зонального рисунка раздробленного зерна (рис. 49). Указанные обломки зерен пирита в рудной массе бывают разъединены и сцементированы другими сульфидами или нерудными минералами. Тогда такие обломки без последовательных и тщательных наблюдений могут быть приняты за самостоятельные зерна пирита, реликты зональных рисунков в которых могут обусловить различные толкования генезиса самих «зерен» и незональных каемок в них.

В зернах пирита преимущественно из борнитсодержащих руд наряду с зонами роста или их реликтами травлением выявляются кольцеобразные фигуры (Ярош, 1953). Позднее было установлено, что такие же фигуры обнаруживаются ультрафиолето-



49. Исчезновение зон роста в стороны от трещинок, пересекающих зерна пирита. Зюзельское месторождение. Отраженный свет, протравлено, увел. 70

Черное — нерудные минералы

вым светом в сфалерите и сериците из тех же руд и что они являются радиоактивными двориками (Ярош, Юрин, 1965, 1966). Такие же дворики травлением обнаруживаются в редких случаях в борните, теннантите и халькопирите. Изучение большого количества полированных шлифов показало неизменную приуроченность радиоактивных двориков к незональным каймам пиритных зерен. В зональных участках последних никогда не бывает радиоактивных двориков.

Наличие радиоактивных двориков и особенности их локализации в зернах пирита и сфалерита как количественно преобладающих минералов в колчеданных рудах является очень важным фактом, свидетельствующим о том, что в уже отложившиеся и претерпевшие диагенетические изменения руды были принесены химические элементы, характерные для более поздних, нежели колчеданное оруденение кислых интрузий.

Приведенные данные наглядно показывают, что нет оснований сомневаться и подвергать ревизии те выводы о природе незональных каемок в зернах пирита, к которым пришел С. Н. Иванов (1950<sub>1</sub>), а позднее и другие исследователи. Незональные каемки в зернах пирита — одно из наиболее широко распространенных и убедительных доказательств того, что колчеданные руды претерпевали метаморфические изменения после того, как они были значительно уже преобразованы в стадию диагенеза.

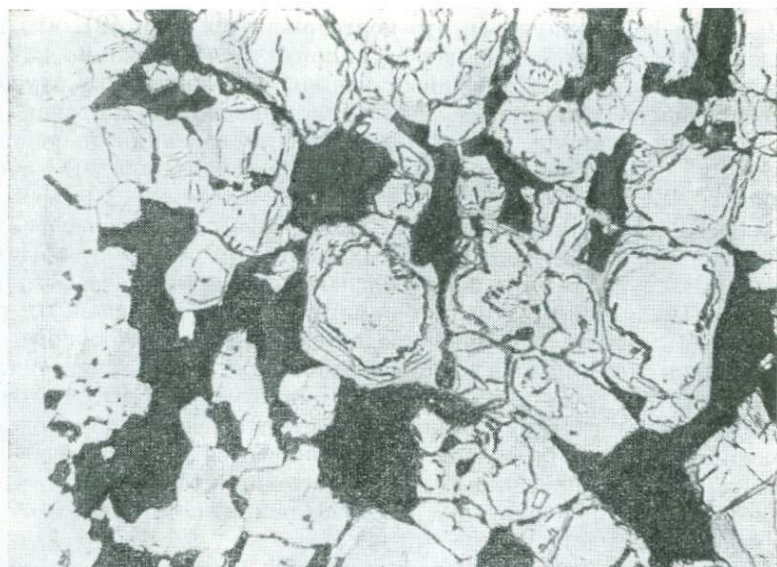
Следует подчеркнуть (и это подтверждается рис. 49), что исчезновение зон роста I в зернах пирита и образование в них или в их обломках незональных каемок в большинстве случаев не сопровождается видимым изменением внешних контуров таких зерен и обломков этих зерен. При исчезновении зон роста I в зернах пирита не появляются какие-либо видимые включения.

Для сопоставления рассмотрим теперь факты, которые свидетельствуют об обрастании пиритных зерен, их обломков, выделений пирита с реликтами колломорфного строения более поздним пиритом. Прежде всего следует отметить, что в колчеданных рудах указанные обрастания не представляют исключительного явления, однако сравнивать их с масштабами исчезновения зональности роста в зернах пирита нельзя; они отмечаются реже. Кроме того (а это главное), между обрастаемым и более поздним пиритом всегда при травлении обнаруживается граница раздела, при этом в более позднем нарастающем пирите всегда обнаруживается зональный рисунок, не совпадающий с таковым в обрастаемом зерне (рис. 50).

Мы уже приводили в печати примеры обрастания незональных обломков и выделений пирита с реликтами колломорфного строения пиритом же (Ярош, 1964<sub>2</sub>). Другие авторы также уделяли этому вопросу внимание. Аналогичные примеры можно было бы разнообразить и продолжить, однако суть дела останется одна и та же: картины, вытравливаемые на обрастаемом и нарастающем пирите, всегда будут разными. Эти картины не могут свидетельствовать о более позднем обрастании незональным пиритом зональных обломков зерен этого же минерала.

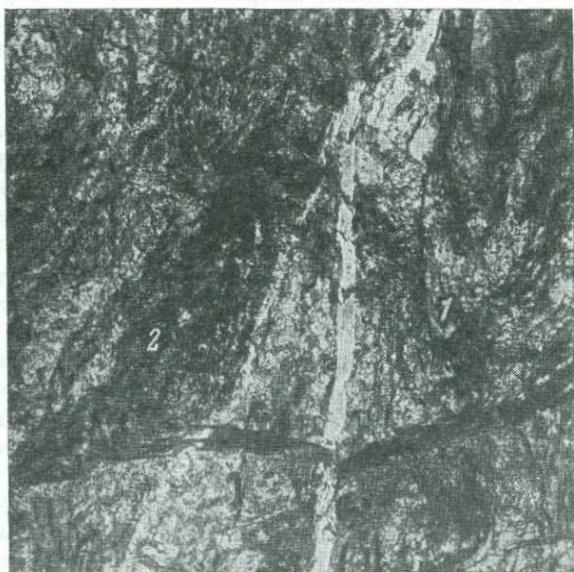
Раскрывая и устанавливая признаки, которые свидетельствуют об изменении рудных агрегатов и в первую очередь пирита как главного минерала таких агрегатов, необходимо обращать самое серьезное внимание на деформации минералов. Из работ Д. Флина (1967) и Д. Мак-Лина (1967) следует, что практически без деформации метаморфизм невозможен.

Хрупкие деформации в рудах колчеданных месторождений Урала проявлены широко, что подчеркивалось и другими исследователями. Следы таких деформаций наблюдаются от масштабов отдельно взятых зерен пирита до больших участков рудных тел, вскрытых забоями рудников. Приведем конкретные примеры. В Зюзельском месторождении на горизонте 185 м и в других местах рудные тела мощностью от одного до нескольких метров, представленные тонкозернистым серным колчеданом, пересечены многочисленными трещинами, определенной ориентировки которые не имеют. Мощность трещин от 1 мм до 12—15 см (рис. 51). За пределы рудных тел, т. е. в боковые породы, трещины не продолжаются. Указанные трещины выполнены чистым серицитом. В этом же месторождении во многих местах густовкрапленные руды пересечены трещинами, выполненными ангидритом



50. Обрастание зональным пиритом незональных обломков этого же минерала. Зюзельское месторождение. Отраженный свет, протравлено, увел. 98

Черное — нерудные минералы



51. Выделение серицита (белое) в трещине, пересекающей массивную руду (1); 2 — вмещающие породы. Зюзельское месторождение. Фото забоя, уменьшено в 20 раз

(Ярош, 1964<sub>2</sub>). В Карабашских, Кировоградских (Левиха), Красноуральских и других месторождениях в рудных телах встречаются трещины, на стенках которых образовались друзы крупных кристаллов халькопирита (до 2 см и более в поперечнике), кварца, сфалерита и других минералов.

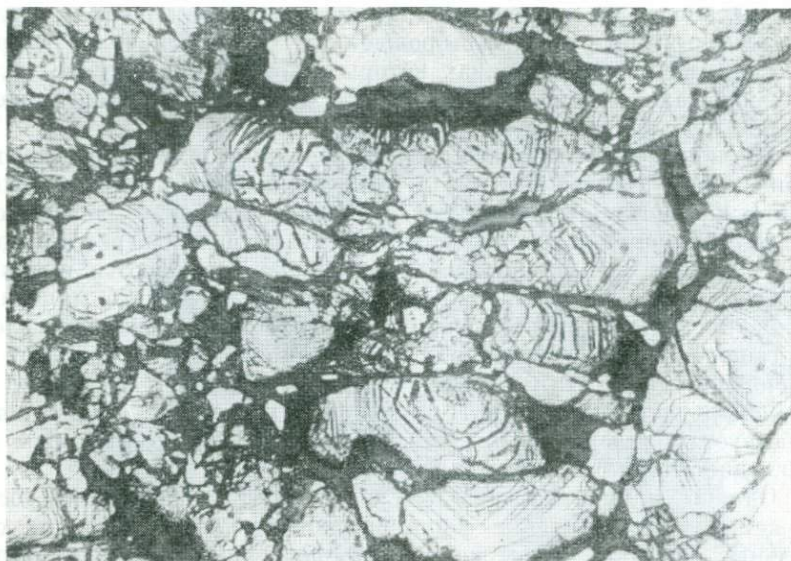
Изучение под микроскопом полированных шлифов из колчеданных руд показывает, что в микромасштабах хрупкие деформации на зернах пирита также проявлены широко. В большинстве случаев определенной ориентировки трещин, пересекающих зерна пирита, не устанавливается. Однако встречаются и такие участки в рудах, где трещинки в зернах отмеченного минерала ориентированы согласно с общим направлением отдельных полос, обогащенных сфалеритом или халькопиритом или наоборот — перпендикулярно этим полосам.

Зональность роста I и II в зернах и кристаллах пирита способствует выявлению в них следов хрупких деформаций. Рис. 52 наглядно это подтверждает.

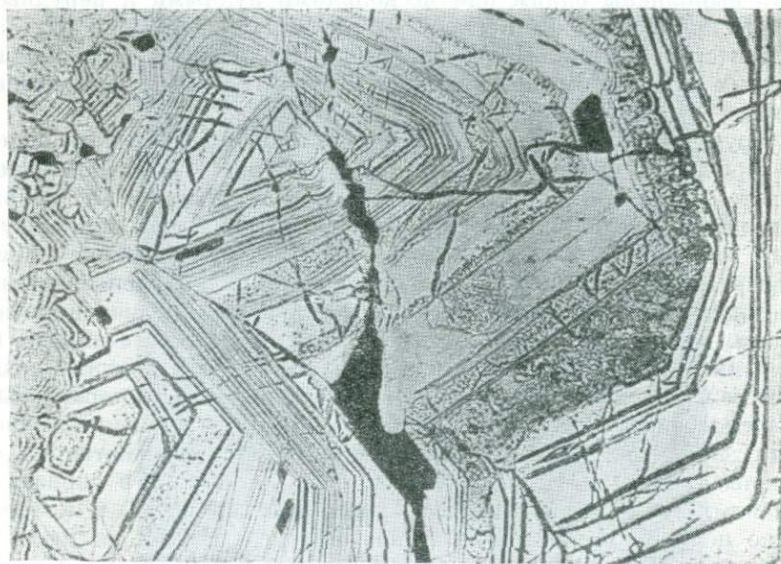
Однако, в ряде случаев в зернах пирита зональности роста может не быть, а такие зерна бывают раздробленными на отдельные обломки. Чтобы не принять последние за самостоятельные зерна, можно воспользоваться анизотропией пирита, на основании которой мы останавливались в одной из своих статей (Ярош, 1961<sub>2</sub>).

Трещинки в зернах пирита или агрегатах таких зерен могут быть выполнены одним или несколькими рудными и нерудными минералами, входящими в состав руд и вмещающих пород данного месторождения. Часто указанные трещинки в рудах, обогащенных сфалеритом и халькопиритом, бывают выполнены последними.

Хрупкие деформации пирита не только в пределах одного месторождения, но даже в пределах небольших участков одного и того же рудного тела проявлены неодинаково интенсивно. Нередко в пределах одного полированного шлифа или штуфа руды можно наблюдать мелкие участки, в которых зерна пирита подверглись интенсивному дроблению, а в рядом расположенных участках такие же зерна не несут никаких признаков деформаций. Говоря о неравномерном проявлении стресса в пирите, необходимо иметь в виду следующее. В колчеданных рудах Среднего и реже Южного Урала зональные зерна этого минерала были разбиты многочисленными тонкими трещинами, однако часто сами зерна при этом не разъединились в пространстве на отдельные обломки. В таких зернах, так же как и в зернах, не разбитых трещинами, шло преобразование зон роста, т. е. вследствие перекристаллизации тонкие зоны исчезали, и на месте их появлялись более широкие и более однородные полоски, которые по существу также являются зонами, но видоизмененными. В этих полосках-зонах трещины, пересекающие все зерно пирита или части такого зерна, исчезают (рис. 53).



52. Дробление зональных зерен пирита и выделение в трещинах серицита (черное). Зюзельское месторождение. Отраженный свет, протравлено, увел. 98



53. Исчезновение трещинок в зональных зернах пирита в связи с рекристаллизацией последних. Южное месторождение (Карабаш). Отраженный свет, протравлено, увел. 35

Когда зерна пирита претерпели более интенсивную рекристаллизацию, то микротрещиноватость в них исчезает полностью или почти полностью и при изучении таких зерен под микроскопом невозможно даже предположить, что когда-то они были сильно трещиноваты. Исчезновение микротрещин вследствие рекристаллизации наблюдается и в зернах пирита, в которых зоны роста не обнаруживаются.

Наиболее наглядно интенсивные динамические воздействия на колчеданные руды и, в частности, на пирит, прослеживаются в рудах с гнейсовидной текстурой, где зерна указанного минерала приобрели линзообразную форму и ориентировку, согласную со сланцеватостью во вмещающих породах.

В связи с тем, что рудам с упомянутой текстурой исследователями уделено много внимания и высказаны различные точки зрения на их генезис (Иванов, 1950<sub>1</sub>, 1955; Логинов, 1950), этому вопросу следует еще раз уделить внимание.

Руды с гнейсовидной текстурой встречаются в колчеданных месторождениях Среднего Урала. На Южном Урале близкие к ним руды отмечены Г. Н. Пшеничным и Т. Н. Шадлуи (1962) только в Гайском месторождении.

В месторождениях Карабашских, Зюзельском, Кировградского района и других руды с гнейсовидной текстурой приурочены главным образом к краевым частям рудных тел и реже встречаются в середине их.

Гнейсовидные текстуры в рудных телах прослеживаются в зонах мощностью от нескольких сантиметров до нескольких метров, наблюдаемых в забоях рудников. Здесь массивная руда расщепляется мелкими полосками, в которых зерна пирита раздроблены. Форма обломков таких зерен удлиненная, часто линзовидная.

Обломки сцементированы главным образом серицитом, к которому в незначительных количествах примешаны хлорит и кварц. Мелкие полоски постепенно переходят в сравнительно мощные зоны типичных гнейсовидных руд, в которых обломки пиритных зерен имеют удлиненную линзообразную форму и сцементированы почти чистым серицитом. Как мелкие полоски, так и более крупные зоны всегда ориентированы согласно со сланцеватостью вмещающих пород. В гнейсовидных рудах встречаются обжатые гнезда кварца с более крупными, нежели в руде, изометричными зернами пирита. Обжатые участки массивной руды или кварца, как и пиритные зерна, имеют удлиненную линзообразную форму и пространственная их ориентировка такая же, как у зерен пирита. Характерно, что количество пирита по сравнению с нерудными минералами (а это главным образом серицит), в гнейсовидных рудах значительно меньше, нежели в рудах массивных.

Непосредственно в гнейсовидных рудах и переходных к ним разностях виден механизм образования удлиненных и линзооб-

разных обломков зерен пирита. На рис. 52 показано дробление зональных зерен последнего, а выше изложены доказательства исчезновения зональности роста I (см. рис. 49). Именно в гнейсовидных рудах в обломках пиритных зерен встречаются только редкие реликты указанной зональности. Нами было показано, что только в таких обломках путем структурного травления выявляется четкая спайность по кубу (Ярош, 1953). В свое время мы не оценили этот факт, указывающий на деформации в пирите, на что обратил внимание П. Рамдор (1962).

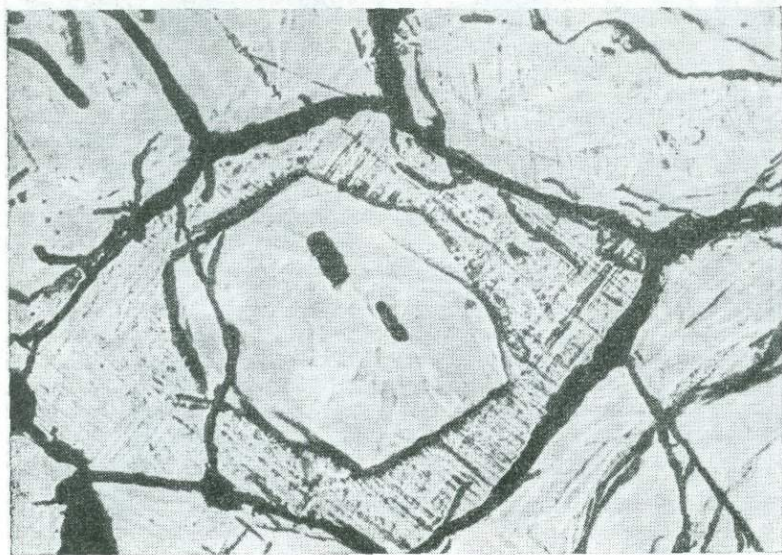
Спайность в зернах и кристаллах пирита можно отнести к категории пластических деформаций (Остапенко, 1968). Такие деформации в большинстве случаев начинали проявляться в периферических частях зерен указанного минерала (рис. 54). В рудных телах, например, Карабашских месторождений прослеживаются постепенные переходы от руд неравномернозернистых, в которых зерна пирита изометричны, к рудам с гнейсовидной текстурой, где зерна этого же минерала удлинены и часто имеют линзообразную форму. При таких переходах неизменно устанавливается усиление пластических деформаций пирита, т. е. в гнейсовидных рудах спайность в зернах минерала обнаруживается во всем их объеме (рис. 55).

Трещинки спайности способствовали разъединению зерен пирита и их обломков на более мелкие части и преимущественно в плоскости сланцеватости. Серицит при этом играл роль «смазочного материала». На рис. 55 видны в некоторых зернах пирита реликты зональности роста. Трещинками зерна разбиты на части. Эти части по отношению друг к другу могут быть смещены в пространстве, и тогда без тщательного анализа материала их ошибочно можно принять за самостоятельные зерна.

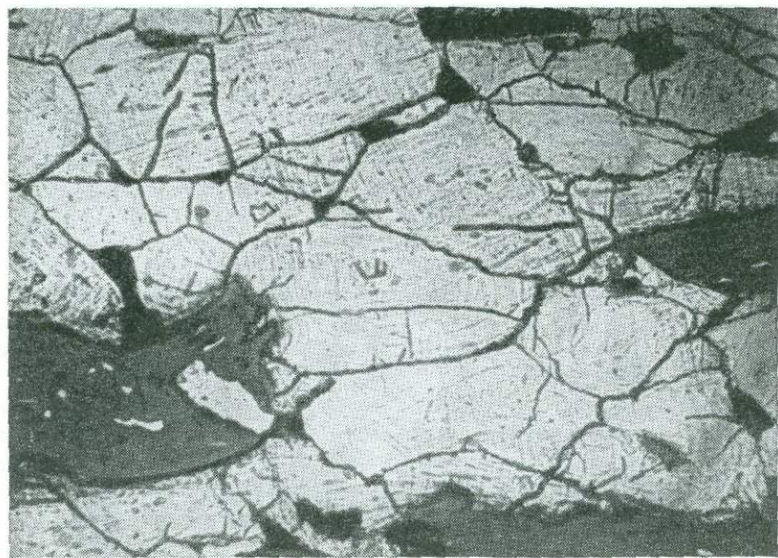
Спайность в зернах и их обломках обычно обнаруживается на незональных каймах. Если на последних имеются радиоактивные дворики, то вследствие проявления спайности они становятся плохо заметными или вовсе не заметными (рис. 56). Как очень редкое исключение дворики обнаруживаются в зернах пирита, обладающих хорошей спайностью. Это показывает, что такие дворики возникли после деформаций в пирите.

В полированных шлифах встречаются явления, когда зерна пирита трещинками разъединяются так, что реликты зон роста оказываются в краевых частях отдельных удлиненных обломков или на клинообразных концах последних. Естественно, что в данном случае форму обломков и приуроченность реликтов зон роста к их краям или концам можно объяснить лишь дроблением преимущественно по спайности.

В гнейсовидных рудах спайность в зернах пирита обнаруживается только травлением. Однако в том же Карабаше в боршито-содержащей руде, где гнейсовидной текстуры нет, спайность в зернах указанного минерала четко видна потому, что по ней выделился халькопирит. Аналогичные явления встречаются и в



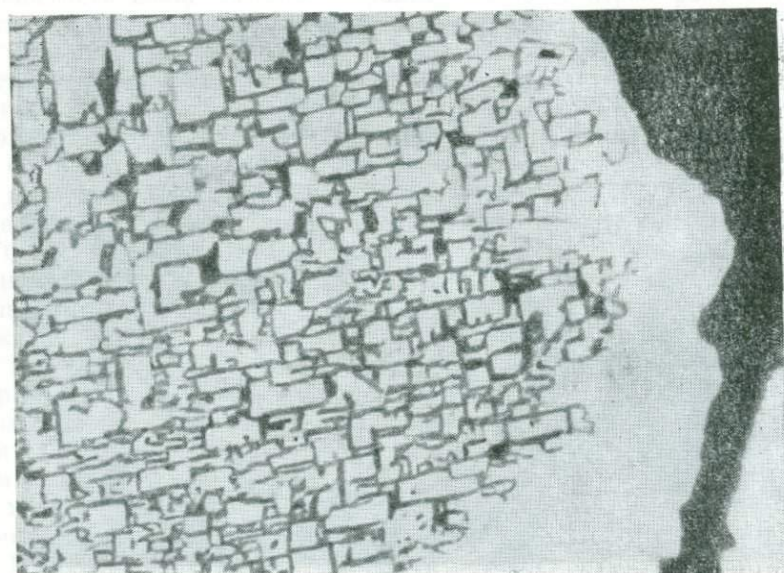
54. Проявление спайности в периферических частях зерен пирита. Южное месторождение (Карабаш). Отраженный свет, протравлено, увел. 225



55. Зерна пирита, в которых проявлена спайность. В одном зерне (центр фото) сохранились реликты зон роста. Карабаш. Отраженный свет, протравлено, увел. 70  
Черное — нерудные минералы



56. Исчезновение радиоактивного дворика в связи с проявлением спайности в зерне шрита. Карабаш. Отраженный свет, увел. 210



57. Трещинки спайности в пирите (белое), выполненные сфалеритом (серое). Месторождение им. 50 лет Октября. Отраженный свет, увел. 1680  
Черное — нерудные минералы

других месторождениях. Например, в рудных агрегатах месторождения им. 50 лет Октября, где макроскопически видны деформированные зоны и участки, зерна пирита резко деформированы: в них приоткрылись трещинки спайности, по которым выделился сфалерит или нерудный минерал (рис. 57). Отмечается при этом следующее. Зерна пирита, разбитые по спайности на мелкие квадратики и ромбики (в срезах), с периферии рекристаллизуются и освобождаются от сфалерита и нерудного минерала.

В связи с образованием гнейсовидных текстур в колчеданных рудах заслуживают внимания данные Т. И. Фроловой (1952) и В. П. Логинова и соавторов (1963) по определению оптической ориентировки кварца в сланцах и серноколчеданной руде. Эти данные свидетельствуют о метаморфизме вместе с сульфидами одного из распространенных в колчеданных месторождениях минерала — кварца.

Приведенные данные показывают, что главный рудный минерал в колчеданных рудах — пирит — несет на себе следы интенсивных динамических воздействий.

В рудах Среднеуральских месторождений обычны порфировидные структуры, когда в сплошной руде, представленной мелко- и среднезернистым пиритом или пиритом и другими минералами, выделяются крупные зерна пирита. Еще более крупные зерна и кристаллы этого минерала обнаруживаются в рудных телах на фронтах замещения пирита, например, пирротинном или магнетитом, а также в сланцах, вмещающих рудные тела.

Выше мы уже упоминали, что в зернах пирита с зонами роста I пойкилитовых включений практически не наблюдается. Зерна и кристаллы пирита, выросшие при перекристаллизации и переотложении этого минерала во время метаморфизма руд, почти всегда содержат пойкилитовые включения тех минералов, которые их окружают. Если не учитывать всех признаков метаморфизма месторождений и, в частности, перекристаллизации пирита, то пойкилитовые включения того же серицита в последнем можно принять за доказательство отложения руд после того, как кварцево-серицитовые сланцы уже были сформированы. В новообразованиях пирита часты пойкилиты халькопирита, сфалерита, галенита, теннантита и борнита. Следовательно, если пойкилитовые включения серицита принимать за свидетельство определенной последовательности образования кварцево-серицитовых сланцев и отложения руд, то включения указанных минералов с такой же силой убедительности будут указывать на отложение халькопирита и других минералов до пирита, что будет противоречить приведенным выше наблюдениям по дифференциации вещества при раскристаллизации тонкодисперсных выделений сульфидов и тем исследователям, которые показывают, что основная масса серного колчедана выделилась раньше сульфидов меди и цинка.

Кроме пойкилитовых включений новообразования пирита, возникшие при перекристаллизации и переотложении рудного вещества, резко отличаются от зерен пирита, выросших во время раскристаллизации тонкодисперсного дисульфида железа следующим:

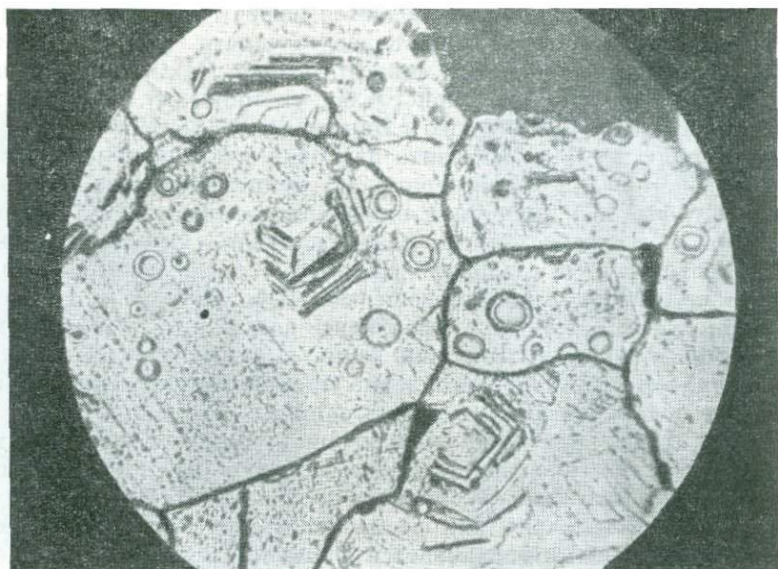
1) чаще всего гексаэдрическим обликом кристаллов; пентагональные додекаэдры, октаэдры, тетрагонтриоктаэдры и другие простые формы и их комбинации отмечаются редко (кристаллы пирита, выросшие на стенках пустот при раскристаллизации тонкодисперсного  $\text{FeS}_2$ , почти всегда представлены пентагональными додекаэдрами);

2) зональностью роста, которая С. Н. Ивановым условно принята за зональность II;

3) содержаниями примесей химических элементов. Например, в Зюзельском месторождении переотложенный пирит (при замещении пирита магнетитом) содержит кобальта в три с лишним раза больше, а селена и теллура в 7—8 раз меньше по сравнению с непереотложенным пиритом. В Сибге Н. В. Петровская (1961<sub>2</sub>) также отмечает уменьшение селена и теллура в более крупных выделениях последнего. Редко в сплошных рудах Зюзельского, Карабашских и других среднеуральских месторождений между зерен пирита и в самих зернах обнаруживаются мелкие включения алтаита и других теллуридов. Т. Н. Шадлун (1961) описала теллуровисмутин в рудах Учалинского месторождения. Вероятнее всего, такие образования теллуридов связаны с очищением пирита от примесей при его перекристаллизации;

4) в зернах пирита, образовавшихся при раскристаллизации тонкодисперсного  $\text{FeS}_2$  и обладающего зональностью роста I, радиоактивные дворики обнаруживаются только на незональных каймах (рис. 58), в новообразованиях же пирита дворики более или менее равномерно распределены по всему их объему (рис. 59).

Д. С. Коржинским (1953) показано, что трещиноватость в минеральных агрегатах является одним из необходимых условий просачивания растворов, которые обуславливают метасоматические замещения, переотложение и перекристаллизацию вещества в этих агрегатах. Роль макро- и микротрещин в сложных изменениях и преобразованиях отдельных кристаллов, зерен минералов, а также агрегатов последних наглядно прослеживается на многих объектах. Г. Н. Вертушков (1946, 1955) показал, как прозрачный кварц с появлением в нем трещин становится непрозрачным и молочно-белым. Этот исследователь любезно предоставил нам возможность ознакомиться с коллекцией образцов, подтверждающих процесс гранитизации в железистых кварцитах (Вертушков, 1960). На этих образцах видно, что магнетит в кварце сохраняется, пока зерна последнего не трещиноваты и прозрачны. Дробление кварца (и магнетита тоже), появление в нем многочисленных микротрещин, его замутнение и побеление сопровождается полным растворением и выносом магнетита.



58. Приуроченность радиоактивных двориков к незональным каймам зерен пирита. Карабаш. Отраженный свет, протравлено, увел. 100



59. Радиоактивные дворики перекрывают зоны роста П в метакристалле пирита. Месторождение им. III Интернационала, Отраженный свет, протравлено, увел. 70  
Черное — нерудные минералы

В широких масштабах наблюдается вынос гематита и биотита из полупрозрачного калиевого полевого шпата (солнечный камень), когда в нем появились микротрещинки. Этот процесс очень четко проявлен в крупных кристаллах упомянутого минерала из пегматитовых жил Ильменских и Вишневых Гор на Урале.

В больших штуфах магнезита из Сатки макроскопически видны крупные зерна этого минерала. На приполированных поверхностях штуфов под бинокулярной лупой видно, что темные зерна не трещиноваты и в них незаметна даже спайность. Они прозрачные и полупрозрачные и содержат равномерно распределенные тончайшие включения углистого вещества. В белых зернах трещинки спайности по ромбоэдру проявлены весьма отчетливо, кроме того, видны трещинки, секущие зерна в самых различных направлениях. Вследствие этого зерна замутнены и непрозрачны. В них не обнаруживается тех включений, которые изобилуют в темных и прозрачных зернах. Включения углистого вещества из темных зерен при проявлении в них микротрещин и оживлении спайности переместились за пределы последних, образовав вокруг них венчики (каемочки) или разместились по контактам зерен. От начала до конца прослеживается очищение зерен магнезита от включений углистого вещества.

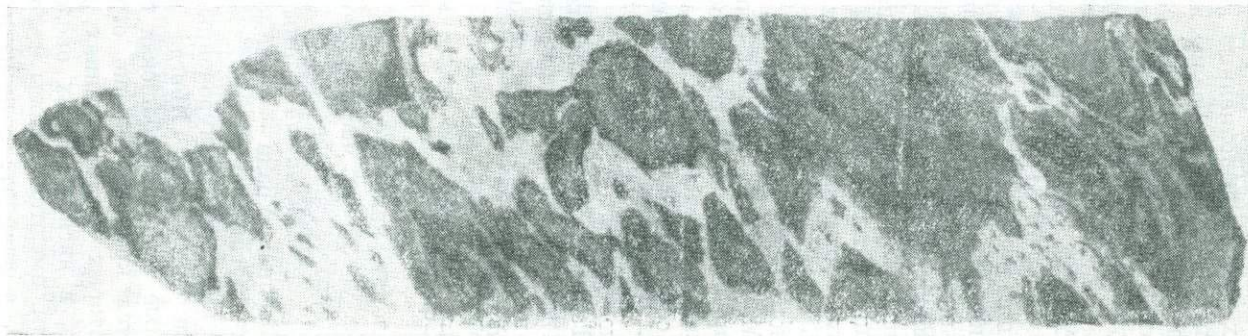
Изменение окраски кальцита в связи с его микродроблением весьма широко представлено в мраморах. Убедительным примером сказанному может служить Слюдянское месторождение. Здесь в среднезернистых белых мраморах встречаются крупные и мелкие участки, в которых порода состоит из крупно- и гигантозернистого полупрозрачного синего кальцита. Наблюдения однозначно показывают, что упомянутые участки синего кальцита являются реликтами, уцелевшими от дробления и образования таким путем среднезернистого белого мрамора, каждое зерно кальцита в котором непрозрачное и содержит многочисленные микротрещинки.

Учитывая приведенные данные, можно ожидать, что в рудных агрегатах и вмещающих колчеданные рудные тела породах на Урале, особенно на Среднем, макро- и микротрещиноватость будет проявлена также интенсивно. Для пирита выше приведено достаточно доказательств, что это именно так, а для других минералов результаты наблюдений будут изложены позднее.

Трещиноватость в минералах, окружающих зерна пирита, а также в зернах последнего, способствовала его перекристаллизации и переотложению. Рассмотрим конкретные факты. В Зюзельском, как и в других среднеуральских месторождениях, имеются зоны, в которых развиты вкрапленные руды. На рис. 60 показана руда из одной такой зоны. Состав руды — густая вкрапленность мелких неправильной формы зерен пирита в кварцево-серицитовой породе с заметным расщеплением. Под бинокулярной лупой хорошо видно, что зерна кварца в породе не имеют микротрещин, они бесцветные и водяно-прозрачные, сери-



60. Пересечение руды (густая вкрапленность зерен пирита в кварцево-серицитовой породе) трещинами, выполненными непрозрачными кварцем и серицитом (белое). Зюзельское месторождение. Прицелированный керн



61. То же, что на рис. 60. Трещины значительно разрослись

цит полупрозрачен со слабым зеленоватым оттенком. На этом же рисунке видны зонки нарушения, секущие в разных направлениях руду и выполненные кварцем и серицитом. В этих зонках пирита уже нет. В кварце же и сериците появилась масса микротрещин, вследствие чего они стали непрозрачными (замутненными). Первый приобрел молочно-белую, а второй серебристо-белую окраски. В куске зерна, взятого из той же зоны и рядом с уже описанным куском, зонки нарушения значительно больше и, главное, они расширились и слились в участки причудливой формы (рис. 61). В таких участках видны уже реликты руды, внешне не отличимые от обломков. Примечательно, что в периферических частях таких реликтов пирита стало значительно больше, нежели в их центрах и зерна минерала увеличились в размерах, а их внешние очертания стали более четкими. Несомненно, что в данном случае пирит из участков, интенсивно микротрещиноватых, выносился и частично переотлагался в краевые части обломковидных рудных реликтов, где кварц и серицит остались прозрачными или полупрозрачными, т. е. в них микротрещиноватость не наблюдается.

Можно было бы привести еще ряд фотографий образцов, на которых прослеживаются постепенные переходы от густовкрапленной пиритной руды к участкам кварцево-серицитовой породы, где сохранились лишь единичные реликты такой руды, однако в этом нет надобности. Суть явления ясна и из приведенных двух иллюстраций.

Таким образом, из вышеизложенного видно, что основной руды минерал в рудах колчеданных месторождений — пирит — несет на себе признаки сложных изменений, обусловленных метаморфизмом.

### Сфалерит

Сфалерит, как известно, по распространенности в колчеданных рудах уральских месторождений является вторым минералом после пирита. Распределен он в рудных телах месторождений неравномерно. Главные формы выделений этого минерала в рудах на Среднем Урале — ксеноморфные скопления часто в сростаниях с другими рудными и нерудными минералами, цементирующие пирит или приуроченные к трещинкам в зернах и агрегатах зерен последнего. Иногда на стенках трещин, пересекающих рудные тела (Карабашская группа месторождений и др.), встречаются крупные хорошо ограненные кристаллы сфалерита. На некоторых месторождениях, как, например, на III Интернационале, в всяких боках около рудных тел, обогащенных сфалеритом, имеются полосы и зоны, где в кварцево-серицитовой породе, в кварците с незначительным количеством серицита этот минерал наблюдается в виде крупных (0,5 см и более) зерен, образующих густо- или редковкрапленные руды.

Окрашен сфалерит бывает по-разному: от черного и темно-коричневого до почти бесцветного, а точнее светлого со слабым зеленовато-желтоватым или желтовато-зеленоватым оттенками (клеюфан). Количества сфалерита с той или иной окраской в рудах месторождений различны. В таких месторождениях, как им. III Интернационала, Гайском и других, наблюдается смена окраски упомянутого минерала не только в пределах одного рудного тела, но и в пределах штуфа руды и даже в полированных шлифах. В среднеуральских месторождениях, где рудам присуща четкая полосчатая текстура, много сфалерита со светлой окраской. В месторождениях Тарньерском, Маукском, им. 50 лет Октября и других, на которые оказали непосредственное метаморфизирующее воздействие более поздние интрузии, резко преобладает сфалерит с черной и темно-коричневой окраской. Размер зерен минерала с такой окраской значительно больше, нежели в рудах других месторождений.

В рудах месторождений Южного Урала наряду с ксеноморфными выделениями между зерен пирита сфалерит часто с пиритом и халькопиритом или только с халькопиритом образует колломорфные структуры. В таких случаях окраска сфалерита бывает темной.

Описываемый минерал из колчеданных месторождений Урала изучался многими исследователями. Были получены интересные данные по составу сфалерита (Лазаренко, 1947, 1953, 1955, 1959) и высказаны мнения, что клеюфан в рудах упомянутых месторождений выделялся в последние стадии минерализации рудного процесса (Петровская, 1963 и др.).

При описании руд южноуральских месторождений нами уже показано, как в процессе раскristализации тонкодисперсных руд образуются сложные и тонкие смеси сфалерита и других минералов и как в дальнейшем эти смеси распадались на отдельные минералы. Сфалерит при этом вследствие собирательной перекристализации обособлялся в ксеноморфные агрегаты зерен между пиритом, и наряду с этим возникали сравнительно крупные его зональные зерна. Очень часто как ксеноморфные обособления, так и зональные зерна сфалерита в рудах упомянутых месторождений содержат тонкие включения (эмульсиевидные) халькопирита. Несомненно, такие включения являются результатом распада смесей. В сфалерите из руд среднеуральских месторождений включения халькопирита встречаются редко и ниже будет показано, что они в большинстве случаев являются эпитетическими к зернам сфалерита.

Колломорфные выделения сфалерита и чаще сфалерита и других сульфидов нередко встречаются и в рудах месторождения им. III Интернационала, при этом (как и на Южном Урале) видно, что такие выделения при перекристализации преобразуются в зернистые агрегаты.

В рудах указанного месторождения перекристализация кол-

ломорфных обособлений, в которых сфалерит преобладал над другими сульфидами, сопровождалась выносом сфалерита из таких обособлений и избирательным его (а также галенита) замещением нерудными минералами и в первую очередь кварцем, хлоритом и серицитом. О замещениях рудных минералов нерудными ниже будет сказано подробно, а сейчас важно иметь в виду следующее: сфалерит, будучи вынесенным из колломорфных обособлений, где он находился в тончайших и сложных срастаниях с другими сульфидами, переотлагался в других местах рудных тел и в боковых породах, образуя ксеноморфные агрегаты зерен или крупные изометричной формы зерна с зональным строением. Такие зерна обычно свободны от включений халькопирита.

Как известно, изучение взаимоотношений слагающих руды минералов и внутреннего строения их зерен обычно производится под микроскопом в отраженном и проходящем свете в полированных и прозрачных шлифах. При этом минералы доступны наблюдению только в плоскостных срезах, пространство же, заполненное рудным агрегатом по третьей координате, остается неосвещенным. Вследствие этого от глаза наблюдателя часто ускользают важные детали внутреннего строения полупрозрачных и прозрачных минералов и, в частности, зоны роста, реликты колломорфного строения в сфалерите, которые травлением обычно не обнаруживаются. Поэтому большое количество (многие сотни) полированных шлифов из руд средне- и южноуральских, а также для сравнения из Ахтальского, Шамлугского и других Закавказских месторождений изучалось нами в отраженном свете под микроскопом и параллельно при сильном освещении под бинокляром. Казалось бы, что речь идет о давно известных и простых методах и приемах исследования руд и минералов, однако результаты оказались неожиданными (Ярош, 1965<sub>1</sub>). Если в полированных шлифах в отраженном свете можно видеть обычную картину, представленную, например, на рис. 62, а, 63, а, то под бинокляром (или при косом освещении в микроскопе, если изучаемые объекты мелкие), когда свет проникает сравнительно глубоко в сфалерит и становится хорошо видимой естественная окраска последнего, картина резко меняется (см. рис. 62, б). Становятся заметными микротрещиноватость, внутреннее строение отдельных зерен сфалерита и агрегатов таких зерен, мелкие включения, не попадающие в плоскость шлифа и т. д.

Изучение показало, что в таких месторождениях, как Гайское, им. XIX партсъезда, Александринское, зерна сфалерита с четкой зональностью роста (рис. 64) встречаются довольно часто, и в них относительно редко содержатся включения (эмульсия) халькопирита. В Бляве, Яман-Касах, Комсомольском и Сибайском месторождениях зональные зерна сфалерита более редки и они почти всегда изобилуют тонкими включениями халькопирита. В рудах перечисленных месторождений сфалерит очень часто образует колломорфные и почковидные выделения.



а



б

62. Агрегат зерен сфалерита в отраженном свете (а). Гай, увел. 50; внизу — то же под бинокулой (б)

Белое — пирит; светло-серое (округлые мелкие выделения) — теннантит; черное — шустотки и трещинки



63. Агрегат зерен сфалерита в отраженном свете (а). Гай, увел. 30; внизу — то же под бинокулой (б). Видно дробление зонального зерна и осветление мелких зерен сфалерита

Белое — пирит, светло-серое — теннантит; черное — пустотки



64. Резко зональное зерно сфалерита, Александринское месторождение. Фото под бинокулой, увел. 15

Белое — нерудные минералы

На Среднем Урале зональные зерна сфалерита встречаются больше всего на III Интернационале и реже в других месторождениях. В них очень редко обнаруживается халькопирит, обычно приуроченный к периферии зерен.

Зональность в зернах сфалерита, почковидных и колломорфных его образованиях обусловлена различной окраской отдельных зон. В одном зерне (или почке) сфалерита зоны могут иметь окраску темную (почти черную), коричневую различной густоты, грязно-красную и серую. Включения халькопирита в зернах и почках упомянутого минерала не затушевывают их внутреннего строения, но придают бронзовый оттенок их окраске. В Гайском, им. III Интернационала и отчасти в некоторых других месторождениях встречаются зональные зерна сфалерита, имеющие своеобразную окраску. Такие зерна похожи на дымчатый кварц, т. е. тон их окраски один и только в разных зонах различна ее густота. Сфалерит указанной окраски приурочен к сильно окварцованным породам, где он образует вкрапленность, иногда очень густую. В указанных породах, например в Гае, видны идиоморфные порфиривидные выделения прозрачного кварца. В этих зернах содержатся тонкие включения сфалерита. Последние бывают приурочены к зонам роста зерен кварца, фиксируют в них микротрещинки или располагаются цепочками по удлинению зерна (в центре).

В большинстве случаев зональные зерна сфалерита, особенно ассоциирующие с другими сульфидами, при наблюдении их в отраженном свете имеют ксеноморфные очертания и только сравнительно редко обнаруживается их идиоморфизм. Зоны роста в зернах сфалерита показывают, что раньше такие зерна были идиоморфными, а внешняя их форма, которая видна теперь, обусловлена дроблением, коррозией другими минералами и перекристаллизацией. В результате перекристаллизации и переотложения зональные зерна сфалерита в южноуральских месторождениях обрастают каймами светлоокрашенного или почти бесцветного сфалерита, который широко распространен в Карабаше, Кузнецке и других среднеуральских месторождениях. Чаше переотложенный светлый сфалерит находится в трещинках, пересекающих зональные зерна этого же минерала или других минералов, выполняет пустотки в руде.

Внешние очертания зерен сфалерита (учитывая и их коррозию) часто соответствуют форме внутренних зон роста. Однако встречаются и такие зерна, в которых, подобно пиритовым зернам, внешние очертания не соответствуют форме зон роста. Причины последнего явления ясны и о них сказано выше. Довольно часто в одном и том же зерне сфалерита обнаруживаются зоны, различные по форме. Это объясняется главным образом сменой кристаллографических форм во время роста зерен.

Изучение зерен и агрегатов зерен сфалерита дает очень богатую информацию. Прежде всего от начальных стадий и до конца прослеживается изменение темной окраски на светлую в зернах, которые становятся более прозрачными и утрачивают в связи с этим видимую зональность роста. Осветление зерен минерала начинается с их периферии или в стороны от трещинок, пересекающих их. Если в зернах сфалерита имеются тонкие включения халькопирита, то при осветлении зерен такие включения вытесняются и в трещинках самих зерен, на их периферии или между зернами других минералов образуются сплошные скопления халькопирита.

Осветление сфалерита и очищение его от примесей способствует дроблению и микротрещиноватости в нем. Если объект, изображенный на рис. 64, рассматривать в отраженном свете, то мы не увидим в нем осветления сфалерита в стороны от трещинок, пересекающих его.

Сфалерит, халькопирит и другие мягкие минералы в сравнении с пиритом легко поддаются деформациям, что давно отмечено исследователями (Adams, Bancroft, 1917 и др.).

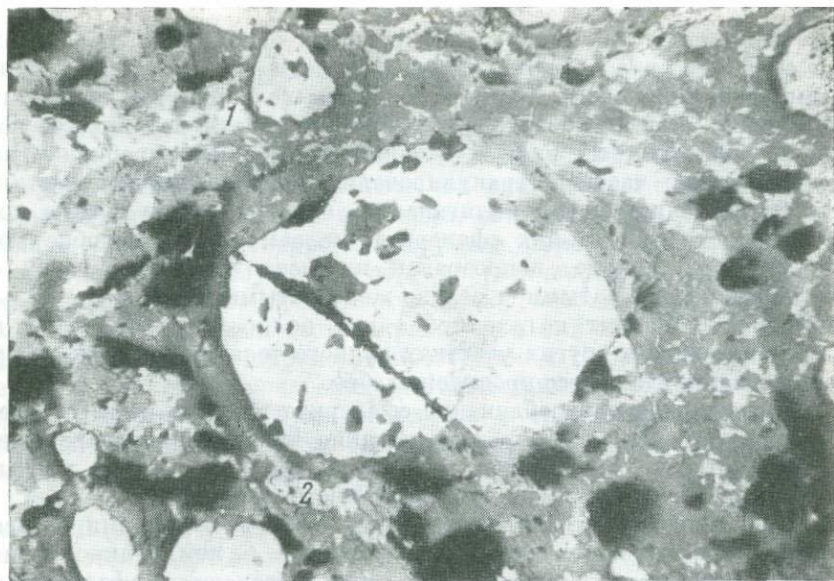
Под воздействием стресса темные зональные зерна описываемого минерала дробились и двойниковались, обломки таких зерен оставались темными и полупрозрачными, но начинали осветляться. Они вытягивались в полоски и линзообразные участки, ориентированные согласно с расщеплением и полосчатостью в рудных телах. При грубом дроблении зональных зерен сфалерита

та между их обломками, в трещинах спайности последних (а спайность в обломках проявляется четко по сравнению с самими зернами) очень часто выделяются халькопирит, теннантит и галенит. Эти минералы могут присутствовать все вместе, попарно или один из них. В дальнейшем обломки дробились на более мелкие части и гранулировались до мельчайших частиц. Агрегаты таких частиц вытягивались еще сильнее в тонкие полоски и струйки. В них сфалерит уже замутнен наподобие молочно-белого кварца, непрозрачен и имеет светлую окраску с желтовато-зеленоватыми и зелено-желтоватыми оттенками. Халькопирит, теннантит и галенит из них полностью выносились и переотлагались в других участках рудного тела или тут же рядом с полосками, где стресс проявлен слабее.

Интенсивное продрабливание сфалерита и вынос из него перечисленных минералов обусловили такие явления в рудных агрегатах, которые невозможно правильно понять, если не учитывать всех деталей в изменениях указанного минерала.

При воздействии стресса на руду сфалерит деформировался легче, нежели зерна пирита, включенные в нем. Такие зерна нередко оказались целыми, они лишь обтекаются сфалеритом. В них халькопирит и другие сульфиды, которые накладывались на последний, не проникли (рис. 65). Однако довольно часто зерна пирита бывают разбиты многочисленными трещинками, которые выполнялись минералами, наложенными на сфалерит. Эти минералы, будучи полностью или почти полностью вынесенными из сфалерита, сохранились в зернах пирита (рис. 66). При изучении подобных явлений вне связи с совокупностью всех данных, относящихся к метаморфизму руд, и, в частности, сфалерита, можно только высказывать всевозможные предположения о том, как в зерна пирита, которые изолированы со всех сторон сфалеритом, проник халькопирит или другие минералы.

Одновременно с выносом из полосок сфалерита перечисленных минералов в них же за счет примесей железа, обуславливающего темную окраску зональных зерен минерала, появлялись новообразования одного из трех минералов — пирита (чаще всего), магнетита, гематита. Новообразования пирита — очень тонкие неправильной формы зерна, магнетита — чаще идиоморфные мелкие зерна, гематита — пыль, придающая обломкам зерен сфалерита ярко-красную окраску. В дальнейшем интенсивно продробленный и светлый сфалерит рекристаллизовался. Вследствие этого тонкие его обломки укрупнились, превращаясь уже в зерна и в последних не видно замутнения. Они прозрачны и полупрозрачны, т. е. это типичный клейофан. Общее количество новообразований пирита в агрегатах сфалерита при этом не изменяется, но за счет растворения самых тонких зерен этого минерала появляются тут же более крупные и хорошо ограненные его кристаллики, в которых нередко видны пойкилиты сфалерита. Магнетит и гематит в большинстве случаев замещались пиритом



65. Зерна пирита (белое) с пойкилитовыми включениями сфалерита (серое). Месторождение им. III Интернационала. Отраженный свет, увел. 70

1 — халькопирит, 2 — борнит; черное — нерудные минералы



66. Выделения халькопирита в трещинках, пересекающих зерна пирита. Месторождение им. III Интернационала. Отраженный свет, увел. 70

Белое — пирит; серое — сфалерит; черное — нерудные минералы

(магнетит замещался пиритом псевдоморфно и вследствие этого зерна-псевдоморфозы последнего имеют не всегда свойственные пириту очертания).

Следует заметить, что образование агрегатов зерен клейофана в колчеданных рудах — это наглядный пример рекристаллизации минералов в том смысле этого термина, какой придается ему Д. П. Григорьевым (1956), т. е. за счет крупных (относительно крупных) деформированных индивидов образуется мелкозернистый агрегат.

При преобразованиях темноокрашенного сфалерита в клейофан интересно поведение не только железа, но и ряда других элементов-примесей (табл. 2).

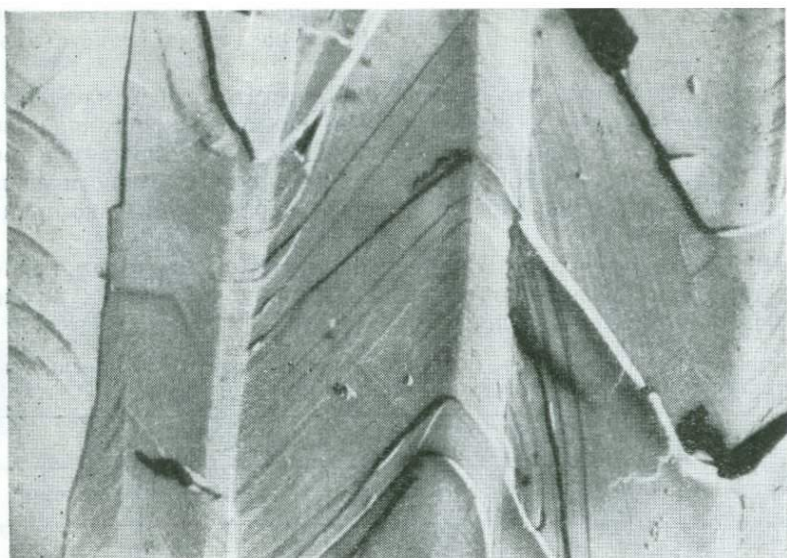
Таблица 2. Содержание (в %) примесей в различно окрашенных сфалеритах из руд месторождения им. III Интернационала

Элемент	Сфалерит			
	желтый	серый	бурый	коричневый
Бериллий	Сл.	Нет	Нет	Нет
Мышьяк	0,01—0,05	0,01—1,0	0,03—0,1	0,01—1,0
Сурьма	Сл.	0,001—1,0	0,001—0,1	Сл. —0,1
Олово	0,001—0,005	0,001	0,001	0,001—0,01
Серебро	Сл.	0,001—1,0	0,001—0,1	0,001—0,1
Кадмий	0,4—0,6	0,01—1,0	0,01—1,0	0,01—1,1
Никель	Сл.	0,001—0,01	Сл. —0,001	0,001
Висмут	»	Сл. —0,01	Сл.	0,001—0,01
Индий	0,001	Сл. —0,01	0,001	Сл. —0,01
Германий	0,001—0,01	0,005—0,1	0,001—0,01	0,001—0,1
Галлий	Сл.	0,001—0,01	0,001—0,01	0,001—0,1
Золото	»	Нет	Сл.	Сл.
Кобальт	»	»	Нет	»
Молибден	»	Сл. —0,01	Сл. —0,1	0,001—0,01
Ванадий	Нет	Нет	Сл.	Сл.
Таллий	»	Сл.	0,001	0,001

*Примечание.* 1. Данные в таблицу взяты из фондов рудника им. III Интернационала. 2. Содержания примесей в сфалеритах определены химическим и спектральным анализами в институте химии УФАИ СССР.

Из приведенной таблицы видно, что в сильно метаморфизованном сфалерите (т. е. в клейофане) содержания почти всех элементов-примесей значительно ниже, нежели в сфалерите темноокрашенном, не подвергшемся интенсивным деформациям и неосветленном.

Весьма характерно, что в рудах большинства месторождений Среднего Урала рекристаллизация тонко продробленного и замут-



67. Деформации в калиевом полевом шпате. Плоскость скола по (010). Потанины горы (Урал). Фото под электронным микроскопом, увел. 15 750

ненного сфалерита прошла значительно полнее, нежели в Учалах, Александринском, им. XIX партсъезда и других южноуральских месторождениях.

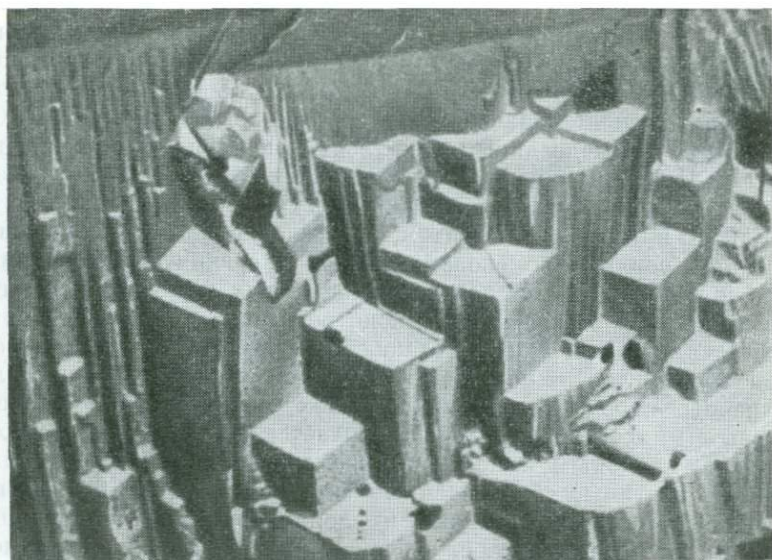
Из работ Д. П. Григорьева (1956), Д. Флинна (1967) и других авторов следует, что перекристаллизация прежде всего протекает в зернах и кристаллах минералов, подвергшихся деформации. Д. Флинн (1967) подчеркивает важный факт: деформации проявляются в первую очередь в минералах, зерна которых обладают высокой симметрией. Поэтому если, например, в кристаллах полевого шпата обнаруживаются картины, изображенные на рис. 67, то в связи с замечанием Д. Флинна в сфалерите — минерале кубической сингонии, низкой твердости и с шестью направлениями очень хорошо выраженной спайности — следует ожидать признаков несравненно более интенсивной деформации. В действительности это подтверждается при изучении минерала макроскопически и под световым микроскопом. Однако нельзя забывать, что под микроскопом в отраженном свете можно изучать полированные поверхности зерен и кристаллов сфалерита, когда деформации в виде двойникования обнаруживаются травлением, но деформации субмикроскопических масштабов при этом изучены быть не могут. Поэтому, чтобы получить дополнительную информацию о преобразованиях и изменениях в сфалерите в связи с его метаморфизмом, и, в частности, проследить, как тонкопродробленные и замутненные его агрегаты превращаются

в светлоокрашенный и прозрачный клейофан, т. е. обнаружить признаки деформаций, которые охарактеризованы Д. Флинном (1967), регенерации и рекристаллизации минерала в субмикроскопических масштабах, нами совместно с Л. А. Шерстобитовой проведено изучение минерала под электронным микроскопом. Образцы для исследования были взяты из руд месторождений им. III Интернационала, где можно видеть все разнообразие охарактеризованных выше изменений в сфалерите.

Как и в случае с пиритом, под электронным микроскопом изучались реплики со сколов отдельных сравнительно крупных зерен и в различной степени продробленных и сдвойникованных агрегатов зерен сфалерита, а также реплики с приполированных и травленных поверхностей таких агрегатов. Если целостность зерен сфалерита не нарушена, т. е. они прозрачны или полупрозрачны, не сдвойникованы и в них под бинокулярной или под световым микроскопом не обнаруживается микротрещиноватость, то под электронным микроскопом на сколах таких зерен видны обычные картины, обусловленные спайностью (рис. 68). Когда же зерна начинают дробиться и двойниковаться, то указанные картины усложняются, т. е. в зернах минерала появляются четкие признаки деформаций, не видимые на приполированных поверхностях под обычным микроскопом (рис. 69).

В участках рудных тел (отдельные вытянутые зоны, полосы и особенно приконтактные участки), где сфалерит продроблен очень сильно (макроскопически это скрытокристаллические агрегаты), сдвойникован, вытянут в тонкие полоски и струйки, не прозрачен (замутнен наподобие молочно-белого кварца), но в отдельных локальных участках приобретает прозрачность, скульптура поверхностей изломов агрегатов зерен (обломков) минерала становится еще более сложной. На плоских сколах зерен, на двойниках, на контактах отдельных зерен появляется масса тельц, разнообразных по форме и величине (рис. 70). Отдельные тельца резко удлиненной формы могут быть отнесены к включениям других минералов, однако про основную массу тельц этого сказать нельзя. Они густо покрывают плоские сколы зерен и двойников, сливаются с этими поверхностями. При больших увеличениях светового микроскопа в зернах изучавшегося сфалерита тонких включений других минералов не устанавливается. Упомянутые тельца, следовательно, являются новообразованиями сфалерита в сфалерите же, т. е. это центры кристаллизации — результат регенерации и рекристаллизации интенсивно деформированных агрегатов зерен сфалерита.

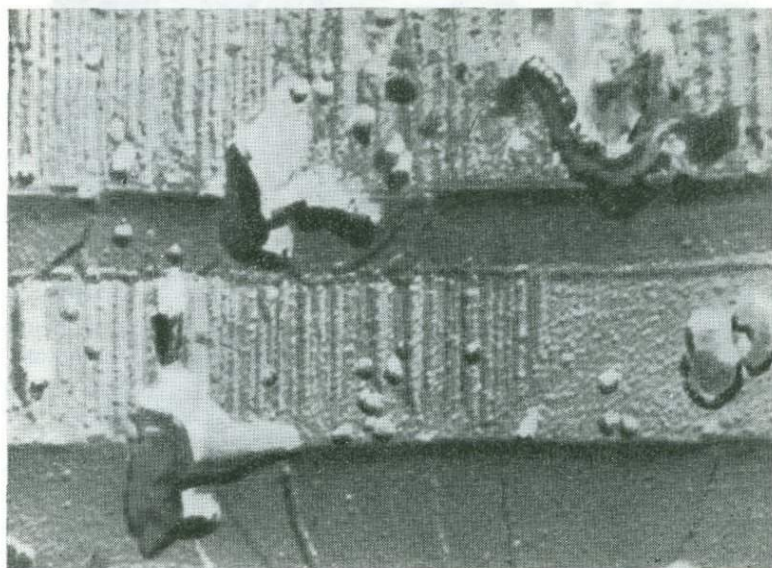
Наиболее крупные из субмикроскопических новообразований сфалерита в сфалерите наряду с тем, что они более или менее равномерно распределены по всей площади плоских сколов зерен (рис. 71), в ряде случаев бывают приурочены к центральным частям таких зерен. Однако независимо от этого пространственная ориентировка их в пределах отдельных зерен, за ред-



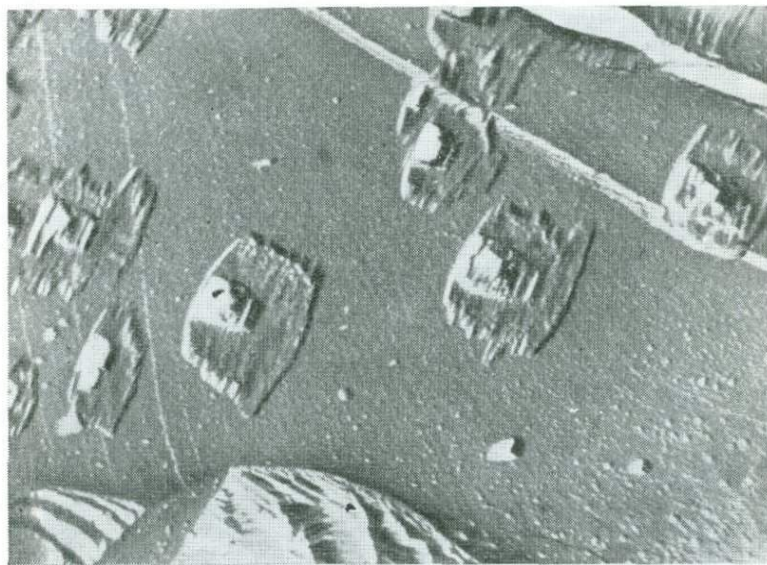
68. Скол недеформированного зерна сфалерита. Месторождение им. III Интернационала. Фото под электронным микроскопом, увел. 4350



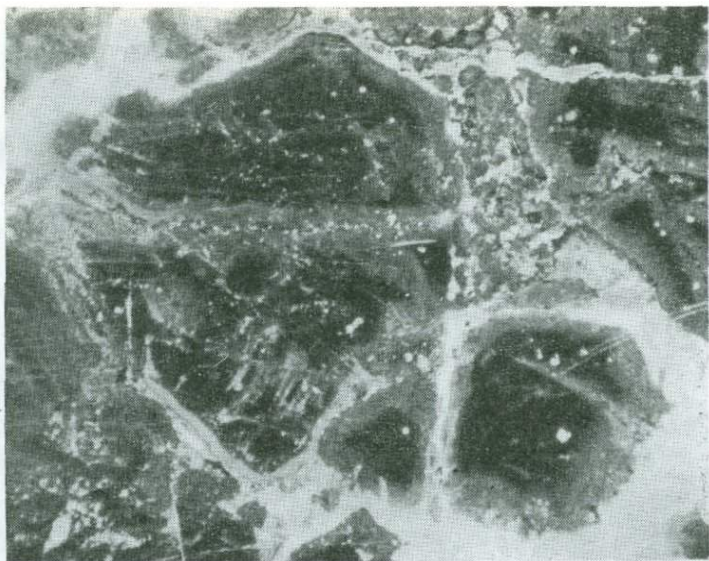
69. Скол деформированного зерна сфалерита. Видны многочисленные линии скольжения. Месторождение им. III Интернационала. Фото под электронным микроскопом, увел. 6380



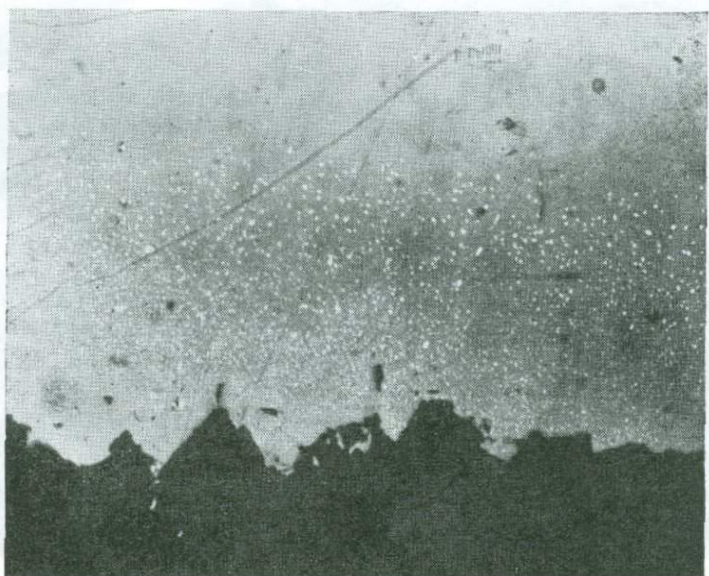
70. Скол деформированного зерна сфалерита. Видны двойники и многочисленные центры кристаллизации. Месторождение им. III Интернационала. Фото под электронным микроскопом, увел. 10 560



71. Скол деформированного зерна сфалерита. Видно, что в новообразованиях сфалерита деформаций нет. Месторождение им. III Интернационала. Фото под электронным микроскопом, увел. 7200



72. Выделение халькопирита (серые каймы вокруг темных зерен) в периферических частях зерен сфалерита (темное) и в стороны от трещинок, пересекающих зерна; белое — нерудные минералы. Образец из коллекции Ю. Ф. Юрина. Фото под бинокулой, увел. 10



73. То же в отраженном свете, увел. 70

Серое (основной фон) — сфалерит; белое (мелкие точки) — халькопирит; черное — нерудные минералы, увел. 70

кими исключениями, одинакова. Это свидетельствует о том, что центры кристаллизации минерала появлялись по определенным кристаллографическим направлениям зерен минерала «хозяина». Такими направлениями были плоскости спайности в зернах сфалерита, по которым осуществлялись субмикроскопические сдвиги, скольжения и которые приоткрывались при деформациях зерен. Иногда новообразования сфалерита на деформированных участках этого же минерала имеют форму спирали.

Приведенные наблюдения в значительной мере дополняют результаты изучения сфалерита под световым микроскопом. Они убедительно показывают, сколь большую роль при метаморфизме колчеданных руд играли деформации минералов и особенно тех, зерна и кристаллы которых обладают высокой симметрией и четко проявленной спайностью.

Перекристаллизованный и осветленный сфалерит (клеюфан) в отдельных участках рудных тел приобретал снова темную окраску. Потемнение в нем обычно начиналось в стороны от трещинок, пересекающих его, от контактов с пиритом и другими минералами. Не всегда, но нередко вместе с потемнением в сфалерит проникал халькопирит, образуя в нем тонкие включения, ни чем не отличимые от тех включений, которые образуются при распаде тонких смесей сфалерит-халькопирита в рудах южно-уральских месторождений.

Проникновение халькопирита в сфалерит весьма наглядно прослеживается на образцах руд из месторождений Тарньерского, Карабашских, им. 50 лет Октября, рудопроявлений быв. Павдинской дачи и т. д. Рис. 72, 73 подтверждают сказанное.

Следует заметить, что описанное явление чаще наблюдается в тех случаях, когда руды того или иного месторождения несут на себе явные признаки метаморфизма, однако в Сибире на выклинках рудных тел встречаются скопления зерен перекристаллизованного (переотложенного) и осветленного сфалерита, в которые также проникает халькопирит.

#### *Фотолюминесценция.*

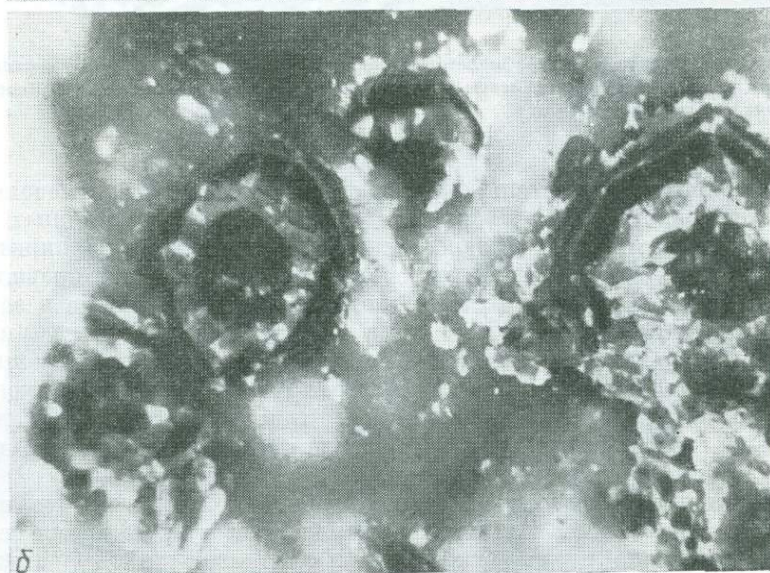
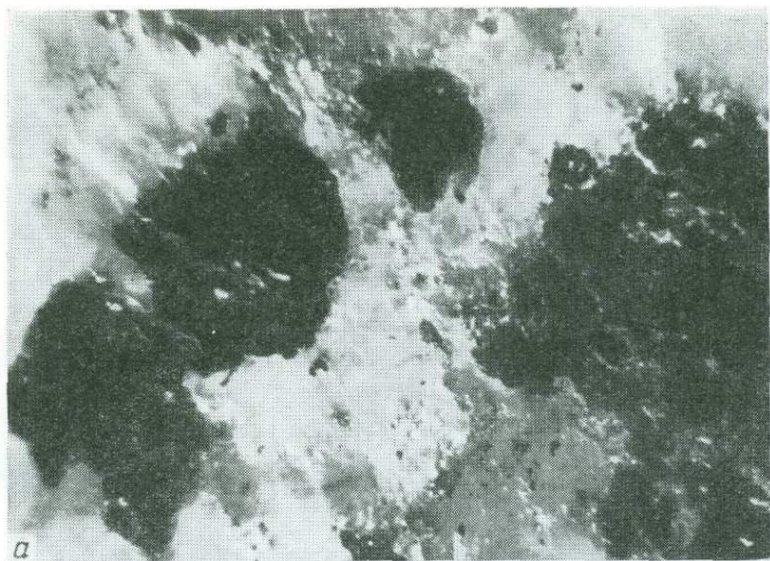
Информация по метаморфизму сфалерита значительно дополняется результатами изучения этого минерала в ультрафиолетовом свете. Люминесценции как искусственных, так и образовавшихся в естественных природных условиях минералов посвящено много работ в СССР и за рубежом. При этом рядом исследователей, например, Г. П. Барсановым и В. Х. Шевелевой (1953), Г. Ф. Комовским и О. Н. Ложниковой (1954), Л. Н. Овчинниковым и В. Г. Максеновым (1965) показано, что люминесценция может быть использована не только для диагностики минералов, но и для решения многих вопросов в геологии. Учитывая это, мы совместно с Ю. Ф. Юриным при исследовании колчеданных руд использовали люминесцентный осветитель ОИ-18 и ультрафиолетовый микроскоп МЛ-2. Поведение сфалерита при ультрафиолетовом облучении оказалось весьма интересным. На большом фактическом материале было ус-

тавовлено, что при совместном нахождении с борнитом сфалерит обладает способностью люминесцировать (фотолюминесценция), при отсутствии в рудах борнита упомянутый минерал независимо от его светлой или темной окраски, а также интенсивности проявления в нем деформаций не люминесцирует. Исследования показали, что указанный минерал после своего выделения в рудах не обладал способностью к фотолюминесценции. Последняя связана с растворами, которые наложены на уже сформированные и претерпевшие диагенетические и значительные метаморфические изменения руды. Эти растворы, вероятнее всего, генетически связаны с кислыми интрузивными породами верхнепалеозойского возраста. Они обусловили псевдоморфное замещение халькопирита борнитом в рудных телах и вместе с тем оказывали на них дальнейшее метаморфизующее воздействие.

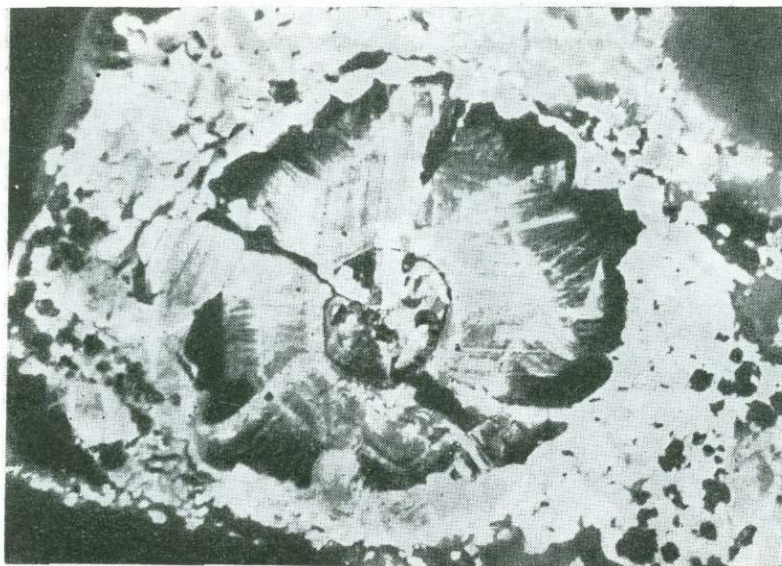
При ультрафиолетовом облучении сфалерита из борнитсодержащих руд люминесцируют те его зерна и агрегаты зерен, которые частично или в полной мере претерпели указанные выше изменения (а такие зерна представляют абсолютное большинство в агрегатах зерен сфалерита). Устанавливается прямая зависимость смены цветов люминесценции сфалерита от степени его изменения, т. е. от интенсивности проявления в минерале хрупких и пластических деформаций и осветления. В зональных зернах светятся ярким оранжевым светом те участки, которые частично продроблены, сдвойникованы, или в которых под влиянием стресса приоткрылись трещинки спайности. Неодинаково светятся и отдельные зоны роста в зернах указанного минерала. Светятся именно те зоны, в которых видно осветление (в них меньше железа, которое гасит люминесценцию) и хотя бы незначительное влияние стресса. Вероятно, такие зоны отличаются от несветящихся и иным внутренним строением. Рис. 74, а и б, 75 не оставляют сомнения в том, что агент, обуславливающий люминесценцию в сфалерите, проникал в зерна и агрегаты зерен последнего после того, как они были уже сформированы и претерпели значительные изменения.

С усилением деформаций в зернах сфалерита оранжевое свечение в них сменяется на оранжево-желтое, голубое, голубовато-зеленоватое, зеленое разной густоты (до ярко-зеленого), синее и сине-зеленоватое. Смена оранжевой окраски свечения на голубую происходит с периферии зерен минерала, в стороны от трещинок, пересекающих такие зерна и по двойниковым швам.

Когда сфалерит подвергался сильным динамическим воздействиям и в нем интенсивно проявлялись хрупкие и пластические деформации (т. е. зерна и их агрегаты превращались в тонкогранулированные полоски и струйки), то синее, зеленое и другой окраски свечение минерала сменялось желтым, желто-белым, голубовато-белым, белым, белым с зеленоватыми оттенками. Такая смена свечения сфалерита также происходила в стороны от трещинок, по двойниковым швам и с периферии обломков зерен.



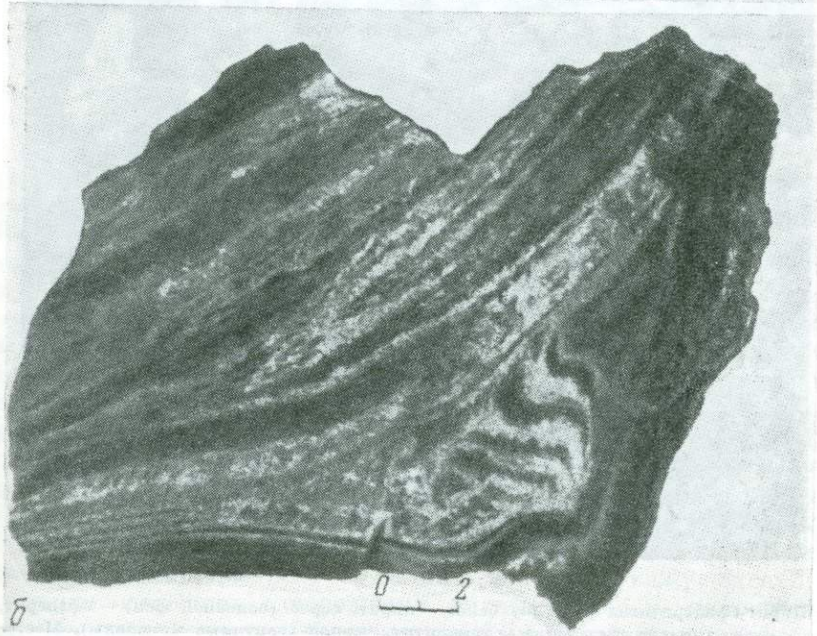
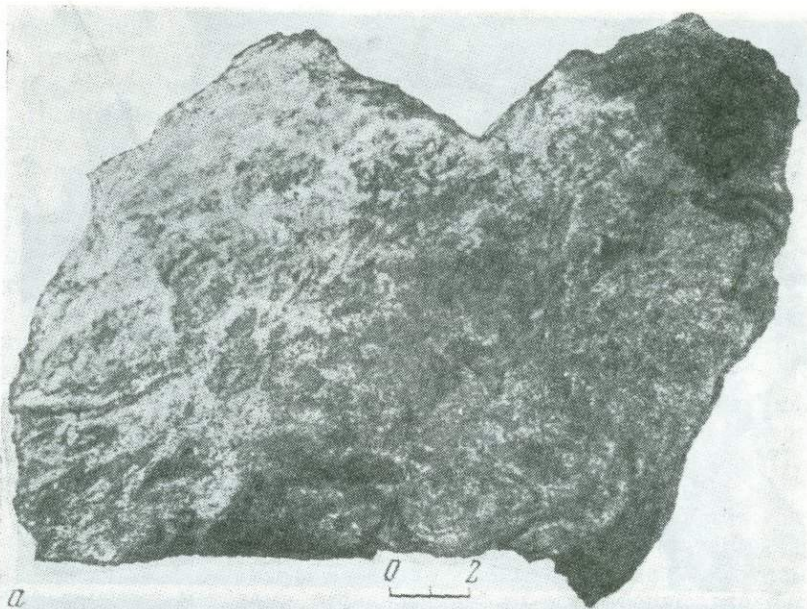
74. Зерна сфалерита (черное) в кварце (серое). Месторождение им. III Интернационала. Фото под бинокулой (а), увел. 15; то же под ультрафиолетовым светом (б)



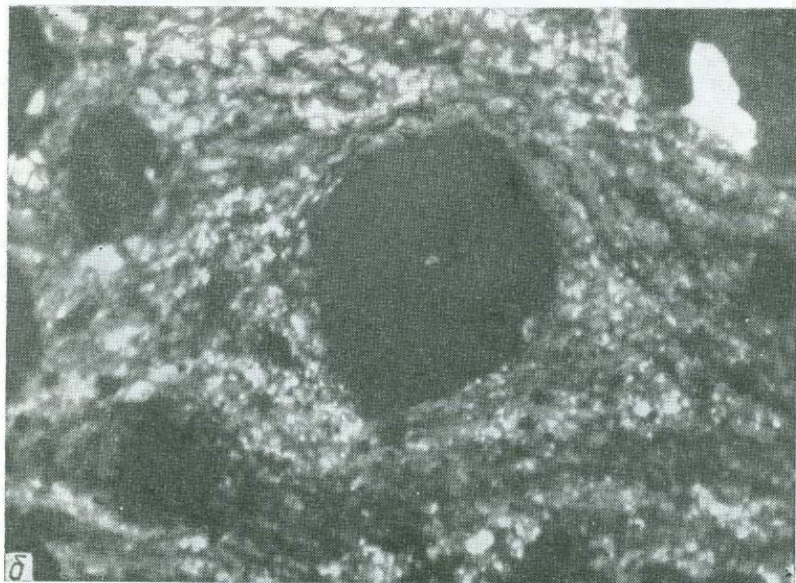
75. Зерно сфалерита в ультрафиолетовом свете; черное (ровное поле в верхних правом и левом и в нижнем левом углах) — кварц. Месторождение им. III Интернационала, увел. 15

При наблюдении смены окрасок свечения сфалерита отмечают следующие факты. В рудных агрегатах, представленных в основном упомянутым минералом, всегда имеются зерна пирита, содержащие пойкилитовые включения сфалерита. Как правило, основная масса последнего и его пойкилитовые включения в зернах пирита светятся по-разному, а именно, основная масса, например, ярко-зеленая или желтая, пойкилиты же, соответственно, оранжевые или синие. Это лишний раз свидетельствует о сложных преобразованиях в рудах и подтверждает зависимость смены окрасок свечения сфалерита от степени проявления в нем деформаций и других изменений.

Пойкिलиты сфалерита в зернах пирита показывают, что последние образовались при перекристаллизации руд. Во время своего роста зерна пирита захватили и уже светящийся оранжевым или синим цветами сфалерит. После того, как возникли зерна пирита, руда подвергалась динамическим воздействиям. Сфалерит, будучи мягким минералом с шестью направлениями очень хорошо выраженной спайности, деформировался в основной массе в первую очередь. В связи с этим в нем менялись цвета свечения. Пойкилитовые же включения этого минерала в зернах пирита светятся оранжевым или синим цветами, потому что они остались не затронутыми деформациями. От этого их



76. Штуф пирит-сфалеритовой руды. Месторождение им. III Интернационала. Снято при обычном освещении (а), внизу — то же, но снято в ультрафиолетовом свете (б)



77. Пирит-сфалеритовая руда (а) белое — пирит, серое (основной фон) — сфалерит, светло-серое, мелкие выделения, — теннантит, черное (нерудные минералы). Место-рождение им. III Интернационала. Отраженный свет, увел. 120. Внизу — то же в ультрафиолетовом свете (б). Видны следы пластического течения сфалерита (зерна пирита обтекаются сфалеритом)

предохранили зерна пирита, которые имеют высокую твердость и с трудом поддаются деформациям, особенно когда они погружены в более мягкую среду.

Подмечено, что изредка в зернах сфалерита в стороны от трещинок свечение резко ослабевает до полного исчезновения. В рудных телах на контактах с дайками диабаз (полоски в руде мощностью до 1,5—2 см) указанный минерал также утратил способность к люминесценции. Это, вероятнее всего, свидетельствует о выносе из руды, в частности из сфалерита, активатора, обуславливающего фотолюминесценцию.

Фотолюминесценция сфалерита и особенно смена цветов свечения последнего дает возможность обнаружить и задокументировать следы пластических деформаций как макроскопически в рудных штуфах, так и в небольших участках полированных шлифов под микроскопом (рис. 76, а и б, 77, а и б). Необходимо иметь в виду, что картины, изображенные на рис. 76, б и 77, б, без ультрафиолетового света не могут быть обнаружены.

Если ультрафиолетовый свет позволяет в рудах видеть следы пластических деформаций благодаря особенностям свечения сфалерита, причем такие деформации очень часто не обнаруживаются другими методами исследования, то естественно, что фотолюминесценция указанного минерала позволяет последовательно выявить тонкие детали механизма образования полосчатых текстур в рудах и в значительной мере дополнить информацию по этому вопросу, полученную при изучении сфалерита в отраженном свете и под бинокулой. На Среднем Урале, как известно, в колчеданных рудных телах широко развиты полосчатые текстуры, причем в приконтактных частях рудных тел такие текстуры выражены наиболее четко. Например, на месторождении им. III Интернационала на глубоких горизонтах в горных выработках видно, что в рудной линзе № 12 (борнитсодержащие руды) приконтактные части резко обогащены сфалеритом и именно здесь очень четко выражена полосчатая текстура. Изучение показало, что сфалерит в указанных участках подвергался наиболее интенсивным изменениям, т. е. он тонкозернистый или скрытокристаллический, сильно деформирован, утратил свою первичную окраску, вытянут в полоски, которые, не меняя мощности, прослеживаются в забоях на несколько метров. В крупных образцах руды с таким сфалеритом под ультрафиолетовыми лучами (макроскопические наблюдения) высвечивается картина, в миниатюре близко напоминающая радуго. В сравнительно широких (несколько сантиметров) и четких полосках, кажущихся при обычном освещении однородными, видны тонкие и многочисленные полоски, светящиеся яркими желтым, зеленым, голубым, синим, вишнево-красным, фиолетовым, сине-белым, белым цветами. Полоски, светящиеся разными цветами как в направлении, параллельном контактам рудной линзы, так и в направлении, перпендикулярном последним, постепенно переходят друг в друга и

цветовой эффект наблюдаемого явления еще больше усложняется. Часто полоски, светящиеся ярким зеленым или голубым цветами, выглядят как сильно уплощенные линзочки. Сравнительно резко многоцветное высвечивание сфалерита в направлении от приконтактных частей рудной линзы к ее центральным участкам сменяется оранжевым, желто-оранжевым и желтым, но в этих же участках полосчатая текстура руды выражена слабо или бывает незаметной совсем. Изучение сфалерита с многоцветным высвечиванием под ультрафиолетовым микроскопом показывает, что в полосках, светящихся зеленым или синим цветами, сфалерит деформирован не интенсивно. Здесь сохранились редкие реликты зональных зерен, светящиеся оранжевым светом. Указанные полоски постепенно переходят в полоски, светящиеся желтым, желто-белым, сине-белым, белым и другими цветами. При этом хорошо видно, что смена окрасок свечения в минерале сопровождается нарастанием в нем деформаций. В полосках желтого, сине-белого или белого свечения нередко обнаруживаются мелкие линзообразной формы участки, которые светятся зеленым или синим цветами. В таких участках сфалерит деформирован меньше, нежели в окружающей их массе этого же минерала.

В сфалерите, который светится разными цветами, присутствует пирит, халькопирит и другие минералы. В зернах пирита часты пойкилитовые включения сфалерита. В таких включениях, как уже отмечалось выше, свечение всегда остается оранжевым, зеленым или синим, если окружающий сфалерит светился, соответственно, зеленым, желтым или сине-белым, белым цветами.

Под ультрафиолетовым микроскопом также видно, что сфалерит из центральных участков рудной линзы № 12 деформирован в несравненно меньшей степени, нежели в ее приконтактных частях. Именно в этих участках (центральные части рудного тела) часты реликты зональных зерен сфалерита, в которых еще сохранились несветящиеся зоны роста.

Наблюдения над фотолюминесценцией сфалерита проведены нами особенно тщательно на месторождениях им. III Интернационала, Карабаше, Александринском и Гайском. Из сопоставления таких наблюдений видно, что хрупкие и пластические деформации, а следовательно, и проявления многоцветного свечения указанного минерала, как, например, в описанном случае с линзой № 12 на III Интернационале, в южноуральских месторождениях отмечаются в несравненно меньшей степени, нежели в месторождениях Среднего Урала. Этот вывод согласуется с данными, полученными при изучении сфалерита в отраженном свете и под бинолупой, а также при изучении пирита.

Говоря о смене оранжевого свечения в сфалерите на другие цвета, и в частности на зеленое, следует заметить следующее. В образцах руд из Гайского, Александринского и им. III Интернационала месторождений встречаются реликты слабо дефор-

мированных зональных зерен сфалерита, светящихся ярким зеленым цветом. При этом активатор, обуславливающий такое свечение, как и в случае оранжевого свечения, проникал в минерал избирательно по отдельным зонам роста и в стороны от трещинок. При дальнейшем дроблении и освещении указанных реликтов их яркое зеленое свечение резко понижалось до слабого светло-зеленоватого или голубовато-зеленоватого. В редких случаях отчетливо видно, что ярко-зеленое свечение в зональных реликтах зерен сфалерита в стороны от трещинок сменялось оранжевым. Оранжевое и оранжево-желтое свечение наблюдается и в участках сфалерита, окружающих реликты зональных зерен и светящегося светло-зеленоватым или зеленовато-голубоватым светом. Чаще всего это бывает в контактах с выделениями серицита. В последнем случае нет твердых данных для того, чтобы однозначно решить, что указанные цвета свечения сменялись оранжевым свечением. Вероятнее всего, оранжевое свечение зерен, как обычно, является реликтовым.

Как следует из изложенных выше наблюдений, первичным свечением в сфалерите было оранжевое. При хрупких и пластических деформациях минерала это свечение сменялось другими цветами, однако смена ярко-зеленого свечения на оранжевое в зональных реликтах зерен, хотя это и редкое явление, заслуживает внимания. Здесь возможны два варианта: 1) ярко-зеленое свечение в сфалерите было до смены его оранжевым и другими цветами; 2) оранжевое свечение сменялось ярко-зеленым, а последнее в свою очередь переходило в другие цвета свечения, в том числе в редких случаях и в оранжевое. Второй вариант наиболее правдоподобен. Он подтверждается совокупностью многочисленных наблюдений как над отдельными зернами, так и над агрегатами зерен сфалерита, деформированными в различной степени.

Смена цветов свечения сфалерита происходит и при его нагревании или охлаждении в лабораторных условиях. В интервалах температур 120—140° С (нагрев образцов из приконтактных участков рудных тел III Интернационала и образцов с крупными зернами сфалерита, светящихся главным образом оранжевым светом, производился под вакуумом до 200° С); в течение нескольких минут свечение в минерале прекращается. Оно восстанавливается в этих же интервалах температур при охлаждении образцов; при этом наблюдается следующее: без видимых изменений остается густо-зеленое и вишнево-красное свечение. Оранжевое сменяется желто-зеленым. Первое сохраняется только в центральных участках зерен сфалерита. Желто-зеленым свечением сменяется вся гамма цветов люминесценции последнего, наблюдаемая до его нагревания. При смене оранжевого свечения сфалерита на желто-зеленое, радиоактивные дворники становятся незаметными совсем, или частично сохраняются только их внутренние сферы. После охлаждения образцов сфалерита при повторном

их нагревании до 700—800° С в течение 2 часов вишнево-красное свечение в них прекращается, а оранжевое (в центральных участках зерен сфалерита), зеленое и желто-зеленое сохраняется.

До нагревания люминесценция в сфалерите прекращается вместе с прекращением ультрафиолетового облучения их у. ф. светом. После нагревания указанный минерал в течение нескольких секунд (7—8) продолжает светиться и после прекращения облучения.

При охлаждении в жидком азоте примерно до —180° С зерна сфалерита, светящиеся оранжево-зеленым светом при комнатной температуре, приобретали яркое оранжевое свечение. При повышении температуры до комнатной прежний характер свечения восстанавливается.

Некоторые образцы сфалерита при обычной температуре не светятся в ультрафиолетовом свете. При охлаждении таких образцов до —190° С они приобретают способность люминесцировать разными цветами (оранжевый, желтый и др.). Эта способность утрачивается, когда сфалерит нагревается до комнатной температуры. Замечено, что так ведет себя тот сфалерит, который под бинокулой замутнен (непрозрачен) и в нем видна масса микротрещинок. Однако следует оговориться, что далеко не весь замутненный сфалерит приобретает способность светиться при охлаждении.

Итак, из изложенного выше фактического материала видно, что, не касаясь причин, обуславливающих оранжевое и иное свечения в сфалерите, фотолюминесценцию как интересное природное явление можно широко и с большим успехом использовать при изучении сульфидных руд. Изучение особенностей проявления фотолюминесценции сфалерита позволяет получить совершенно новую и ценную информацию. В колчеданных рудах стало возможным выявлять многие детали текстурно-структурных особенностей, проследивать хрупкие и пластические деформации в сфалерите, а следовательно, расшифровывать детали механизма образования полосчатых текстур. Иными словами, фотолюминесценция сфалерита дает такие новые фактические данные, которые свидетельствуют о сложных и глубоких метаморфических преобразованиях колчеданных руд.

Обратимся теперь к одному из трудных, но важных вопросов. Почему сфалерит именно из борнитсодержащих руд люминесцирует, а при отсутствии борнита в рудах он этой способностью не обладает? Геологическая обстановка, в которой встречаются руды, содержащие борнит и не содержащие этого минерала, в пределах каждого месторождения в общем одинакова. Более того, в одних и тех же рудных телах могут быть участки, где нет борнита, и участки, в которых этот минерал присутствует хотя бы в незначительных количествах, и именно здесь сфалерит люминесцирует. Следует подчеркнуть, что, согласно литературным данным и нашим собственным наблюдениям

(Ярош, 1955), борнит в колчеданных рудах сопровождается более богатой и разнообразной минерализацией, которая обычно не характерна для руд, не содержащих борнита.

Многие исследователи посвятили свои работы выяснению причин люминесценции минералов и, в частности, сфалерита. Г. Ф. Ковровский и О. Н. Ложникова (1954) отмечают оранжевое свечение природного сфалерита в ультрафиолетовом свете. Д. Кюри (1961) указывает, что такое же свечение в упомянутом минерале, полученного искусственным путем, обусловлено марганцем, а зеленое — медью. А. Н. Платонов и А. С. Марфуни (1968) провели исследования по оптическим спектрам поглощения сфалеритов; Garlick (1968), Joseph, Birmon (1968), Shigeo Shionoga (1968) приводят данные по природе центров люминесценции в этом же и в других минералах. Szigerti (1968) делает вывод, что образующиеся при деформации структурные дефекты в сульфиде цинка играют важную роль при внедрении примесных ионов и, следовательно, в величине выхода люминесценции. Химический состав сфалерита из уральских колчеданных месторождений освещен достаточно полно (Лазаренко, 1947, 1955, 1959 и др.). Полуколичественный спектральный анализ изучавшихся нами образцов, выполненный Н. А. Ярош, показывает, что в состав как люминесцирующего, так и нелюминесцирующего сфалерита наряду с цинком входят железо, марганец, медь и другие элементы. Количества отдельных элементов-примесей в том и другом случаях равны или близкие. Радиоактивные элементы в исследованных нами сфалеритах (светящихся и не светящихся) спектральным анализом не обнаруживаются. Однако измерения альфа-активности образцов упомянутого минерала в ионизационной камере, выполненные А. А. Краснобаевым, показали, что радиоактивные элементы присутствуют в люминесцирующем и в нелюминесцирующем сфалерите, причем в первом их в три с лишним раза больше.

Учитывая приведенные данные, фотолюминесценцию природного сфалерита из борнитсодержащих руд правомерно объяснить присутствием в нем радиоактивных элементов и, в частности,  $\alpha$ -излучением последних.

*Радиоактивные дворники.* Применение ультрафиолетового света в изучении колчеданных руд важно не только потому, что сфалерит, ассоциирующий с борнитом, оказался способным люминесцировать и благодаря этому получена новая и уникальная информация по зональности роста и деформациям зерен этого минерала, но и потому, что только при помощи ультрафиолетового света в сфалерите обнаруживаются радиоактивные дворники, изучение которых представляет самостоятельный интерес.

В сфалерите из борнитсодержащих руд уральских колчеданных месторождений в ультрафиолетовом свете наряду с реликтами зон роста, следами пластического течения высвечиваются и радиоактивные дворники. Основной причиной образования послед-



78. Взаимоотношения сфалерита (серое, основной фон), пирита (белое) и нерудных минералов — темное (а). Месторождение им. XIX партсъезда. Отраженный свет, увел. 500. Внизу — то же в ультрафиолетовом свете (б). Видны четкие радиоактивные дворники в сфалерите

них, как это показано Джоли и Резерфордом (Joly, Rutherford, 1913), является  $\alpha$ -излучение, которое разрушающе воздействовало на кристаллическую решетку минералов, обуславливая в них радиационные дефекты (Динс, Вийард, 1960).

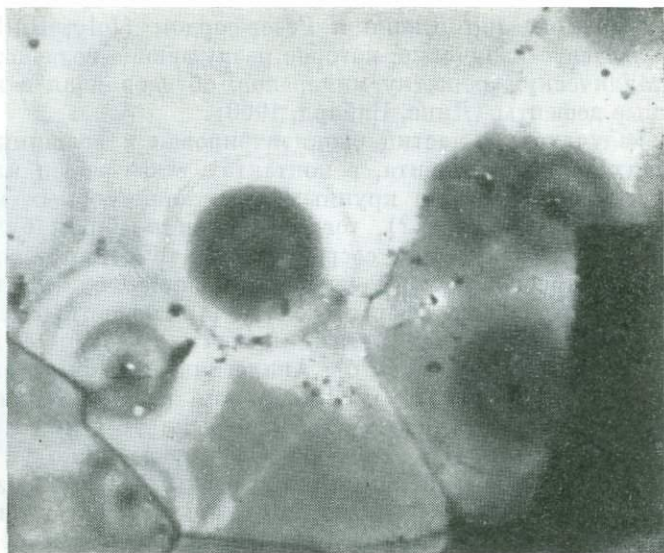
Если излучатель  $\alpha$ -частиц сконцентрирован в трещинках, пересекающих зерна сфалерита, в контактах таких зерен или входит в состав относительно крупных зерен аксессуарных минералов, например, давидита (?), тогда дворики в общем будут нечеткими; если же излучатель сосредоточен в точке, которая видна только под микроскопом, тогда дворики бывают очень четкими и в них видны отдельные сферы (кольца в плоскостных срезах), радиусы которых являются путями пробега  $\alpha$ -частиц соответствующих энергий (рис. 78, а и б). Аналогичные дворики описаны Рамдором (Ramdohr, 1957) и Пшибрамом (1959) в флюорите.

Следует подчеркнуть, что микроскопические точечные центры (минеральное вещество, не поддающееся определению) в двориках тоже бывают разными по величине и от этого прямо зависит четкость сфер двориков. Очень четкие сферы бывают в двориках с минимальными размерами центров излучения  $\alpha$ -частиц. В подавляющем большинстве наблюдавшихся нами двориков хорошо выражены самые наружные, сферы же с меньшими радиусами часто сливаются (рис. 79).

Под микроскопом в ультрафиолетовом свете дворики в сфалерите на общем светло-зеленоватом, светло-голубоватом или светло-желтоватом фоне обычно высвечиваются оранжевым, желто-оранжевым или желтым цветами. Нередко бывает так, что самая наружная сфера дворика высвечивается одним из указанных цветов, а внутренние сферы (слившиеся) не светятся совсем или светятся очень слабо (рис. 79). Встречаются и такие комбинации, когда зерна сфалерита высвечивают оранжевым цветом и дворики тоже оранжевые. Как правило, в таких случаях сферы двориков окрашены всегда гуще, нежели окружающее их пространство.

Выше было указано, что смена окраски свечения сфалерита находится в прямой зависимости от деформаций в зернах этого минерала. В общем это справедливо и для радиоактивных двориков. В недеформированных реликтах зерен сфалерита все сферы двориков четкие и темные (рис. 80). Когда такие реликты зерен деформируются, то, естественно, деформируются и дворики в них, а именно, сферы теряют четкость очертаний и сливаются в одну сферу, которая уже не темная (высвечивает желтым, желто-оранжевым цветами).

При интенсивных деформациях сфалерита очень четкие до этого дворики в нем превращаются в размазанные пятна, облачка или становятся незаметными совсем. Описанные явления наблюдаются в сфалерите из полосчатых руд Гайского, им. III Интернационала и других месторождений. В рудах первого из упомянутых месторождений часто встречаются переходы от участков



79. Радиоактивные дворки в сфалерите. Черное (нижний правый угол фото) — пирит. Месторождение им. III Интернационала. Ультрафиолетовый свет (полированный шлиф), увел. 470



80. Деформированный (серое) и недеформированный (черное) сфалерит. Радиоактивные дворки в первом не заметны. Трещина, пересекающая деформированный сфалерит (светлое), выполнена серицитом. Ультрафиолетовый свет (полированный шлиф). Гайское месторождение, увел. 500

с очень четкой полосчатостью к участкам, где такая текстура выражена слабо. Хорошо видно, что по мере перехода к участкам с четко выраженной полосчатостью деформация в сфалерите нарастает, а вместе с этим становятся незаметными и дворики в этом минерале. Если полосы в руде состоят преимущественно из пирита с подчиненным количеством сфалерита и из сфалерита с небольшим количеством пирита, тогда в сфалерите пиритовых полосок дворики и зоны роста частично сохраняются, в сфалеритовых же полосках только в редких случаях могут быть встречены нечеткие деформированные дворики, а зональность, как правило, отсутствует.

Радиоактивные дворики одновременно перекрывают зерна пирита и сфалерита. В первом они обнаруживаются травлением, а во втором ультрафиолетовым светом.

В пирите из борнитсодержащих руд колчеданных месторождений, а также в пирите из Березовского и Кочкарского золоторудных месторождений радиоактивные дворики были обнаружены нами еще в 1953 г. (Ярош, 1953), но тогда мы не распознали их природу. Травлением электротоком и аммиаком, азотной кислотой и соляной кислотой с цинковой пылью дворики, как уже отмечалось, обнаруживаются только на каймах и пиритных зернах, где нет зональности роста I (рис. 58). В кристаллах же пирита, выросших при перекристаллизации и переотложении этого минерала, дворики более или менее равномерно распределены по всему объему кристаллов и перекрывают их зональность роста II (рис. 59).

Кроме сфалерита и пирита, радиоактивные дворики путем травления редко обнаруживаются в следующих минералах, слагающих борнитсодержащие руды: халькопирите, теннантите и борните. В единичных случаях дворики высвечиваются (зеленое свечение) под ультрафиолетовым светом в сериците.

При изучении радиоактивных двориков в рудах колчеданных месторождений Урала необходимо знать следующие два вопроса: 1) какие радиоактивные элементы привнесены в руды; 2) как распределены эти элементы в сульфидных агрегатах.

Выше отмечено, что радиоактивные дворики в сфалерите бывают очень четкими (см. рис. 78). В таких двориках (если плоскостные срезы проходят через их центры) обычно насчитывается пять и в единичных случаях шесть сфер. Радиусы наружных сфер у всех двориков одинаковы. При тщательных наблюдениях иногда удается заметить, что третья и четвертая (от периферии к центру дворика) сферы состоят (каждая) из двух сфер, радиусы которых очень близки.

Сопоставляя наблюдаемые нами дворики с рисунками двориков, приведенных Рамдором в уже упоминавшейся его работе (Ramdohr, 1957), можно видеть, что основным радиоактивным элементом, привнесленным в колчеданные руды на Урале, является  $U^{238}$ .

Радиоактивные дворики в сульфидных агрегатах, слагающих колчеданные руды на Урале, распределены неравномерно. Часто они приурочены к скрытым микротрещинкам в пирите и сфалерите (рис. 81, 82). Естественно, что распределение двориков — это и распределение в колчеданных рудах Урала. Однако этого недостаточно. Надо учитывать, что а) дворики в минералах по той или иной причине могли исчезнуть; б) дворики могут иметь такие внешние очертания, что мы их не опознаем; в) атомы урана распределены в зернах равномерно и дворики в таких зернах не образуются.

Чтобы получить более точное представление о распределении урана в рудах и подтвердить, что мы имеем дело именно с этим элементом, автор совместно с И. Г. Берзиной изучали по специальной методике представительные образцы руды с люминесцирующим и нелюминесцирующим сфалеритом (Берзина и др., 1967).

Облучение образцов проводилось в тепловой колонне атомного реактора, интегральный нейтронный поток составлял  $1 \cdot 10^{16}$  н/см<sup>2</sup>.

Сопоставление результатов изучения сфалерита в ультрафиолетовом свете с результатами облучения этого и других минералов нейтронами (треки на лавсановых пленках) показало следующее.

1. Места относительно высоких концентраций излучателя  $\alpha$ -частиц (центры радиоактивных двориков), обнаруживаемые в сфалерите ультрафиолетовым светом и травлением в пирите и других минералах, обнаруживаются также и при облучении нейтронами этих же минералов (рис. 83, а, б, в). При указанных условиях эксперимента разбитыми могут быть только ядра урана. Следовательно, вывод, что радиоактивным элементом, привнесенным в колчеданные руды, был уран, подтверждается;

2. Относительно повышенные содержания урана фиксируются в борнитсодержащих рудах;

3. В сфалерите урана больше, нежели в рядом находящемся пирите и других сульфидах;

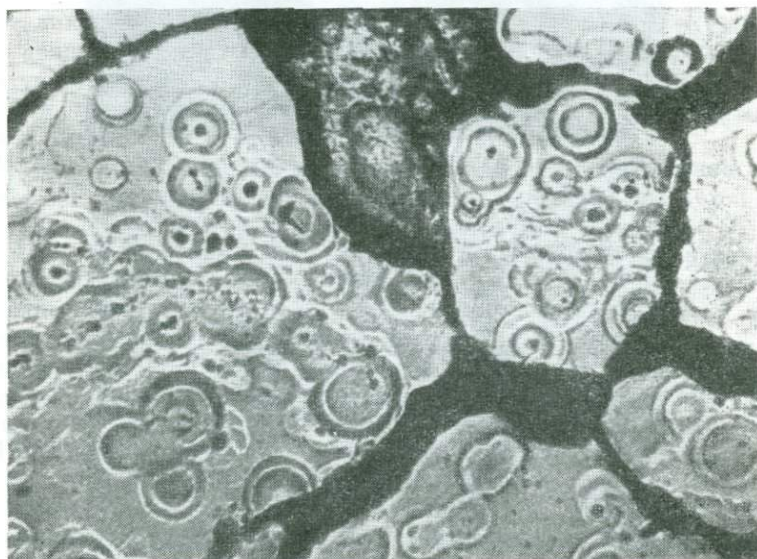
4. Основная форма нахождения урана в рудах — примесь в минералах;

5. В сфалерите обнаруживаются микроучастки, в которых дворики вследствие тех или иных причин исчезли, но повышенные концентрации атомов урана в таких участках сохранились.

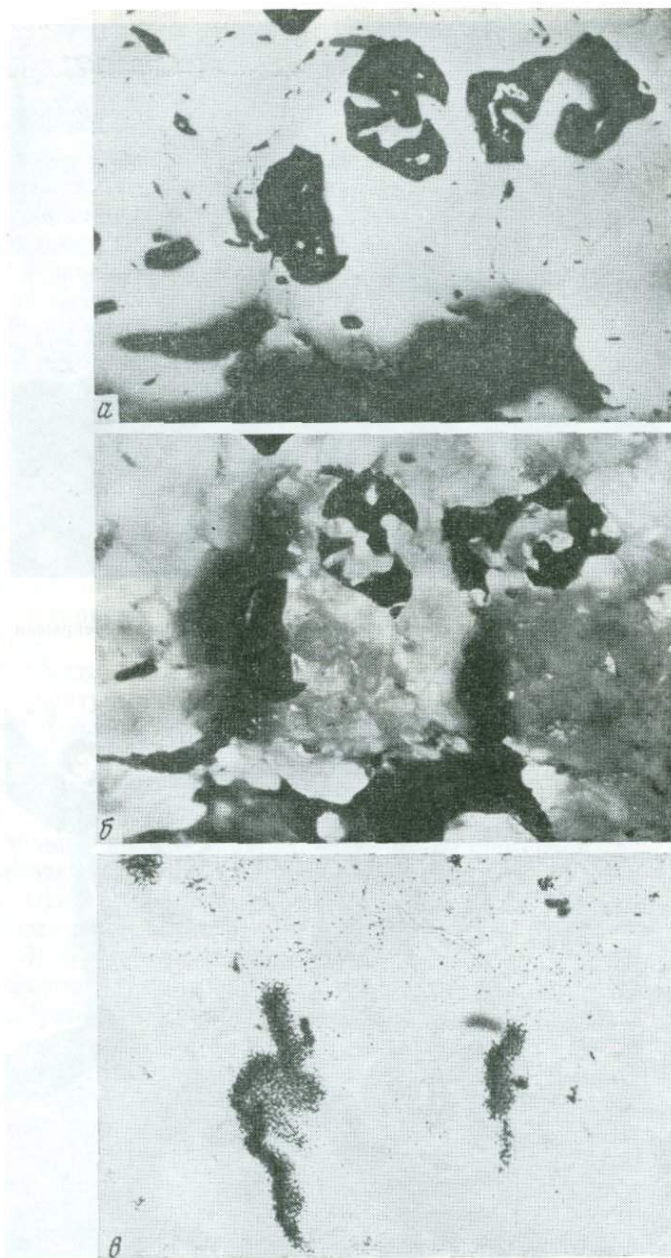
6. В колчеданных рудах уран распределен неравномерно. Относительно высокие концентрации его наблюдаются: а) в контактах зерен минералов, слагающих руду; б) в трещинках, пересекающих зерна и агрегаты зерен минералов (рис. 84); в) в точечных микроучастках (см. рис. 83, а, б, в); г) в зернах акцессорного рутила (сорбция); в зернах акцессорного давидита (?). Кроме того, встречаются участки в рудах, где атомы урана распределены равномерно, однако концентрация их здесь заметно меньшая, нежели в перечисленных четырех случаях.



81. Сфалерит в ультрафиолетовом свете. Радиоактивные дворики, перекрывая друг друга, приурочены к скрытой трещинке в сфалерите. Гай, увел. 340



82. Многочисленные радиоактивные дворики в пирите. Черное — нерудный минерал и халькопирит. Карабаш. Отраженный свет, протравлено, увел. 150



83. Взаимоотношения сфалерита (серое, основной фон), пирита (белое) и серицита (черное). Гайское месторождение. Отраженный свет, увел. 180 (а). Ниже — то же в ультрафиолетовом свете (б). В сфалерите видны радиоактивные дворники; в — скопления трек, соответствующие центрам дворников

Если дворики в рудных минералах указывают на места, где в рудах сконцентрированы относительно повышенные содержания урана, а также свидетельствуют о том, что наиболее интенсивным деформациям руды подвергались после того, как сами дворики уже существовали, то большой интерес представляет следующий вопрос: в рудах каких месторождений двориков максимальное количество и где они обнаруживаются в единичных случаях? Трудоемкие исследования показывают, что дворики в небольших количествах (в пирите) обнаруживаются в Гарньерском, Зюзельском, Маукском, им. 50 лет Октября и других месторождениях, где борнит встречается как редкий минерал или в больших объемах руды не обнаруживается совсем. В месторождениях же, в которых в тех или иных количествах есть борнит и сопутствующая ему минерализация, двориков в сфалерите и в пирите несравненно больше. К месторождениям, в рудах которых чаще, чем в других, встречаются дворики, относятся Карабашские, им. III Интернационала в Гайское.

Не имея специальной подготовки по физике, мы провели большой объем с доступной для нас глубиной исследований по флюоресценции сфалерита и радиоактивным дворикам. Результаты этих исследований в данном случае используются для интерпретации определенного круга геологических процессов, обусловивших метаморфизм колчеданных месторождений Урала. Однако необходимо иметь в виду и следующее:  $\alpha$ -излучение урана, который присутствует в рудах, разрушающе воздействовало на кристаллические решетки минералов, слагающих эти руды. Об этом свидетельствуют прежде всего сами дворики. Но, кроме того,  $\alpha$ -излучение обуславливало в минералах и другие более сложные явления, которые без специально направленных тонких физических и химических исследований обнаружить нельзя.

П. М. Харлей, например, указывает: «Отдачи, сообщенной первому ядру вылетевшей из него частицей альфа, оказывается достаточно для разрушения других атомных ядер вещества». И далее: «На обоих концах пути альфа-частицы происходит разрушение многих тысяч атомов» (1962, стр. 40—41). Надо полагать в связи с этим, что проведение указанных исследований на природных объектах, и в частности на сфалерите, может дать очень ценную информацию, которая, возможно, изменит наши представления о причинах, обуславливающих постоянные примеси ряда химических элементов в том же сфалерите и других минералах.

Подводя итоги изложенному выше фактическому материалу, можно сказать, что изучение сфалерита из колчеданных месторождений Урала дало возможность получить совершенно новую и уникальную информацию. Эта информация в совокупности с информацией по пириту свидетельствует, что:

1) после того, как колчеданные руды были уже сформированы и претерпели значительные изменения, на них были паложены гидротермальные растворы, которые привнесли в руды пе-



84. Взаимоотношения сфалерита (основной фон) с нерудными минералами (черное) и пиритом (белое). Гайское месторождение. Отраженный свет, увел. 185 (а). Ниже — то же в ультрафиолетовом свете (б). Около трещинок в сфалерите видны темные ореолы; в — скопления трекв, соответствующие трещинкам

большие количества урана, а также способствовали метасоматическим замещениям, перекристаллизации и другим изменениям руд;

2)  $\alpha$ -излучение урана обусловило образование в минералах двориков и фотолюминесценцию сфалерита. Фотолюминесценция последнего, а также радиоактивные дворики в нем и других минералах являются весьма важными фактами. Они показывают, что после привноса урана руды просуществовали очень длительное время, достаточное для образования в минералах двориков (Joly, Ruthserfor, 1913), и только после этого они подверглись сильным динамическим воздействиям, вследствие чего в них (рудах) образовались четко выраженные полосчатые, сланцеватые и гнейсовидные текстуры. В люминесцирующем сфалерите из руд с полосчатой текстурой радиоактивных двориков нет (они исчезли вследствие пластических течений), однако нейтронное облучение такого сфалерита показывает, что в отдельных микроучастках в нем сохранился уран в относительно высоких концентрациях. Это значит, что время, прошедшее после образования полосчатых и гнейсовидных текстур в рудах, было недостаточным для того, чтобы в минералах появились новые дворики;

3) исследования фотолюминесценции сфалерита и радиоактивных двориков имеют более широкое и общее значение, так как методически эти исследования новые и проведены на природном материале. По своему содержанию они выходят за рамки обычных исследований минералов и руд и касаются больших геологических вопросов. Такие исследования могут быть повторены, расширены, углублены и использованы другими авторами не только применительно к колчеданным рудам Урала. Для сравнения нами выполнено частичное изучение руд некоторых месторождений Закавказья, Алтая и Казахстана. Например, в Ахталском, Золотушинском, Майкаинском и других месторождениях сфалерит, ассоциирующий с борнитом, точно так же люминесцирует, как и на Урале, в нем высвечиваются и радиоактивные дворики. Особенности проявления люминесценции сфалерита из указанных месторождений однозначно свидетельствуют, что активатор, обуславливающий свечение (оранжевое) указанного минерала, привнесен в руды после их отложения.

Детальное изучение фотолюминесценции сфалерита и радиоактивных двориков в этом и других рудных минералах из сульфидных руд неуральских месторождений несомненно позволит получить новую информацию, на основании которой можно будет сделать важные выводы и обобщения, может быть, общегеологического значения.

В рудах колчеданных месторождений Урала халькопирит является третьим по распространенности рудным минералом. Он так же, как пирит и сфалерит, претерпевал изменения. Нами совместно с Ю. Ф. Юриным (Юрин, Ярош, 1968) выполнены специальные исследования, преследующие цель выявить зональное строение в зернах этого минерала, хрупкие и пластические деформации в них. Для травления халькопирита был использован электролитный прибор «Elyrovist» производства ГДР. В качестве электролита была взята смесь фосфорной кислоты и этилового спирта в соотношении 1 : 2. Положительные результаты травления достигались в течение 3—10 секунд при электродном потенциале, равном 8—10 в и плотности анодного тока 1—3 мА/мм<sup>2</sup>.

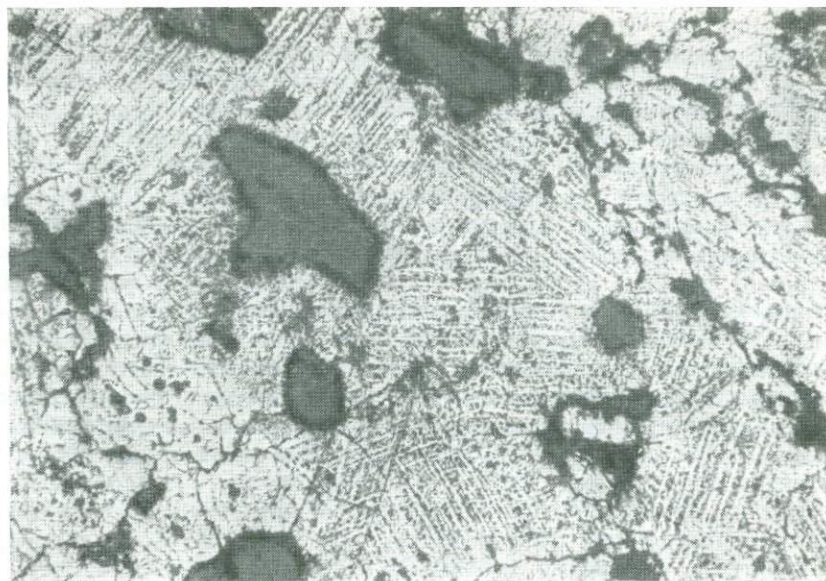
В мономинеральных обособлениях халькопирита колчеданного рудопроявления бив. Павдинской дачи указанным методом травления выявляется крупнозернистое строение. Размер отдельных зерен упомянутого минерала достигает 1,2—2,0 мм в поперечнике. В таких зернах обнаруживается своеобразное зональное строение, выражающееся в чередовании светлых и темных полос, образующих в случайных плоскостных срезах зерен серию подобных геометрических фигур. В одних случаях эти фигуры близки к неправильным треугольникам (рис. 85), в других это сложные многоугольники. До травления описанные картины в зернах халькопирита незаметны.

Влияние даже слабых тектонических напряжений нарушает зональный рисунок в зернах указанного минерала. В крупных кристаллических индивидах халькопирита появляются широкие двойники давления и трещинки спайности, усложняющие зональный рисунок. Более интенсивные тектонические подвижки приводят к тому, что упомянутые индивиды оказываются раздробленными, и за счет их образуются сравнительно тонкозернистые агрегаты.

Полученные данные согласуются с наблюдениями П. Рамдора (1962), отметившего влияние деформирующих усилий на особенности внутреннего строения минералов и, в частности, на проявление спайности в деформированных зернах пирита и почти полное «исчезновение» совершенной спайности в галените.

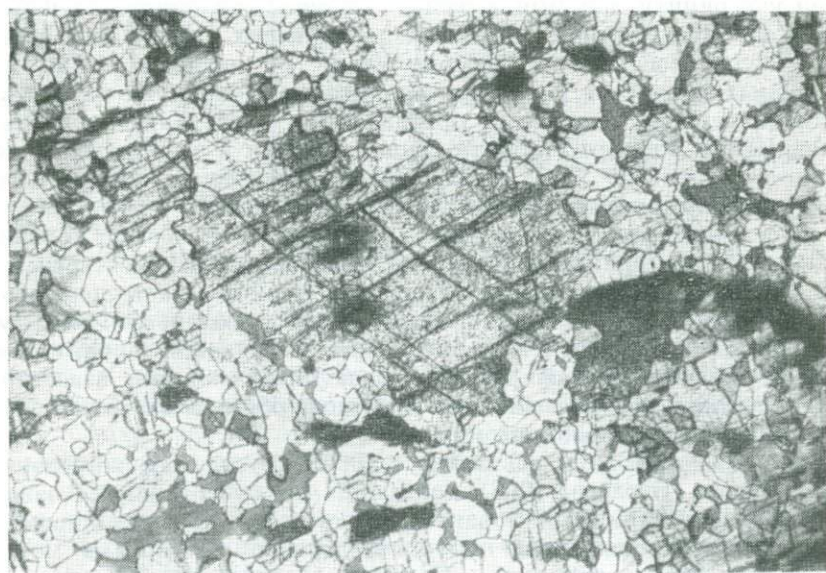
Зональные зерна в халькопирите из рудопоявлений бив. Павдинской дачи обнаружены не случайно. Исследователи (Дианова, 1958; Сергиевский, 1944 и др.) отмечают слабые проявления метаморфизма в породах района упомянутых рудопоявлений. В месторождениях таких, как Карабашские, им. III Интернационала и других, где метаморфизм как во вмещающих породах, так и в рудах проявлен интенсивно, зональных рисунков в халькопирите не обнаруживается.

В халькопирите из полосчатых медноколчеданных руд месторождения им. III Интернационала выявляется тонкозернистая



85. Начальная стадия деформации зерен халькопирита — образование широких двойников давления, в которых сохраняется зональное строение. Быв. Павдинская дача. Отраженный свет, протравлено, увел. 54

Темное — кварц; 1 — пирит



86. Тонкозернистая гранобластическая структура халькопирита. В центре — реликт крупного зерна халькопирита, в котором видна спайность. Месторождение им. III Интернационала. Отраженный свет, протравлено, увел. 54

Серое — борнит, темное — нерудные минералы

грацобластическая структура. Зерна халькопирита при этом имеют удлиненную форму с характерными извилистыми сутурообразными контурами и вытянуты согласно с полосчатостью в руде. Продольные сечения зерен в 2—3 раза больше поперечных сечений. В некоторых из зерен видны двойники давления.

В рудах этого же месторождения, характеризующихся более или менее массивным сложением, строение выделений халькопирита уже иное. Здесь в массе тонких зерен обнаруживаются сравнительно крупные зерна этого же минерала, в которых четко проявлена спайность. Характер внешних очертаний указанных зерен не оставляет сомнения в том, что сами зерна являются реликтами более крупных зерен, уцелевших от дробления и перекристаллизации. Характерно, что в мелких зернах, окружающих реликты крупных зерен халькопирита, спайности нет или она выражена слабо; кроме того, в мелкозернистой массе появился борнит (рис. 86).

Мы не проводили обширных исследований халькопирита, однако и приведенных фактов достаточно, чтобы на фоне данных по пириту и сфалериту изменения халькопирита стали ясными. В принципе эти изменения такие же интенсивные, как и в сфалерите.

### Серицит

Обратимся теперь к некоторым из нерудных минералов, например к серициту, который в разных количествах примешан к рудам, а в породах, непосредственно вмещающих колчеданные рудные тела, особенно на Среднем Урале, он является одним из основных минералов. Кварцево-серицитовые сланцы уже давно являются важным поисковым признаком на колчеданное оруденение. Кроме того, рассмотреть серицит важно и необходимо еще и потому, что по нему производится определение абсолютного возраста пород калий-аргоновым методом.

Исследователям колчеданных месторождений Урала хорошо известно, что серицит из руд и из вмещающих эти месторождения пород имеет неодинаковую окраску. Наиболее часто цвет этого минерала светло-серый с зеленоватым и зеленовато-желтым оттенками или серебристо-белый. Реже встречается серицит, который окрашен в слабо-розовые тона. Насколько нам известно, в литературе нет указаний на причины, обуславливающие различные окраски указанного минерала.

Проведенные нами совместно с Ф. П. Буслаевым исследования (Ярош, Буслаев, 1968) показали, что цвет серицита зависит главным образом от характера агрегатов его мелких чешуек, что в свою очередь чаще всего обусловлено различными метаморфическими изменениями. Например, в сланцах Зюзельского месторождения серицит большей частью плотный, полупрозрачный и окрашен в зеленовато- и желтовато-серый цвет. Посколь-

ку серицит является мягким листовым силикатом, который легко деформируется и расщепляется на более мелкие листочки, в нем появляются микротрещинки. Благодаря последним минерал замутняется, становится непрозрачным и приобретает серебристо-белый цвет. Развитие серебристо-белого серицита видно на рис. 60, 61, которые мы уже приводили при описании пирита. С замутнением серицита связаны сложные перегруппировки минерального вещества — вынос и переотложение рудных минералов и, в частности, пирита.

В рудных линзах упомянутого месторождения встречаются трещины, выполненные мономинеральным серицитом. В одних случаях этот серицит представлен рыхлым агрегатом мелких чешуек и имеет серебристо-белый цвет; в других — плотным скрытокристаллическим агрегатом, в котором отдельные чешуйки неразличимы. Такой серицит полупрозрачный и имеет светло-зеленую окраску. Химический состав обоих серицитов почти тождествен (табл. 3).

Таблица 3. Состав различно окрашенных серицитов

Компоненты	Содержание, %		Компоненты	Содержание, %	
	в светло-зеленом сериците	в серебристо-белом сериците		в светло-зеленом сериците	в серебристо-белом сериците
SiO <sub>2</sub>	45,62	45,54	CaO	—	0,12
TiO <sub>2</sub>	0,07	0,07	Na <sub>2</sub> O	0,55	0,46
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	40,19	38,71	K <sub>2</sub> O	5,37	3,89
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	0,17	MgO	3,29	5,51
FeO	0,28	0,14	H <sub>2</sub> O	4,92	5,08
MnO	0,004	0,004			
			Сумма	100,29	99,39

Анализ выполнен в химической лаборатории института геологии и геохимии УФАИ СССР.

Замутнение прозрачного серицита и изменение его окраски от начальных стадий до превращения плотного зеленовато-серого сланца в довольно рыхлую породу серебристо-белого цвета наблюдается и на месторождении им. III Интернационала. При этом оптические свойства обоих серицитов одинаковы. Показатель преломления полупрозрачного серицита  $n_g \approx 1,587$ , а серебристо-белого, соответственно, 1,590. Вместе с тем в этих сланцах общая картина осложняется тем, что серебристо-белый серицит по сети тонких трещин снова уплотняется (рекристаллизуется) и становится полупрозрачным (рис. 87). Замутнение и просветление серицита, а вместе с тем и изменение его окраски могут быть неоднократными. При этом в сланце возникают сложные тек-



87. Развитие прозрачного серицита (темное) по трещинкам в замутненном серебристо-белом (светлое). Месторождение им. III Интернационала. Полированный шлиф. Снято под бинокуляром, увел. 30

стурные рисунки, которые ошибочно можно принять за доказательства того, что серицитовый сланец образовался по какой-то миндалекаменной или мелкообломочной породе.

Розовая окраска серицита наблюдается в тех случаях, когда за счет значительных примесей железа в нем образуется тонкая гематитовая пыль. Подобные изменения окраски серицита наблюдались нами в Дегтярке, Карабаше и других месторождениях. Приведенные данные свидетельствуют, что причиной изменения окраски серицита являются деформации и, в частности, микротрещиноватость. Поэтому только цвет указанного минерала нельзя считать надежным признаком, по которому можно делать определенные генетические выводы, например, выделять различные генерации серицита.

Из приведенной выше табл. 3 видно и из литературных данных (Курицина, 1960) известно, что содержания калия и натрия в серицитах из уральских колчеданных месторождений колеблются в широких пределах. Автором и В. Г. Ершовой в сланцах, вмещающих Ново-Шайтанское месторождение (в Кировградском районе) был описан монтмориллонит (1960). Глубины, на которых был встречен этот минерал, не вызвали сомнений в том, что это гипогенное образование. Монтмориллонит образует с серицитом тончайшие сростания и под микроскопом невозможно отличить эти минералы один от другого и тем более невозмож-

но установить, образовались они одновременно или же возникли один за счет другого. Стало ясным, что серицит мог претерпевать более сложные изменения в сравнении с выше описанными. Следовательно, по этому минералу могли образоваться минералы, дающие с серицитом тончайшие смеси, неразличимые под микроскопом.

Указанные изменения серицита можно было установить трудоемкими специально направленными исследованиями с применением современных методов изучения вещества. Под нашим руководством упомянутые исследования серицитов из Зюзельского и Гайского месторождений были выполнены Ф. П. Буслаевым.

Было установлено следующее. Под воздействием гидротермальных растворов, наложенных на серицитсодержащие породы, серицит в них гидратизировался. В нем (в межпакетном пространстве) калий замещался водой. Такое замещение в начальные стадии процесса не сопровождалось существенными изменениями параметров кристаллической решетки минерала и его оптических свойств.

Гидратация серицита нарушает калий-аргоновое равновесие в нем (происходит непропорционально большая, по сравнению с калием, потеря аргона) и обуславливает искажение (омоложение) цифр абсолютного возраста.

При дальнейших изменениях кристаллическая решетка серицита стала уже другой. В ней начали появляться смешаннослоистые структуры: по серициту образовался монтмориллонит. При интенсивной гидратации серицита, обусловившей образование смешаннослоистых структур в нем и появление монтмориллонита, растворами привносился натрий. Этот элемент постепенно накапливался в новообразованиях по серициту, возможно, что он частично замещал калий в еще не полностью измененном сериците. В отличие от простой гидратации такие изменения последнего названы низкотемпературным патровым метасоматозом.

Указанные изменения серицитов, естественно, сказались и на свойствах этого минерала, а главное на калий-аргоновом равновесии в нем. Аргон терялся в непропорционально малых, по сравнению с калием, количествах, вследствие чего цифры абсолютного возраста серицитов оказались резко удвоенными (Буслаев, Овчинников, 1967).

При повышении температуры и давления вода из гидратизированных серицитов и новообразований по ним, — а это может быть скрытокристаллическое глинистое вещество, — удалялась, сложно-слоистые структуры превращались в слюдяную — исчезал монтмориллонит, при этом соотношения между калием и натрием в основном сохранялись. Таким образом, возникали серицит-парагонитовые, парагонит-серицитовые смеси вплоть до почти чистого парагонита.

При дегидратации серицита также нарушается калий-аргоновое равновесие. Дегидратация серицитов прямо связана со сте-

пенью метаморфизма пород и руд месторождений. Например, в Зюзельском месторождении, претерпевшем значительные метаморфические изменения, монтмориллонит и сложнослоистые структуры в сериците отсутствуют. Вследствие дегидратации здесь образовались отдельные зоны кварцево-серицитовых сланцев, где содержание натрия в сериците равно содержаниям калия или значительно выше последнего. В Гайском же месторождении, подвергшемся менее интенсивным метаморфическим изменениям, сохранились и глинистые образования, и постепенные переходы их в серицитовые породы, что позволило выяснить сам характер гипогенных изменений серицита.

Таким образом, из проведенных исследований наиболее распространенных рудных и нерудных минералов в колчеданных месторождениях становится ясным, что и колчеданные руды и породы, вмещающие их, одновременно подвергались сложным метаморфическим изменениям.

Следует еще раз оговориться, что нами проведены исследования отдельных минералов, входящих в состав руд, для того чтобы метаморфические изменения в целом для месторождений стали более наглядными. Вполне естественно, что изменения одного минерала во времени и пространстве были тесно связаны и взаимообусловлены изменениями в других минералах, входящих как в состав руд, так и вмещающих пород. Это не могло не отразиться на конечных результатах метаморфизма месторождений.

#### МЕТАСОМАТИЧЕСКИЕ ЗАМЕЩЕНИЯ В РУДАХ

Вследствие метаморфизма в рудах колчеданных месторождений Урала осуществлялись в широких масштабах метасоматические замещения одних минералов другими, причем замещения были часто псевдоморфными. Рассмотрим ряд конкретных примеров.

#### Замещение одних рудных минералов другими рудными минералами

*Замещение пирротином основных минералов колчеданных руд пирита, сфалерита и халькопирита.* Во многих месторождениях как Северного, Среднего так и Южного Урала, а также Северных Мугоджар пирротин встречается в заметных количествах, а в некоторых рудах этот минерал преобладает над другими сульфидами. В месторождениях Тарньерском, Колчеданном, Безьянском, Обовленном, Калатинском, Рогаткина Яма, Пышминском, Зюзельском, Маукском, Юлукском, Сибайском, им. 50 лет Октября и других упомянутой минерал составляет значительную часть запасов руд.

Среди исследователей нет единого мнения о том, как и когда в колчеданных рудах образовался пирротин. С. Н. Иванов (1947) считает, что этот минерал в рудах Сибайского месторождения самый ранний. Д. П. Григорьев (1949) указывает на ранние выделения пирротина и пирита относительно халькопирита. А. Е. Бетехтин (1951) выделяет две стадии минерализации и полагает, что в первую стадию отложился пирротин и небольшое количество халькопирита, а во вторую стадию — появились пирит, магнетит и другие минералы. Халькопирит при этом перетлагался. В более поздней работе (Бетехтин, 1953) этот автор отмечает, что при пирометаморфизме гидротермальных руд под влиянием интрузий на месте пирита возникает пирротин, иногда в ассоциации с магнетитом, с образованием типичных псевдоморфоз по кристаллам пирита. Л. И. Яковлев (1959) на примере месторождений Колчеданного и Безымянного показал, что пирротин образовался путем замещения пирита при контактовом метаморфизме. Н. В. Петровская (1961<sub>2</sub>) отмечает, что в Сибайском рудном поле обнаружены проявления магматизма в виде небольших интрузивов диоритового состава, которые пересекают рудовмещающие породы. Внедрением этих интрузий, по предположению Н. В. Петровской, обусловлен метаморфизм руд и образование в них пирротина. Т. Н. Шадлун (Бетехтин и др., 1964) выделяет две стадии минералообразования в колчеданных месторождениях. По ее данным, в раннюю стадию образовался пирротин, в позднюю — отлагались дисульфиды железа, магнетит, карбонаты и халькопирит. П. Я. Ярош (1964) привел доказательства в пользу того, что в рудах Зюзельского месторождения пирротин метасоматически развивался по пириту.

В колчеданных и полиметаллических рудах многих зарубежных месторождений пирротин также присутствует, причем наряду с пиритом в ряде случаев он играет ведущую роль. К таким месторождениям, например, относятся Сулливан в Канаде (Swanson, Crunning, 1948), Дактоун в Аппалачах, Хомстейк в Южной Дакоте (Шнейдерхен, 1958), Брокен-Хилл в Австралии (Ramdohr, 1950) и другие.

Отмечено, что чем выше степень метаморфизма месторождений и окружающих их пород, тем больше пирротина в рудах.

Присутствие пирротина в колчеданных рудах на Урале фиксирует вертикальную зональность в таких месторождениях, как Сибайское, Зюзельское и других. Каковы причины, обусловившие такое явление? Указанная зональность возникла в процессе рудоотложения или это результат метаморфизма? Правильный ответ на эти вопросы имеет принципиальное значение в проблеме колчеданного рудообразования.

Ниже приводятся данные по ряду колчеданных месторождений, руды которых нами изучались. Эти данные подтверждают выводы Л. И. Яковлева и Н. В. Петровской об образовании пирротина при метаморфизме месторождений.

Зюзельское месторождение. Сведения о геологии месторождения содержатся в работах Дюпарка и Сигга (1914), П. Я. Яроша (1964) и других авторов. Пирротин в этом месторождении встречается в массивных и вкрапленных рудах верхних горизонтов. Здесь этот минерал отмечается главным образом в виде мелких включений, приуроченных к центральным частям пиритных зерен, или в тесных сростаниях с халькопиритом он цементирует зерна того же пирита.

Следует подчеркнуть, что именно в верхних горизонтах месторождения пирротин в рудах имеет весьма ограниченное распространение, на нижних же горизонтах его количество резко возрастает. Так, на глубинах 330 и 475 м скважинами подсечены сплошные и вкрапленные руды, основным рудным минералом в которых является пирротин, а пирит имеет резко подчиненное значение.

Руды Зюзельского месторождения в верхних горизонтах представлены серным колчеданом, к которому примешаны незначительные количества халькопирита, а сфалерит встречается редко. Взаимоотношения между пиритом и пирротинном таковы (в переходных зонах к пирротинным рудам), что не остается сомнения в более позднем образовании второго и замещении им первого (рис. 88). Не только макроскопически, но и под микроскопом в полированных шлифах видно развитие пирротина по пириту. Пирротин цементирует зерна последнего, корродирует их, образуя в них заливчики, сложные разветвления, а также выделяется по трещинкам. В результате для пиритных зерен характерна скелетная форма или они полностью замещаются пирротинном.

При замещении пирита (массивный серный колчедан) пирротинном вырастают очень крупные зерна и кристаллы первого, достигающие 1—2 см в поперечнике, а иногда 3—4 см и больше. Такие зерна цементируются мелкозернистой массой пирротина или пирротина и новообразований почти черного хлорита. Рост крупных зерен замещающегося минерала на фронтах замещений его другими минералами является, как показал Д. С. Коржинский (1953), характерным признаком метасоматических процессов.

В результате образования крупных зерен пирита руда приобретает своеобразную порфиривидную структуру, нехарактерную для замещающегося пирротинном серного колчедана. Образование в пирротинных рудах крупных кристаллов пирита с достаточной полнотой описано для Сибая С. Н. Ивановым (1947) и Н. В. Петровской (1961<sub>2</sub>), а для ряда других месторождений Л. И. Яковлевым (1959). Внутреннее строение указанных зерен пирита резко отличается от такового обычных зерен пирита из серного колчедана, что показал и Л. И. Яковлев. Травлением устанавливается, что крупные зерна пирита, являющиеся новообразованиями, в своих центральных частях перед-



88. Развитие пирротина (1) по пириту (2). Зюсельское месторождение  
Черное — хлорит

ко представлены агрегатом мелких зерен, лишенных зональности роста I или в очень редких случаях такая зональность видна в виде реликтов. В периферических частях крупных зерен, когда они имеют неоднородные центры, вытравливается зональность II. Очень часто встречаются такие зерна, которые разбиты массой микротрещин, которые пересекают и зоны II. В таких случаях видно, что в зернах происходила интенсивная рекристаллизация, т. е. зоны II видоизменялись и появлялись новые. В результате трещиноватость исчезала, исчезали и радиоактивные дворки, если они были. Зерна, таким образом, приобретали однородное внутреннее строение. Рекристаллизация пирита протекала и так, что зоны III не появлялись или исчезали в ранние из них при этом трещинки и радиоактивные дворки также становились незаметными.

В Зюсельском месторождении, как уже отмечалось, халькопирита и сфалерита мало. При изучении взаимоотношений пирротина и халькопирита устанавливается, что первый избирательно

и псевдоморфно развивался по второму раньше, нежели по пириту. Халькопирит, замещаясь пирротином в одних участках, перерождается в других. Он скапливался венчиками и каймами около порфиробластов пирита, выделялся между зерен других минералов и в трещинках, пересекающих и пирротин.

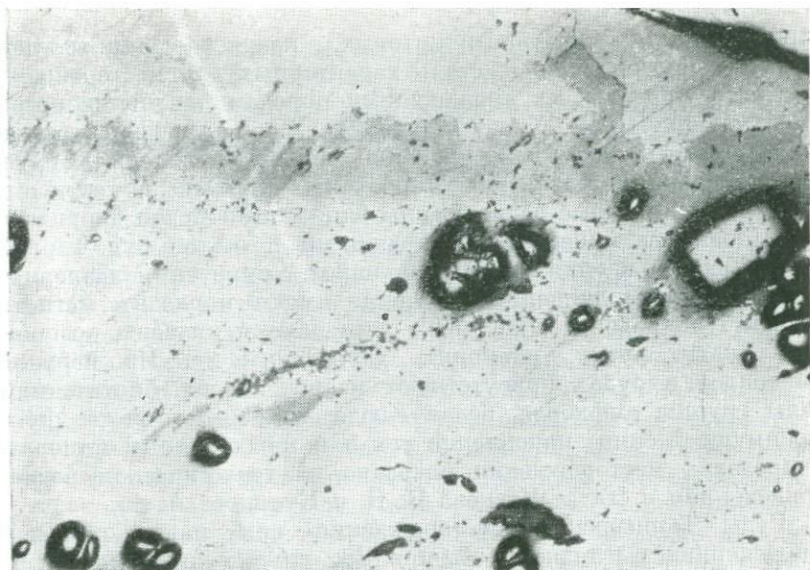
Следует оговориться, что в Зюзельском месторождении, хотя пирротин и замещал халькопирит, но такое замещение устанавливается с трудом при изучении большого количества полированных шлифов.

Чусовской рудный участок расположен недалеко от г. Полевского в юго-восточном направлении и находится на южном продолжении зоны, которая вмещает Пановский рудник. Линзообразное рудное тело средних размеров залегает в кварцево-серицитовых и кварцево-хлорито-серицитовых сланцах и падает круто на восток при почти меридиональном простирании. Руда Чусовского участка представлена в основном пирритом, пирротином, халькопиритом и сфалеритом. Изучение такой руды под микроскопом показало, что, кроме перечисленных выше сульфидов, видимых макроскопически, в ней присутствует в незначительных количествах тонкодисперсный дисульфид железа, развивавшийся по пирротину. По такому дисульфиду железа образовался марказит (часто колломорфный), а по марказиту пирит. В руде довольно часто встречаются кубанит и валлериит (в халькопирите), реже — арсенопирит, тетрадимит и самородное золото. Пирит претерпел сильные изменения — деформации, перекристаллизацию, что надежно устанавливается травлением.

В тех участках рудного тела, где пирротин присутствует в заметных количествах, он образует тесные сростания с халькопиритом и оба ксеноморфны к пириту (о пирите, образовавшемся по марказиту речь не идет). В таких случаях трудно бывает определить относительное время выделения пирротина и халькопирита. В тех же участках, в которых второй преобладает над первым, вопрос решается однозначно — пирротин избирательно и псевдоморфно развивался по халькопириту, а потом и по пириту.

Замещение халькопирита пирротином начиналось в стороны от трещинок, пересекающих агрегаты зерен первого, по контактам зерен, по продробленным зонам и т. д. (рис. 89). Процесс замещения халькопирита пирротином прослеживается от начальных стадий до образования полных или почти полных псевдоморфоз агрегатов зерен второго по агрегатам зерен первого.

Тарньерское месторождение. Открыто в 1965 г. на Северном Урале и описано Н. Н. Кусковым и А. А. Куликовым (1967). Указанное месторождение согласно данным, приведенным этими авторами, приурочено к контактной зоне эффузивов с интрузией диорита. Несмотря на то, что в состав руды месторождения входят минералы, типичные для колчеданных месторождений, оно отличается от последних на Среднем и особенно на Южном Урале следующими особенностями: 1) отсутствием



89. Развитие пирротина (светло-серые полосы) по халькопириту (основной фон), Чусовской участок. Отраженный свет, увел. 48

Белое — пирит, черное — нерудные минералы, серое (струйка) — сфалерит



90. Рекристаллизация трещиноватого пирита. Тарньерское месторождение. Отраженный свет, протравлено, увел. 25

Мелкие сферические образования — радиоактивные дворники. Черное — нерудные минералы

серицитовых, кварцево-серицитовых, кварцево-серицито-хлоритовых и других сланцев, столь характерных для месторождений Среднего Урала, здесь вмещающими породами являются роговики и кварциты; 2) большим размером зерен сульфидов, слагающих рудные тела; 3) несравненно большим, нежели в других месторождениях, развитием пирротина, особенно в тех частях рудных тел, которые расположены ближе к интрузии диорита.

Основными минералами, входящими в состав руд Тарньерского месторождения, являются пирит, пирротин, сфалерит и халькопирит. Подчиненное значение имеют марказит, магнетит, галенит, молибденит. Еще реже встречаются ильваит, арсенопирит, гематит, рутил, ильменит, халькозин и др. Из нерудных минералов в рудах присутствуют кварц, хлорит, биотит, минералы группы амфибола, белая слюда, карбонат и реже другие. Преимущественное накопление тех или иных рудных минералов в пределах месторождения показано на геологическом разрезе, приведенном в статье Кускова Н. Н. и Куликова А. А.

Руды Тарньерского месторождения при макроскопических наблюдениях выглядят необычно. Это крупно- и очень крупнозернистые агрегаты сульфидов. Средний размер зерен пирита в таких агрегатах 1—2 мм в поперечнике. Отдельные зерна упомянутого минерала достигают размеров 3—5 и даже 7—10 см. Зерна пирита таких размеров обычно встречаются в тех участках рудных тел, где присутствует пирротин. Зерна сфалерита в рудных агрегатах в большинстве случаев также крупные — до 0,5—1 см в поперечнике — и в них даже невооруженным глазом иногда видны двойники.

Пространственные соотношения между рудными, рудными и перурдными минералами сложны и представляют значительный интерес. Зерна пирита, когда они соприкасаются друг с другом, имеют неправильные внешние очертания и почти всегда изометричны. Когда же зерна упомянутого минерала находятся в окружении других сульфидов или нерудных минералов, то очень часто они имеют четкие внешние очертания, т. е. наблюдается картина, обычная для руд других колчеданных месторождений. В очень редких случаях в мелких зернах пирита травлением обнаруживаются реликты зональности роста I. В основной же массе зерен этого минерала вытравливаются только отдельные фрагменты зональности роста II или не выявляются совсем признаки зонального строения. В отличие от порфиروبластов пирита из руд среднеуральских месторождений, имеющих массу пойкилитовых включений других сульфидов и нерудных минералов, зерна пирита в Тарньерском месторождении почти не содержат пойкилитов других минералов, а если и содержат, то преимущественно сфалерит и халькопирит. Пойкилитовые включения пирротина в указанных зернах пирита явление редкое и нет уверенности в том, что это не бывший халькопирит, псевдоморфно замещенный пирротинном.

Внутреннее строение зерен пирита свидетельствует о том, что этот минерал (а следовательно, и руды в целом) претерпел интенсивные изменения, выразившиеся в повсеместной и полной перекристаллизации, вследствие этого в пирите не прослеживаются все те постепенные изменения и преобразования, которые так четко видны в этом минерале из месторождений Среднего и Южного Урала.

Зерна описываемого минерала подвергались дроблению, однако интенсивная перекристаллизация (рекристаллизация) в значительной мере уничтожила следы такого дробления. Это особенно наглядно устанавливается в тех случаях, когда трещины в зернах были многочисленными, но сами зерна не разъединялись на отдельные обломки (рис. 90). Из приведенного рисунка видно, что перекристаллизация (рекристаллизация) трещиноватых зерен осуществлялась не только с периферии, но и из их центральных частей; примечателен следующий факт. Рекристаллизация зерен пирита происходила при участии растворов, привнесших в эти зерна незначительные количества радиоактивных элементов. Альфа-излучение последних в рекристаллизованных участках зерен обусловило дворики. Дворики обнаруживаются и в участках зерен, еще не подвергшихся рекристаллизации (на таких участках много трещин), однако нетрудно видеть, что в подобных случаях дворики располагаются около трещин, по которым просачивались растворы.

Говоря о радиоактивных двориках в зернах пирита, необходимо подчеркнуть, что такие же дворики встречаются и в биотите из роговиков. Это хорошо видно в прозрачных шлифах под микроскопом. Хорошо также видно, что, когда чешуйки биотита псевдоморфно замещались хлоритом, то дворики сохранялись в последнем.

Основная масса сфалерита на ультрафиолетовый свет не реагирует. Объясняется это тем, что минерал сильножелезистый (макроскопически он черный), кроме того, в нем много топких включений халькопирита и пирротина. Тем не менее если в пирите обнаруживаются радиоактивные дворики, то в месторождении должен быть и такой сфалерит, который светится под ультрафиолетовым светом. Особенности распределения двориков в зернах пирита, их несомненная эпитгенетичность к таким зернам подсказывают, что, кроме крупнозернистого и темноокрашенного сфалерита, следует искать осветленный и мелкозернистый сфалерит — результат перекристаллизации темноокрашенного. Зерна такого сфалерита должны фотолюминесцировать.

Редкие зерна светлоокрашенного сфалерита обнаруживаются в виде дойкилитовых включений в относительно крупных зернах прозрачного кварца, выросших при перекристаллизации рудных агрегатов. Такие зерна под ультрафиолетовым светом высвечивают ярким желтым и оранжево-желтым цветами. Привнос в руды упомянутого месторождения незначительных количеств ра-

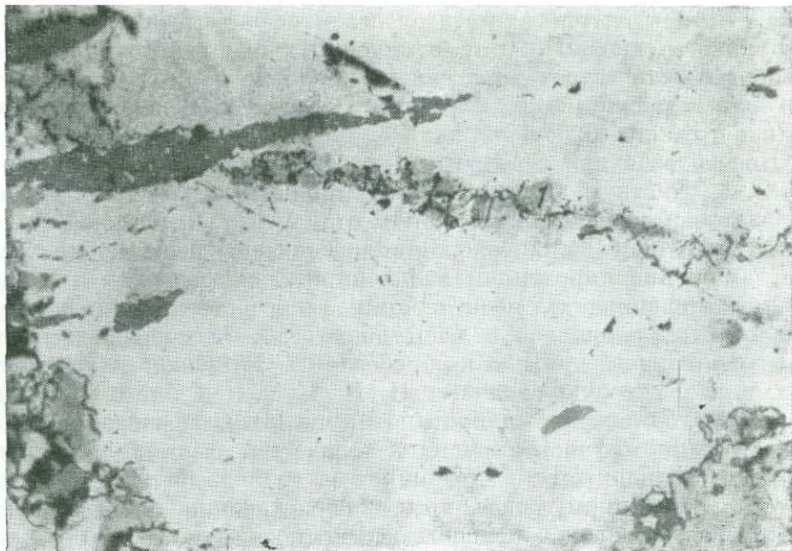
диоактивных элементов, обусловивших дворики в пирите и биотите, а также фотолюминесценцию в осветленном сфалерите, по всей вероятности, не связан с интрузией диорита. Надо полагать, что это результат воздействия на месторождение растворов, генетически связанных с верхнепалеозойскими гранитами.

Агрегаты зерен сфалерита, халькопирита и пирротина цементируют пиритные зерна. Первые два минерала, как уже отмечалось, встречаются в виде пойкилитовых включений в пирите, но несравненно чаще они выполняют трещинки в нем.

Макроскопически сфалерит черный. Он, как уже говорилось, часто содержит тонкие включения халькопирита и пирротина. При наблюдении таких включений в полированных шлифах под микроскопом невольно создается впечатление, что это структуры распада твердых растворов. Такие структуры характерны для неметаморфизованных или слабо метаморфизованных руд месторождений Южного Урала. Однако это впечатление рассеивается при тщательном изучении материала. Под биноклем и под микроскопом при боковом освещении видно, что крупные зерна сфалерита имеют очень густую темно-коричневую окраску. Они полупрозрачны и в них незаметна спайность. Под воздействием давления такие зерна двойниваются, в них становятся заметными многочисленные трещинки спайности и появляются микротрещинки, пересекающие зерна в различных направлениях. Вследствие этого зерна становятся нецелыми (замутненными), по трещинкам в них проникает халькопирит, образуя тонкие включения и в конечном итоге замещая сами зерна. Как показано выше на примере других колчеданных месторождений Среднего Урала, отмеченное явление обусловлено перегруппировкой вещества при метаморфизме.

По пириту, сфалериту и халькопириту развивался пирротин. Прежде всего этим минералом псевдоморфно замещался халькопирит. Развитие пирротина по халькопириту морфологически очень сложно, так как второй образует со сфалеритом многообразные прорастания, выделился в нем и в других минералах по многочисленным трещинкам. Однако надежно прослеживаются все стадии процесса замещения, т. е. от случаев, когда халькопирит только начинает замещаться пирротином в контактах с зернами других минералов, в стороны от трещинок, пересекающих агрегаты зерен халькопирита (рис. 91), до образования полных или почти полных псевдоморфоз пирротина по последнему.

Если в зернах сфалерита имеются тонкие включения халькопирита, то и такие включения часто строго псевдоморфно замещаются пирротином. Такое замещение обычно начинается с периферии зерен сфалерита или в стороны от трещинок, пересекающих эти зерна. Нередко можно встретить явления, когда центральные участки зерен сфалерита переполнены включениями халькопирита, а периферические — уже псевдоморфозами пирротина по таким включениям.



91. Развитие пирротина (1) по халькопириту (основной фон). Тарньерское месторождение. Отраженный свет, увел. 94

Серое — сфалерит, белое — пирит

Изучение руд Зюзельского и Тарньерского, а также других месторождений показывает, что при замещении пирротинном других сульфидов вырастают крупные зерна и кристаллы пирита, т. е. происходит переотложение и перекристаллизация этого минерала. Естественно, что в таких условиях другие более мягкие, нежели пирит, сульфиды должны еще в большей мере переотлагаться. Так в действительности и есть. В полированных шлифах и на крупных образцах рудного керна видно, что халькопирит, замещаясь пирротинном в одних участках, вновь выделяется (переотлагается) в других. Он часто скапливается около крупных зерен пирита, сфалерита, по контактам зерен в агрегатах пирротина и в трещинках, пересекающих такие агрегаты. Новообразования халькопирита часто наблюдаются в приконтактных участках руды и вмещающих пород.

Особенности процесса замещения халькопирита пирротинном, переотложение первого обусловили сложные пространственные соотношения между обоими минералами. Вследствие этого при макроскопических наблюдениях рудных агрегатов часто не удается обнаружить признаков замещения халькопирита пирротинном и создается впечатление о совместном выделении этих двух минералов.

Наряду с замещением халькопирита пирротинном происходило замещение этим же минералом и сфалерита, однако по времени

такой процесс немного отставал, т. е. сфалерит поддавался замещению труднее. Поэтому в сплошных скоплениях пирротина довольно часто встречаются сильно корродированные реликты зерен или агрегатов зерен сфалерита, в которых нередко сохранились и тонкие включения халькопирита.

Новообразований сфалерита (как это отмечено для халькопирита) в участках замещений его пирротином обычно не наблюдается. Следовательно, цинк в отличие от меди переносился растворами на большие расстояния. Таким образом, избирательное замещение пирротином халькопирита и сфалерита и неодинаковая подвижность меди и цинка способствовали дифференциации этих элементов в масштабах всего месторождения, что в конечном итоге привело к образованию той зональности в рудных телах, которую отмечают Н. Н. Кусков и А. А. Куликов.

Пирит замещался пирротином в последнюю очередь, т. е. если в данном участке рудного тела руда была представлена пиритом, сфалеритом и халькопиритом, то первый начинал замещаться пирротином после того, как последние два минерала были уже замещены полностью или почти полностью. Очень часто наблюдаются такие явления, когда в пирротине с реликтами зерен сфалерита сохранились еще не затронутыми зерна и агрегаты зерен пирита. В зернах последнего часты трещинки, выполненные халькопиритом чаще всего и реже сфалеритом. В периферических частях зерен пирита халькопирит (в трещинках) обычно псевдоморфно замещен пирротином.

Наиболее отчетливо замещение пирита пирротином наблюдается в тех участках, где руда представлена главным образом пиритом.

В рудах Тарньерского месторождения много кварца. Формы выделений этого минерала часто бывают необычными для других колчеданных месторождений Урала. В больших участках руды, независимо от ее минерального состава, видна густая и равномерная *вкрапленность округлых*, размером 0,5—1 мм в поперечнике, прозрачных зерен этого минерала. Рудные минералы: пирит, пирротин, сфалерит и халькопирит (особенно последние три) ксеноморфны к таким зернам, они их цементуют. В упомянутых зернах кварца часты включения мелких хорошо ограненных кристалликов пирита и обычно округлых зерен сфалерита и халькопирита. При замещениях пирротином других сульфидов зерна кварца остаются без видимых изменений. Без изменений остаются и включенные в них минералы.

Приуроченность главной массы пирротиновых руд к тем частям рудных тел, которые ближе к интрузии диорита, отмечена Н. Н. Кусковым и А. А. Куликовым. В связи с этим заслуживают внимания и следующие факты. В сплошной руде, представленной главным образом пиритом и незначительным количеством нерудных минералов, скважинами подсечены небольшие прослойки роговиков. Контакты между рудой и указанными прослоя-

ми резкие. Около контактов с роговиками на расстоянии 10—12 см серный колчедан замещен пирротином. В последнем видны редкие, но очень крупные (несколько сантиметров в поперечнике) зерна пирита, выросшие в процессе замещения пирротином серного колчедана.

Приконтактные участки, где серный колчедан замещен пирротином, заметно обогащены халькопиритом (скв. 1080).

В контактах с дайками диабазы, которые пересекают рудные тела, серный колчедан также замещался пирротином и также в последнем видны очень крупные зерна пирита.

Маукское месторождение. Геология месторождения и руды описаны Н. А. Гореловым (1958), метаморфизм пород — В. А. Марксом (1958, 1969). По данным В. А. Маркса, Маукское месторождение претерпело наиболее сильный высокотемпературный метаморфизм по сравнению с другими месторождениями.

С любезного разрешения Е. В. Праховой нам удалось ознакомиться с рудами Маукского месторождения по ее коллекциям полированных шлифов. Изучение упомянутых шлифов под микроскопом показывает, что главный рудный минерал — пирит — претерпел очень сложные изменения, выразившиеся прежде всего в интенсивной перекристаллизации. В зернах этого минерала травлением выявляются радиоактивные дворники и видно, что раньше их было больше, но они уничтожились перекристаллизацией.

Если устанавливаются явные признаки метаморфических изменений в пирите, то не меньшим изменениям должны были подвергнуться сфалерит и халькопирит. Сфалерит в рудах месторождения имеет густую темно-коричневую окраску и сдвойникован. Сравнение такого сфалерита с этим же минералом из Тарньерского месторождения не обнаруживает существенной разницы. Частые пойкилитовые включения сфалерита и халькопирита в зернах пирита указывают на перекристаллизацию последнего вместе с упомянутыми двумя минералами.

Пирротин и халькопирит образуют сложные прорастания и нередко бывает трудно или невозможно решить, который из этих минералов выделялся раньше. Создается впечатление об их совместном выделении. Однако в действительности дело обстоит по-иному. Частые пойкилитовые включения в пиритных зернах халькопирита и сфалерита, когда такие зерна цементируются пирротином, свидетельствуют о том, что указанные два минерала были уже в руде до появления пирротина. Об этом же свидетельствуют и следующие факты. Довольно часто в зернах пирита, находящихся в окружении пирротина, имеются трещинки, выполненные халькопиритом. Трещинки не выходят за пределы зерен пирита. В периферических частях зерен пирита халькопирит частично замещен пирротином.

Кроме приведенных фактов, в рудах Маукского месторождения видны такие соотношения между пирротином и халькопи-

ритом, которые однозначно указывают на замещение второго первым, причем замещение было избирательным и псевдоморфным (рис. 92). Прослеживаются все стадии описываемого замещения, т. е. от случаев, когда пирротин только начинает развиваться по халькопириту в контактах с зернами других минералов до возникновения полных псевдоморфоз первого по второму. Зерна пирита, которые цементировались халькопиритом, оставались при этом не затронутыми пирротинном. Таким образом, зерна пирита оказались сцементированными псевдоморфозами пирротина по халькопириту.

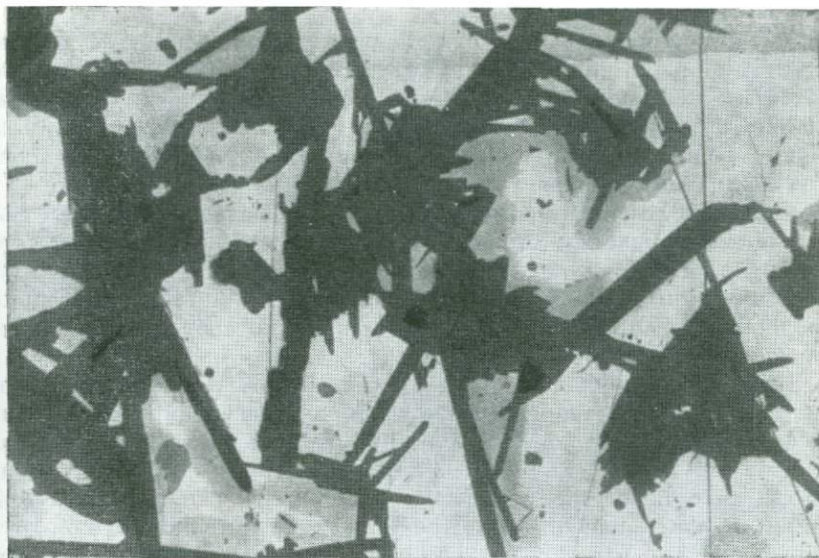
Указанные псевдоморфозы пирротина в дальнейшем сами псевдоморфно замещались резко зональным пиритом (рис. 93) и нерудными минералами, пиритом и магнетитом одновременно, или марказитом.

Таким образом, фактические данные других авторов и наши наблюдения свидетельствуют о том, что в Маукском месторождении так же, как в Тарньерском, Зюзельском и на Чусовском участке пирротин образовался при метаморфизме руд. Он развивался по халькопириту, сфалериту и пириту.

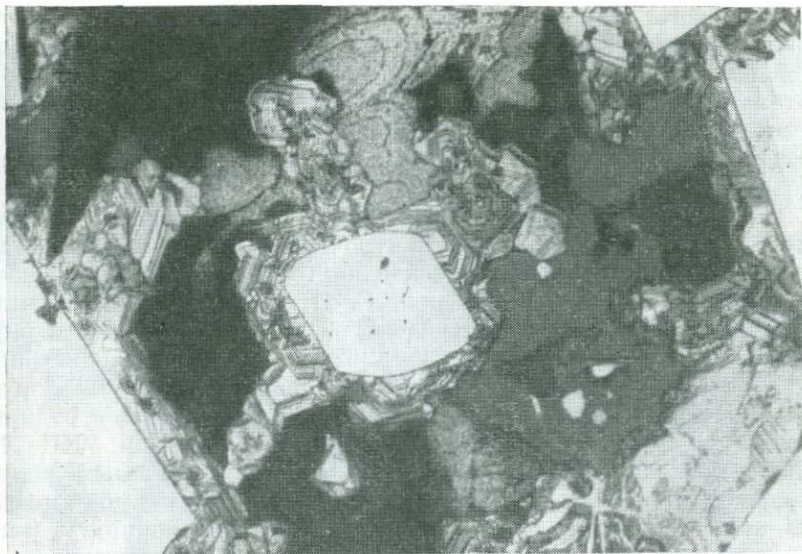
Месторождение им. 50 лет Октября (Тасты-Бутак). Близким аналогом Тарньерского месторождения как по составу вмещающих пород, так и по составу руд является названное месторождение, которое недавно открыто в Западной зеленокаменной полосе в Северных Мугоджарах. Геологическое строение месторождения описано Б. М. Руденко (1968). Последовательность минералообразования дается Г. Э. Нарвайт (1971). По данным Средне-Орской ГРП Средне-Уральской комплексной экспедиции среди вмещающих пород выделяются метаморфизованные вулканогенные породы основного (спиллиты, микродиабазы, туфы и др.) и кислого состава (дацитовые порфириты, кварцевые альбитофиры и др.), роговики антофиллит-кварц-альбитовые, кордиерит-биотитовые, кордиерит-антофиллитовые, кварцевые, серицит-кварцевые, андалузит-кварцевые и хлорит-кварцевые породы.

Массив гранодиорита разделяет рудное поле на два участка (Руденко, 1968, рис. 2). Руды месторождения им. 50 лет Октября в основном средне- и крупнозернистые. Они представлены пиритом, пирротинном, халькопиритом, сфалеритом, магнетитом и гематитом. В незначительных количествах встречаются марказит, ильменит, рутил, молибденит (приурочен главным образом к нерудным минералам, замещающим рудные), редко арсенопирит, галенит и макинавит (?). Из нерудных минералов присутствуют биотит, кордиерит, антофиллит, хлорит, серицит, кварц и карбонат. Б. М. Руденко указывает на гранат, актинолит, эпидот и цеолит. Б. М. Бородаевская, А. Д. Ракчеев, М. И. Вахрушев, Б. Е. Милецкий и М. И. Новгородова (1970<sub>2</sub>) отмечают признаки полигенеза в рудах месторождения.

Все те сложные картины пространственных соотношений



92. Замещение халькопирита (светлое) пирротином (светло-серое) в контактах с биотитом (черное). Маукское месторождение. Отраженный свет, увел. 150



93. Пирит II (зональный) и марказит (колломорфный, пористый), развившиеся по пирротину (пирротин раньше псевдоморфно заместил выделения халькопирита). Маукское месторождение. Отраженный свет, протравлено, увел. 120

Белое — пирит I. Черное и темно-серое — перудные минералы

между рудными минералами, признаки их интенсивной перекристаллизации, которые характерны для Тарньерского, Зюзельского и других месторождений, наблюдаются и здесь. В пирите травлением обнаруживаются зоны роста II, масса микротрещин и редкие радиоактивные дворники. Трещины и дворники при перекристаллизации (рекристаллизации) уничтожаются.

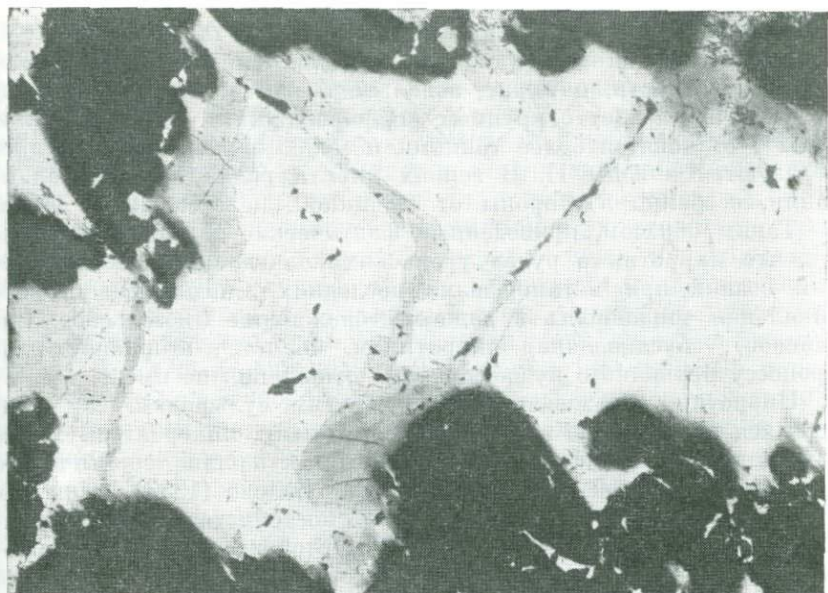
Сфалерит имеет темную окраску. В нем встречаются и эмульсионные включения халькопирита и пирротина и надежно прослеживается, что такие включения эпитогенетичны к сфалериту, т. е. указанные два минерала проникали по спайности в зерна сфалерита с периферии последних и в стороны от трещинок, пересекающих зерна.

Пирротин в рудах месторождения им. 50 лет Октября развит широко. Этот минерал избирательно и псевдоморфно развивался прежде всего по халькопириту (рис. 94), а затем по сфалериту и пириту. При замещении пирротином других сульфидов вырастали очень крупные зерна пирита. Можно было бы привести детальное описание процесса замещения пирротином других сульфидов, однако это излишне, так как мы бы в деталях повторили описание такого процесса в рудах Тарньерского месторождения, Чусовского рудного участка (Полевской район) и т. д.

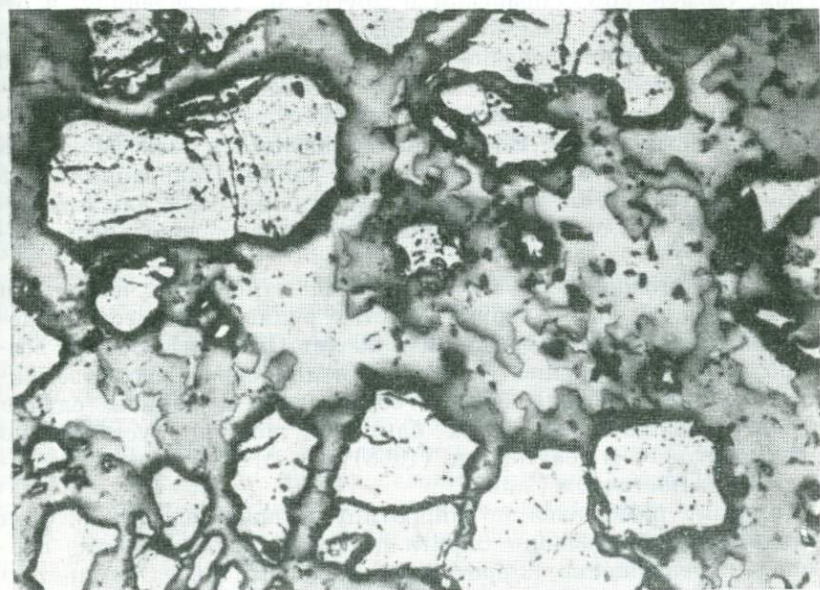
Сибайское месторождение. Кроме Зюзельского, Тарньерского, Маукского и им. 50 лет Октября и других месторождений, где пирротин развит широко, следует остановиться на Сибайском месторождении, которое представляет особый интерес потому, что в верхних его горизонтах руды в наибольшей степени (кроме Блявы, Яман-Касы и Комсомольского) сохранили свой первоначальный облик, пройдя только стадию диагенетических изменений.

Как уже упоминалось, С. Н. Иванов (1947) описал в Сибее пирротиновые руды, которые приурочены к нижним горизонтам месторождения. Н. В. Петровская (1961<sub>2</sub>) на новом материале значительно дополнила описание С. Н. Иванова. А. Д. Генкиным и соавторами (1965) отмечено развитие моноклинного пирротина по гексагональному. В 1967 г. карьером на глубине 180—190 м от дневной поверхности вскрыты верхи этих руд. Изучение собранного нами материала, а также образцов рудного керна, хранящихся в институте геологии и геохимии УНЦ АН СССР (коллекция А. С. Рокачева), не оставляет сомнения, что пирротин точно так же, как и в перечисленных выше месторождениях, метасоматически развивался по халькопириту (рис. 95) и пириту, при этом, как и в других месторождениях, в рудном агрегате вырастали крупные и очень крупные зерна и кристаллы пирита, а халькопирит «отгонялся» и значительная его часть переотлагалась в трещинках и в контактах зерен других минералов, в том числе и пирротина.

Любопытно, что в рудах верхних горизонтов месторождения



94. Замещение халькопирита (светлое) пирротином (светло-серое). Черное — нерудные минералы. Месторождение им. 50 лет Октября. Отраженный свет, увел. 48



95. Замещение (избирательное) халькопирита (светло-серое) пирротином (серое); белое — пирит. Месторождение Сибай. Отраженный свет, увел. 60

зерна пирита отличаются четко выраженной зональностью роста I. На нижних же горизонтах, где появляется пирротин, замещающая, в частности, и пирит, зональность роста в зернах последнего (речь не идет о крупных порфиробластах) уже иная, т. е. зоны I становятся более тонкими и менее заметными, они преобразуются в зоны II. В зернах пирита видна перекристаллизация, особенно в стороны от трещинок, пересекающих зерна.

Таким образом, приведенные фактические данные показывают, что пирротин в рудах уральских колчеданных месторождений возник при метаморфизме последних. Следовательно, вертикальная зональность в ряде месторождений (Зюльское, Сибайское), обусловленная пирротином, является вторичной и к процессу первичного рудоотложения отношения не имеет.

Пирротин, образовавшийся по другим сульфидам, сам подвергался разложению и замещению рудными минералами. Такие замещения (дисульфидизация пирротина) нашли теоретическое объяснение в одной из работ Н. В. Белова (1953). Они (их последовательность) с удивительным постоянством прослеживаются во всех пяти упоминавшихся месторождениях, где пирротин широко развит в рудах. Следует оговориться, что замещения пирротина другими рудными минералами в колчеданных месторождениях встречаются в несравненно меньших масштабах, нежели замещения пирротинном других сульфидов.

Пирротин замещался следующими минералами: а) в Тарньерском, Зюльском, Сибайском и других месторождениях, в отдельных локальных участках, а иногда и в значительных объемах руд пирротин превращался в тонкодисперсную землистую массу дисульфида железа, которая постепенно преобразовывалась в марказит, а последний часто наблюдается в четких колломорфных структурах. По марказиту развивался мелкозернистый пирит, который в отличие от пирита ранних генераций очень легко травится всеми травителями (применяемыми для травления пирита) и в его зернах выявляется четкая зональность роста I.

Следует оговориться, что описанные замещения пирротина наблюдаются обычно в верхних частях рудных тел месторождений (Зюльское, Тарньерское, им. 50 лет Октября). Весьма возможно, что превращение пирротина в тонкодисперсную землистую массу дисульфида железа обусловлено в данном случае жизнедеятельностью тионовых бактерий, как это установлено Г. В. Войткевич и соавторами (1968) для Медведевского месторождения в Восточном Саяне.

Марказит развивался по пирротину и непосредственно. При изучении новообразований пирита по марказиту отмечается следующее. Превращение пирротина в марказит (через землистую массу дисульфида железа и непосредственно) часто происходило по контактам выделений первого с зернами нерудных минералов и в стороны от трещинок, пересекающих пирротин. Если разви-

тие марказита по пирротину осуществлялось в участках, где пирит полностью замещен пирротином, то трудностей в расшифровке пространственных и возрастных соотношений между последним и пиритом, образовавшимся по марказиту, не возникает. В тех же участках, где пирит только частично замещен пирротином, картины бывают весьма сложными и запутанными. Явные признаки замещения первого минерала вторым затусованы. Дело в том, что замещение пирита пирротином осуществлялось обычно с периферии зерен первого и нередко корродированные реликты таких зерен сохранились в окружении новообразований пирротина. В контактах указанных зерен пирита по пирротину развивались венчики, каемочки, неправильной формы участки марказита, который в одних случаях полностью превращен в пирит, а в других — частично. Без травления и изучения полированных шлифов в иммерсии пирит, сохранившийся от замещения пирротином, и пирит, образовавшийся по марказиту, трудно различимы. Создается ложное впечатление о развитии всего пирита по пирротину: б) по пирротину развивался пирит, который ничем не отличается от пирита, образовавшегося по марказиту; возможно, что образование этого пирита также проходило через марказит; в) пирротин одновременно замещался пиритом и магнетитом, которые образуют тончайшие графические прорастания; аналогичный процесс развития пирита и магнетита по пирротину описан Л. Н. Овчинниковым (1960) в рудах контактово-метасоматического происхождения; г) наконец, пирротин замещался тонкозернистым магнетитом; такое замещение особенно наглядно прослеживается в Тарньерском, Маукском, Сибайском и им. 50 лет Октября месторождениях. Указанное замещение пирротина магнетитом проходило избирательно, т. е. пирротин, цементирующий зерна пирита, магнетитом замещался в первую очередь. Замещения пирротином других сульфидов в колчеданных рудах изменили облик этих руд. В них появились новые структуры, новые пространственные соотношения между минералами. Замещения пирротина другими минералами обусловили в дополнение целую серию сложных структурных рисунков и тонких прорастаний одних минералов другими.

Зерна пирита, которые цементировались пирротином до замещения последнего марказитом, магнетитом, также изменялись. В Маукском и других месторождениях в таких зернах зональность роста II становилась менее четко выраженной, отдельные зоны в них сливались и появлялись, таким образом, однородные участки, т. е. зерна перекристаллизовывались, при этом в них становились незаметными и радиоактивные дворники.

В рудах упомянутых выше месторождений, где наблюдается пирротин и развитие по нему марказита и пирита, обнаруживаются новообразования сидерита. Количества этого минерала обычно незначительные. В Сибее, по данным С. Н. Иванова (1947) и нашим наблюдениям, указанный минерал встречается чаще,

нежели, например, в Зюзельском и других месторождениях. Выделения сидерита чаще приурочены к трещинкам в руде или образуют каймы вокруг зерен и агрегатов зерен других минералов. Очень часто сидерит находится в тесных сростаниях с магнетитом. Этому могут быть две причины: 1) сидерит и магнетит образовались одновременно при замещении пирротина пиритом, на возможность таких образований указывает А. Г. Бетехтин (1953), 2) сидерит замещался магнетитом, признаки замещений обнаруживаются под микроскопом.

Из приведенных данных видно, что замещение других сульфидов пирротиниом и, в частности, главного рудного минерала — пирита, обусловлено метаморфизмом. Температуры, при которых происходило указанное замещение, были повышенными, вероятно, порядка 400—700° С. Об этом свидетельствуют и опытные данные, приведенные, например, в работе Куллеруда и Йодера (1966), где определены стабильные отношения пирита в системе Fe—S. Однако необходимо иметь в виду и другие выводы этих же авторов: «Присутствие или отсутствие пирротина в пиритсодержащей ассоциации зависит от общего состава, а не от температуры, как это обычно предполагают» (стр. 122).

*Замещение магнетитом сульфидов.* В рудах подавляющего большинства уральских колчеданных месторождений присутствует магнетит. В ряде случаев этот минерал встречается в рудах в незначительных количествах. Часто мелкие зерна магнетита бывают приурочены к выделениям сфалерита, и, как было показано выше, они образовались за счет примесей железа в последнем, когда сфалерит претерпевал метаморфические изменения. Значительные и большие количества магнетита Л. И. Яковлевым (1959) отмечаются в месторождениях Колчеданном, Безымянном, Калатинской группы и других. Этот исследователь показал, что развитие указанного минерала в колчеданных месторождениях происходило путем замещения им пирита и пирротина. По наблюдениям Л. И. Яковлева, в месторождениях, где есть пирротин, неизменно присутствует и магнетит, однако есть и такие месторождения, в рудах которых пирротина практически нет или мало, а магнетита много.

Давая теоретическое обоснование замещениям сульфидов железом магнетитом в рудах, А. Г. Бетехтин (Бетехтин, 1953) указывает, в частности, на замещение этим минералом пиритовых масс при метаморфизме колчеданных руд на Урале.

Во всех месторождениях, руды которых изучались нами, магнетит развивался, замещая сульфиды железа, цинка и меди. О замещении магнетитом пирротина в Тарньерском, Маукском, Сибайском и им. 50 лет Октября месторождениях уже говорилось. Здесь следует лишь отметить, что масштабы такого замещения в перечисленных месторождениях в общем незначительны. Заметные и большие количества указанного минерала образовались по пириту в Зюзельском и Приорском месторождениях.

В Зюзельском месторождении пирит замещался магнетитом обычно в приконтактных частях рудных линз, образуя в последних неправильной формы скопления от нескольких до 50 см в поперечнике, а на горизонте 228 м нами был зафиксирован переход серного колчедана в магнетитовую руду по всей мощности рудного тела (мощность около 1,5 м). Кроме сплошных выделений магнетита, зерна и небольшие скопления зерен этого минерала довольно часто встречаются в серном колчедане. Нередко в зернах пирита магнетит присутствует в виде пойкилитов. Следует оговориться, что развитие магнетита так же, как и пирротина, по пириту фиксируется в нижних горизонтах месторождения.

Макро- и микроскопическое изучение взаимоотношений пирита и магнетита однозначно показывает, что второй метасоматически развивался по первому (рис. 96).

При замещении пирита магнетитом возникали порфирировидные структуры, аналогичные тем, что образуются при замещении серного колчедана пирротинном, т. е. на фронтах замещений пирита магнетитом в мелкозернистой массе последнего выростали крупные зерна первого. В таких зернах часты пойкилитовые включения магнетита. Кроме того, содержания в них кобальта в три с лишним раза больше, а селена и теллура в 7—8 раз меньше по сравнению с пиритом, который не переотлагался.

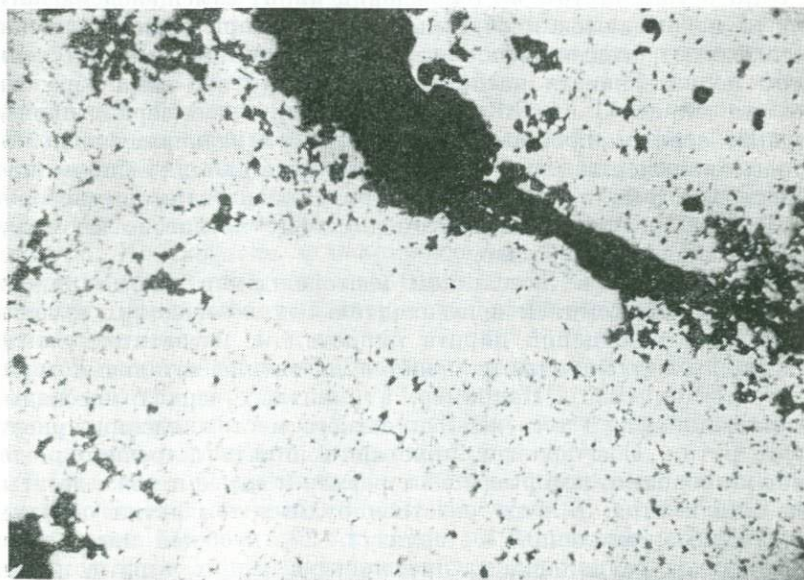
Если в упомянутом месторождении пирит замещался магнетитом, то наблюдаются и обратные явления, при этом замещения часто бывают псевдоморфными. Когда полностью замещается пиритом мелкозернистая магнетитовая руда (а она сама образовалась по пириту), в которой имеются крупные зерна пирита, то такие зерна могут только увеличиться в размерах, но пойкилитовые включения магнетита в них сохраняются. Если не проследить все детали замещений пирита магнетитом и наоборот, то такие включения вызывают недоумение и генезис их может быть истолкован как угодно.

По магнетиту в Зюзельском месторождении, кроме пирита, развивались гематит и в незначительных количествах гематит.

На фоне замещений пирита пирротинном, магнетитом, магнетита пирритом любопытным является поведение титановых минералов (Ярош, 1963). Например, в пиритных зернах массивных и вкрапленных руд того же Зюзельского месторождения присутствует рутил. Обычно этот минерал в пирите встречается единичными зернами, которые имеют размер в сотые и реже десятые доли миллиметра. В ряде участков рудных тел рутил образует значительные скопления, составляя 1—2% к общей массе руды. Зерна рутила равномерно распределены в зернах пирита, иногда они фиксируют собой зоны роста в последних или образуют скопления в виде полосок и струек, которые перекрывают несколько пиритных зерен, а также кварц, серицит и хлоритонд, находящиеся между зерен пирита. Наряду с этим встречаются и такие



96. Замещение пирита (белое) магнетитом (серое); черное — нерудные минералы. Зюзельское месторождение. Отраженный свет, увел. 125

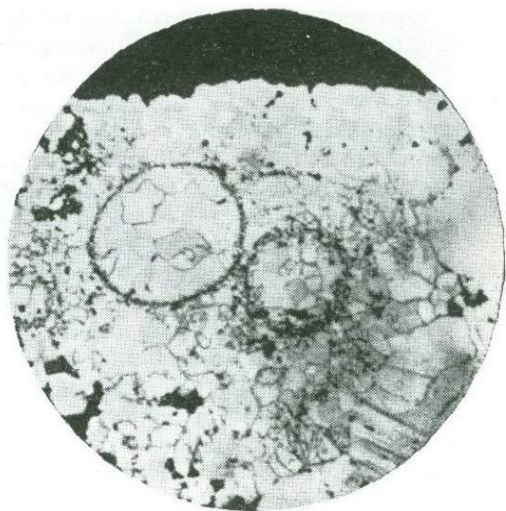


97. Мелкозернистый пирит, заместивший породу основного состава с порфировыми выделениями полевого шпата. В псевдоморфозах пирита по таким выделениям (центр фото) нет рутила (мелкие серые точки). Зюзельское месторождение. Отраженный свет, увел. 80

Черное — нерудный минерал

98. Серный колчедан (светлое), заместивший миндалекаменную породу. В псевдоморфозах пирита по миндалинам нет рутила (мелкие серые точки). Зюзельское месторождение. Отраженный свет, увел. 80. Фото А. Н. Феногенова

Черное — нерудный минерал



участки руды, где распределение зерен рутила имеет определенные закономерности. На рис. 97 и 98 представлены случаи, когда благодаря пространственному распределению зерен рутила в массивной серноколчеданной руде оказались хорошо заметными псевдоморфозы порфириновой и миндалекаменной структур породы, замещенной рудой. Такие структуры характерны для порфириров, залегающих в непосредственной близости от рудных тел месторождения. В указанных порфиритах по данным химических анализов, количество  $TiO_2$  составляет 0,6—0,8, а иногда и более одного процента. Хорошо известно, что титан является мало подвижным элементом, поэтому рутил оказался в тех местах в руде, где до появления последней находились темноцветные минералы, содержащие титан. Это подтверждается рис. 97, на котором видно, что в псевдоморфозе пирита по зерну полевого шпата нет зерен рутила.

При замещении пирита пирротинном или хлоритом (о чем будет сказано ниже) рутил не оставался неизменным, он превращается в ильменит и важно следующее. Зерна ильменита, образующиеся по рутилу, остаются строго на тех местах, где были зерна рутила и в деталях унаследуют размер и внешние очертания последних, т. е. это совершенные псевдоморфозы.

Отмеченные выше превращения рутила в ильменит происходили вследствие изменений условий в данном участке месторождения.

Из работ А. Г. Бетехтина (1950, 1953) известно, что пирит устойчив при более высоком кислородном потенциале, нежели пирротин. Кроме того, и это, очевидно, главное, в пирротине имеется избыточное или слабо связанное железо, которое идет

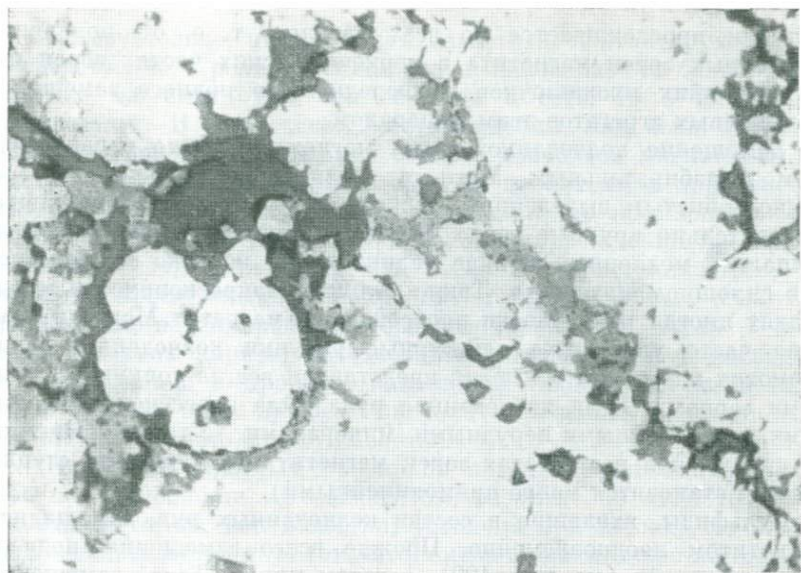
на образование ильменита. На образование ильменита шло и железо, освобождавшееся при замещении пирита хлоритом.

Ильменит, образовавшийся по рутилу при замещении пирита хлоритом, также подвержен изменениям. Он переходит в сфен. Превращение ильменита в сфен отмечается в тех случаях, когда хлорит, в котором он находится, замещается серицитом. Сфен, образовавшийся по ильмениту при замещении хлорита серицитом, часто превращается в агрегат очень мелких иголочек рутила.

Минералы титана содержатся в рудах и других месторождений. Например, в одном из Карабашских месторождений нами наблюдались густые скопления зерен рутила в виде полосок, которые перекрывают зерна пирита, хлоритоида и кварца.

Приорское месторождение в отношении развития магнетита по колчеданной руде представляет, пожалуй, наибольший интерес. Это месторождение открыто недавно в Северных Мугоджарах. Оно находится в той же геологической обстановке, что и месторождение им. 50 лет Октября, располагаясь несколько южнее от последнего (Руденко, 1968, рис. 1). Руды месторождения представлены пиритом, пирротинном, магнетитом, сфалеритом и халькопиритом. В незначительных количествах присутствуют арсенипирит, галенит. Рудные агрегаты в основном тонко- и мелкозернистые, а в отдельных участках средне- и крупнозернистые. В таких агрегатах видны брекчиевые и брекчиевидные текстуры, выраженные то отчетливо, то различные с трудом. Макроскопически и под микроскопом в рудах наблюдаются крустификационно-колломорфные и колломорфные образования пирита, пирита и сфалерита, глобулы и глобулиты пирита. Хорошо видно, как такие образования при перекристаллизации превращаются в зернистые агрегаты, в которых часто сохраняются реликты первичных текстурных рисунков. В целом по текстурным признакам руды Приорского месторождения близки к рудам Сибая. В участках, где руда представлена пиритом и сфалеритом, в последнем обнаруживаются тонкие включения пирита, аналогичные эмульсионным включениям халькопирита в этом минерале. Наряду с включениями пирита, в сфалерите часто встречаются мелкие зерна магнетита.

Лежащий бок месторождения представлен магнетитовыми и магнетит-пиритовыми рудами. Макроскопически видно, как колчеданная руда (в основном пирит) замещается магнетитом, однако взаимоотношения между выделениями последнего и агрегатами сульфидов таковы, что создается впечатление о наложении и пирита на магнетит. Дело в том, что на рудном керне видны не только гнезда, ветвящиеся полоски и струйки новообразованной магнетита по пириту, но и полоски пирита в магнетите. Изучение руд под микроскопом не оставляет сомнения в том, что магнетит повсеместно, где он есть, метасоматически развивался по пириту, сфалериту и в меньшей мере — по халькопириту (рис. 99, 100). Процесс замещения колчеданной руды маг-



99. Начальная стадия замещения пирита (белое) магнетитом (серое); черное — нерудный минерал, Приорское месторождение. Отраженный свет, увел. 94



100. Избирательное замещение сфалерита (серое) магнетитом (светло-серые мелкие идиоморфные зерна); белое — пирит, черное — нерудные минералы. Приорское месторождение. Отраженный свет, увел. 94

нетитом прослеживается во всех деталях, т. е. от появления единичных зерен магнетита в периферических частях зерен пирита, тонких прожилочков в последнем до полного замещения сульфидных агрегатов этим минералом.

Замещение колчеданной руды магнетитом было неравномерным и избирательным. Магнетит развивался прежде всего по тонкозернистым выделениям пирита, сфалерита и халькопирита. Относительно крупные зерна пирита и агрегаты таких зерен замещались медленнее. В виде реликтов они нередко сохранились и в сплошном магнетите. Такие реликты макроскопически и выглядят иногда как полоски, пересекающие магнетит. Магнетитовая руда часто унаследует текстурные рисунки колчеданной руды несмотря на то, что магнетит представлен всегда тонкими и мелкими зернами. Если колчеданная руда была пересечена трещинками, выполненными нерудными минералами, то такие трещинки сохраняются и в агрегатах зерен магнетита (в магнетите стенки трещин становятся менее прямолинейными).

Сульфиды, входящие в состав колчеданных руд, замещались магнетитом неодновременно. Прежде всего замещению подвергался сфалерит (см. рис. 100), а затем пирит. Такое замещение в отчетливой форме прослеживается, например, в руде, подсеченной скв. 9. Халькопирит замещался магнетитом только частично. В результате такого хода процесса замещения в сплошной магнетитовой руде сфалерит практически отсутствует. Он в редких случаях сохраняется тогда, когда бывает включен в нерудные минералы или в зерна пирита (пойкилиты). Халькопирит же немногим больше чем на половину остается незамещенным магнетитом и образует в зернах последнего мелкие пойкилиты, а также неправильной формы скопления.

Характерно, что замещающиеся мелко- и тонкозернистые агрегаты сульфидов (главным образом пирита) часто не содержат нерудных минералов. В новообразованиях же магнетита по таким агрегатам всегда имеются в заметных количествах последние. Они выделились основной массой между зерен магнетита, реже по трещинкам таких зерен, частично корродируя их.

В одном случае (скв. 9) наблюдалась трещинка, пересекающая колчеданную руду и выполненная идиоморфными зернами арсенопирита. Арсенопирит больше чем на 50% сохранился от замещения магнетитом в то время, как другие сульфиды (пирит главным образом) замещены этим минералом почти полностью. По магнетиту, образовавшемуся по колчеданной руде, развивался маггемит. В ряде случаев зерна магнетита замещены этим минералом почти на 50%. Образования маггемита в магнетите очень тонкие. Развитие первого часто начиналось не с периферии зерен второго, а с центров зерен и по зонам роста в последних. Такое развитие маггемита по магнетиту описано Л. Н. Овчинниковым (1960) в рудах контактово-метасоматического происхождения.

Примечательно, что в зернах магнетита, контактирующих непосредственно с реликтами пирита, в подавляющем большинстве случаев магнетита нет или если он и есть, то в ничтожных количествах. В Зюзельском месторождении, как было показано выше, на фронтах замещения серного колчедана магнетитом вы-растали крупные зерна пирита, т. е. происходила перекристаллизация этого минерала с переотложением. До замещения магнетитом колчеданная руда в Приорском месторождении претерпела заметные изменения и прежде всего перекристаллизацию, что надежно прослеживается по реликтам колломорфных и кристификационно-колломорфных образований, зонам роста I и II рода в зернах пирита, исчезновению микротрещин в последних и т. д. Однако в процессе замещения такой руды магнетитом ни в пирите, ни в других минералах признаков видимой перекристаллизации не обнаруживается.

Отсутствие видимых признаков перекристаллизации сульфидов при замещении их магнетитом, развитие по магнетиту магнетита, который, как известно, устойчив при низких температурах, свидетельствует о том, что смена окислительно-восстановительного потенциала в месторождении была резкой. Замещение сульфидов магнетитом происходило сравнительно быстро и при относительно низких температурах.

Приведенные наблюдения по замещению колчеданной руды магнетитом в Приорском месторождении имеют большое значение не только для уяснения масштабов развития метасоматических процессов при метаморфизме колчеданных месторождений. Эти наблюдения показывают, что большие количества магнетита в лежащем боку месторождения не относятся к первичным образованиям, обусловленным сменой физико-химических условий во время процесса рудоотложения. Большие количества магнетита в месторождении возникли как результат замещения этим минералом колчеданных руд после того, как такие руды были отложены и претерпели заметные изменения, о которых говорилось выше.

Описывая метасоматические замещения магнетитом сульфидов в рудах колчеданных месторождений, приуроченных к главной вулканогенной полосе, нельзя не остановиться на Ново-Николаевском месторождении, которое залегает в комплексе вулканогенных образований второй восточной полосы. Это месторождение кратко охарактеризовано А. П. Переляевым и Е. В. Праховой (1959). По мнению этих авторов, Ново-Николаевское месторождение относится к промежуточным между колчеданными и контактово-метасоматическими. В состав руд упомянутого месторождения, по А. П. Переляеву и Е. В. Праховой, входят магнетит, гематит, пирит, халькопирит, сфалерит, теннантит и пирротин.

Чтобы уяснить возрастные соотношения между главными сульфидами — пиритом, халькопиритом и сфалеритом, с одной стороны, и магнетитом, с другой, — в рудах Ново-Николаевского

месторождения, мы воспользовались большой коллекцией полированных шлифов А. П. Переляева, хранящейся в институте геологии и геохимии УНЦ АН СССР. Изучение коллекции показало, что руды упомянутого месторождения представлены набором типичных сульфидов, характерных для руд колчеданных месторождений. Зерна главного рудного минерала — пирита имеют явные признаки сложных метаморфических изменений, выразившихся в исчезновении зональности роста I и в появлении зональности II, в интенсивном дроблении и перекристаллизации, а также в замещении нерудными минералами.

Пространственные соотношения между сульфидами (пиритом и халькопиритом, так как они преобладают среди других сульфидов) и магнетитом не во всех случаях ясны. Это объясняется тем, что руды в целом претерпели сложные изменения, при которых менялся режим серы и кислорода. Вследствие этого пирит и халькопирит замещались магнетитом, а последний дробился и на него накладывался переотложенный халькопирит.

Признаки более позднего образования магнетита относительно пирита и халькопирита, несмотря на усложнения, обусловленные перекристаллизацией с переотложением вещества, обнаруживаются в подавляющем большинстве полированных шлифов, в которых есть магнетит и указанные сульфиды. Можно было бы в подтверждение сказанного привести ряд микрофотографий, однако эти микрофотографии не дадут ничего нового, так как они по существу не будут отличаться от рисунков, отображающих процесс замещения магнетитом сульфидов в других месторождениях.

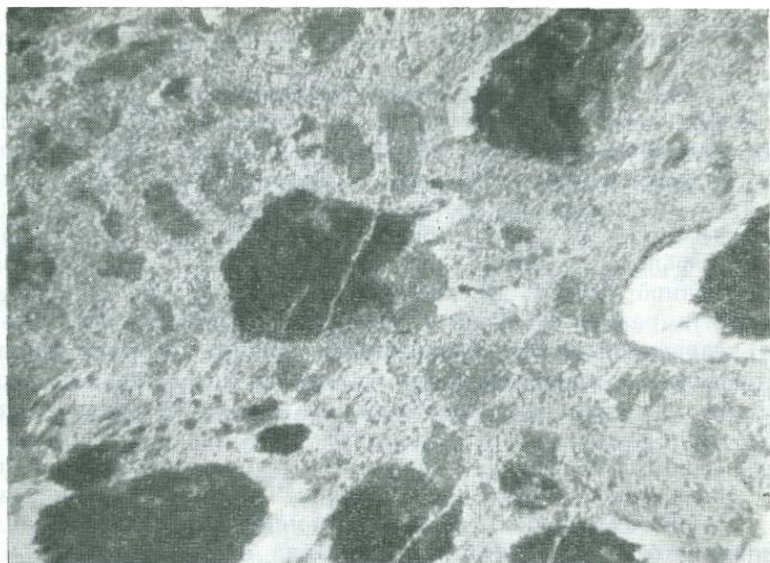
Почти во всех колчеданных месторождениях, где в рудах есть магнетит, отмечается и гематит. Количества этого минерала обычно незначительны сравнительно с магнетитом и всегда видно, что он псевдоморфно развивался по последнему. Отмечаются и обратные явления — развитие магнетита по гематиту (Зюзельское месторождение и др.). По данным Г. Ф. Червяковского (устное сообщение), в Андреевском месторождении (Красноуральский район) были обнаружены значительные количества сплошных гематито-мушкетовидных руд.

Для сравнения нами изучалось небольшое количество образцов руд по Озерному месторождению (Бурятия). Мы не можем сейчас определить, в какой степени изменены руды этого месторождения, однако в связи с выше изложенными фактическими данными, заслуживают внимания в этих рудах пространственные соотношения сульфидов и магнетита. В изученных нами образцах видно, что магнетит развивается по сульфидам и в первую очередь — по сфалериту. Сказанное свидетельствует, что замещение сульфидов магнетитом как признак метаморфизма колчеданных руд имеет место не только на Урале.

*Замещение сфалерита пиритом.* Значительный интерес представляют замещения сфалерита пиритом. В литературе, относящейся к колчеданным месторождениям Урала, кроме нашей статьи

(Ярош, 1965<sub>1</sub>), такие замещения не описаны, а между тем они встречаются довольно часто. Лучше указанные замещения в деталях показать на примере одного месторождения, руды которого изучались нами детально. Одним из возможных объектов может быть месторождение им. III Интернационала. При описании сфалерита уже отмечалось, что в всяких боках околорудных тел этого месторождения встречаются своеобразные вкрапленные цинковые руды. Изучение забоев рудника, многочисленных крупных штуфов из указанных руд показывает, что зерна сфалерита изометричной формы, имеющие темно-коричневую, коричневую окраску и размер до 1 см в поперечнике, выделялись в серицит-кварцевой породе, пропитанной тонкими зернами пирита. Распределение зерен сфалерита в породе не везде одинаково. В одних участках они образуют более или менее равномерную густую или редкую вкрапленность, в других скапливаются в нечеткие полосы, в третьих — приурочены к трещинам, пересекающим породу в различных направлениях. Под биноклем видно, что даже в тех участках породы, где макроскопически не видно трещиноватости, в действительности она есть, но мелкая. Трещинки ориентированы в основном согласно с общим направлением сланцеватости в породах и с полосчатостью в рудах, однако имеются и исключения. Очень часто к трещинкам приурочены скопления пирита и серицита. В тех участках породы, где мало трещинок, меньше и упомянутых двух минералов. Зерна сфалерита в таких участках изометричны, часто зональные и почти не трещиноваты. В участках, где порода хотя бы слабо расланцована (это обычно вытянутые полосы, имеющие форму плоских линз), в ней увеличивается количество серицита и пирита, а в указанных зернах сфалерита появляется трещиноватость, причем в большинстве случаев трещинки в зернах ориентированы перпендикулярно расланцеванию в породе. В контактах зерен появляются скопления тонких зерен пирита, а в тенях давления отложился стебельчатый кварц или чаще крупночешуйчатый серицит (рис. 101) и реже халькопирит. При более интенсивном расланцевании породы в ней еще больше появляется пирита и серицита. Зерна сфалерита дробятся и приобретают форму двояко вышуклых линз. Они обтекаются породой. Тени давления около них становятся большими и выполняются теми же минералами, кроме того, здесь же появляется переотложенный осветленный сфалерит. Выделявшийся пирит псевдоморфно замещал зерна сфалерита. Процесс замещения прослеживается от начальных его стадий до образования полных псевдоморфоз тонкозернистого пирита по зернам и обломкам зерен сфалерита (рис. 102). Микроскопическое изучение показывает, что основная масса пирита, выделившегося в породе и замещавшего сфалерит, представлена мелкими неправильной формы зернами.

Вместе с пиритом на сфалерит накладывались небольшие количества халькопирита, реже галенит, теннантит и арсенопирит.



101. Выделения крупночешуйчатого серицита (белое) в тенях давления около зерен сфалерита (черное). Основной фон — пирит, псевдоморфно заместивший обломки зерен сфалерита и породу. Месторождение им. III Интернационала, Полированный шлиф, снято под бинокулой, увел. 15



102. Псевдоморфозы мелкозернистого пирита (1) по крупным зернам сфалерита (черное), 2 — серицит. Месторождение им. III Интернационала. Полированный шлиф, снято под бинокулой, увел. 15

Выделения этих минералов, кроме арсенопирита, приурочены главным образом к теньям давления зерен сфалерита и к трещинкам, пересекающим их. Иногда халькопирит проникал в сами зерна, образуя в них тонкие эмульсионные включения, приуроченные к отдельным зонам роста или к трещинкам спайности.

Аналогичные замещения сфалерита пиритом встречаются как во вкрапленных, так и в сплошных рудах месторождений им. XIX партсъезда, Александринского, Гайского и других.

Если замещения сфалерита пиритом рассматривать изолированно от общего хода метаморфических изменений колчеданных руд, то они будут противоречить тому порядку выделения этих минералов, на который указывают многие исследователи, а также тому направлению кристаллизационной дифференциации, на которой мы останавливались, описывая процесс раскристаллизации тонкодисперсных масс сульфидов сложного состава. В действительности же никаких противоречий нет, так как описанные пространственные соотношения между сфалеритом и пиритом не имеют отношения к первичному рудоотложению. Они обусловлены метаморфической дифференциацией ранее отложенного рудного вещества.

На месторождении им. III Интернационала, как и в других месторождениях, зерна сфалерита, которые замещались пиритом, являются порфиробластами, т. е. это переотложенный сфалерит из рудных тел.

Если сравнивать сфалерит в рудных телах на том же III Интернационале с крупными зернами этого же минерала в породах около рудных тел, то отмечается следующее. В первом случае минерал интенсивно изменен, особенно в приконтактных частях рудных тел. Здесь он тонкозернистый, обесцвечен; сдвойникован и вытянут в тонкие полоски и струйки. Кроме того, под ультрафиолетовым светом здесь же обнаруживаются следы сложных пластических деформаций в агрегатах минералов (см. рис. 76, 77). В отдельных участках рудных тел сохранились колломорфные выделения сфалерита и видно, как под воздействием стресса такие выделения превращаются в тонкозернистый агрегат интенсивно сдвойникованных зерен. Во втором случае зерна сфалерита изометричные и крупные. Их сохранность в общем нельзя сопоставить с сохранностью этого минерала в рудных телах. Трудно допустить, чтобы динамические воздействия сказались только на последних и не коснулись сфалерита во вмещающих породах, если бы этот сфалерит был отложен одновременно или близко одновременно со сфалеритом в рудных телах. Воздействия стресса, как показано выше, сказались и на крупных зернах сфалерита во вмещающих рудные тела породах, однако эти воздействия коснулись лишь локальных зон в породах и они были более поздними по отношению тех воздействий, которые обуславливали сильные изменения в рудных телах, и, в частности, деформации и переотложение сфалерита.

Сфалерит переотлагался неоднократно. Если, будучи переотложенным из рудных тел в боковые породы, этот минерал замещался также переотложенным пиритом, то при этом он (сфалерит) переотлагался вновь в ослабленные участки породы и, главным образом, в трещины, пересекающие породу в различных направлениях. Такой сфалерит ничем не отличается от этого же минерала во вкрапленных рудах, которые описаны выше, но зерна его имеют хорошую сохранность и не устанавливаются признаки замещения таких зерен пиритом.

*Замещение халькопирита борнитом.* Во многих колчеданных месторождениях Урала встречается гипогенный борнит. Количества этого минерала в рудах не постоянны, а распределение его в отдельных рудных телах и даже в участках последних неравномерное. В заметных и больших количествах борнит присутствует (или присутствовал) на III Интернационале, в Карабаше, Гае и некоторых других месторождениях.

Изучению борнитовых и борнитсодержащих руд, выяснению условий и относительного времени их образования посвящено много печатных и рукописных работ. Наиболее важными являются исследования А. А. Филимоновой (1949, 1952) и Г. Ф. Червяковского (1948, 1960). Мы также неоднократно занимались изучением указанных руд. Данные других исследователей и наши наблюдения показывают, что борнит в колчеданных рудах на Урале образовался при метаморфизме последних. Исследования показали неизменную приуроченность сфалерита, светящегося под ультрафиолетовым светом, к борнитовым и борнитсодержащим рудам (Ярош, Юрин, 1966). Результаты изучения особенностей проявления фотолюминесценции сфалерита свидетельствуют о том, что способность высвечивать под ультрафиолетовым светом этот минерал приобрел после того, как руды были уже сформированы и претерпели значительные метаморфические изменения. В это же время образовался и борнит. Образование борнита в колчеданных рудах связано с растворами, которые привнесли в руду незначительные количества радиоактивных элементов, олова, мышьяка, а также золото, серебро, бор и, видимо, ряд других элементов. В результате в рудах (кроме борнита) появились новообразования таких минералов, как штромейерит, аргентит, станнин, люционит и другие (Ярош, 1951, 1955). В ныне отработанной борнит-теннантитовой жиле месторождения Карабаш встречались относительно крупные выделения самородного золота и серебра. Растворы генетически были связаны с кислыми интрузиями, вероятнее всего, верхнепалеозойского возраста.

Борнит в колчеданных рудах образовался главным образом путем псевдоморфного замещения халькопирита. Для колчеданных руд обычны постепенные переходы от пирит-халькопиритовых агрегатов к агрегатам пирит-борнитовым, при этом прослеживаются все стадии процесса замещения борнитом халькопирита. Отмечаются также замещения и борнита халькопиритом,

которые описаны уже давно другими авторами (Переляев, 1959 и др.). Масштабы таких замещений незначительны. Борнит, образовавшийся по халькопириту, замещался и халькозином. Замещение было почти всегда псевдоморфным.

Растворы, с которыми связано образование борнита в колчеданных рудах, оказывали дальнейшее метаморфизирующее воздействие на рудные агрегаты. В борнитовых и борнитсодержащих рудах часто встречаются крупные порфиробласты пирита с большим количеством радиоактивных двориков, а сфалерит приобретал темно-коричневую окраску, т. е. происходила перекристаллизация минералов.

*Прочие замещения рудных минералов рудными.* В рудах колчеданных месторождений Урала, кроме перечисленных замещений, осуществлялись и иные замещения рудных минералов рудными же минералами, причем масштабы процессов были различными. Замещения пирита халькопиритом, сфалеритом и другими сульфидами (о пирротине и марказите речь не идет, так как об этом уже подробно указано выше) в рудах среднеуральских месторождений встречаются часто. Такие замещения широко освещены в литературе, и специально на них останавливаться едва ли целесообразно. Следует лишь отметить, что в южноуральских месторождениях, в наибольшей степени сохранивших свой первоначальный облик, упомянутые замещения обнаруживаются гораздо реже. Для руд Учалинского месторождения на это указывала и Т. Н. Шадлун (1950).

Т. Н. Шадлун отмечает замещение арсенопирита теннантитом. Нами такие замещения наблюдались в рудах месторождения им. III Интернационала. Замещение арсенопирита теннантитом встречается сравнительно редко и трудно сделать вывод о количестве теннантита, образовавшегося в колчеданных рудах таким путем.

В связи с замещениями одних рудных минералов другими необходимо остановиться на кубаните и валлериите. Как отмечает Рамдор П. (1962), эти минералы могут являться продуктами распада твердых растворов. П. М. Замятин (1929) указывает, что в рудах Компанейского месторождения еще до 1929 г. Шнейдерхёном был установлен кубанит. С. А. Вахромеев (1942) кубанит и валлериит описал в рудах Пышминско-Ключевского месторождения. В рудах Зюзельского, Карабашских и других месторождений указанные минералы встречаются в незначительных количествах. Они приурочены обычно к выделениям халькопирита. В Тарньерском месторождении наблюдался макинавит (?), развивающийся по пирротину.

Взаимоотношения между халькопиритом, кубанитом и валлериитом таковы, что часто бывает невозможно решить вопрос о порядке выделения всех трех минералов, однако на Чусовском рудном участке (Полевской район) встречено явное развитие валлериита по халькопириту. Валлериит в последнем выделился по

контактам зерен, по трещинкам спайности и в стороны от таких трещинок.

Присутствие в рудах валлерита и кубанита свидетельствуют о том, что рудные тела прогревались по крайней мере до  $250^{\circ}\text{C}$  (Рамдор, 1962).

На месторождении им. III Интернационала в непосредственной близости около рудных тел и внутри последних, как уже упоминалось, встречаются черные сланцы, которые исследователями, изучавшими месторождение до нас, описаны как углистые. Макро- и микроскопическое изучение таких сланцев показало, что в них содержится не только серицит, кварц, рутил, но и графит. Следовательно, сланцы правильнее называть графитистыми, или графитсодержащими. В упомянутых сланцах очень часто видна различной густоты вкрапленность сульфидов и главным образом пирита. В сплошных рудах, состоящих из пирита, сфалерита, халькопирита, борнита, теннантита, небольших количеств галенита, в непосредственной близости от графитистых сланцев присутствует и графит в заметных количествах. Этот минерал чаще в тесных сростаниях с серицитом и реже самостоятельно приурочен к трещинкам, пересекающим агрегаты рудных минералов. Наложение графита на сплошные руды не вызывает сомнения. Указанный минерал образовался при метаморфизме пород, содержащих углистое вещество, и перетолжен в рудные тела.

Итак, приведенные наблюдения показывают, что в рудах колчеданных месторождений Урала осуществлялись широких масштабов замещения одних рудных минералов другими. Такие замещения обусловлены метаморфизмом. Развитие пирротина по другим сульфидам, а по пирротину, пириту, халькопириту и сфалериту магнетита указывает на прогрессивный характер метаморфизма. Замещения сопровождались перекристаллизацией и перетолжением рудного вещества.

### Замещение рудных минералов нерудными

Выше приведены фактические данные, свидетельствующие о метасоматическом замещении рудой пород в процессе рудоотложения. В свете этих данных большой интерес представляют замещения рудных минералов и агрегатов таких минералов нерудными минералами. Эти замещения понятны и закономерны. При метаморфизме нарушались равновесия не только между минералами, слагающими руды, но также между сульфидами и нерудными минералами, которые были примешаны к рудам и входили в состав вмещающих пород. Смена физико-химических условий при метаморфизме обусловила сложные преобразования и в нерудных минералах — появление новообразований, перекристаллизацию и перетолжение и замещение ими сульфидов.

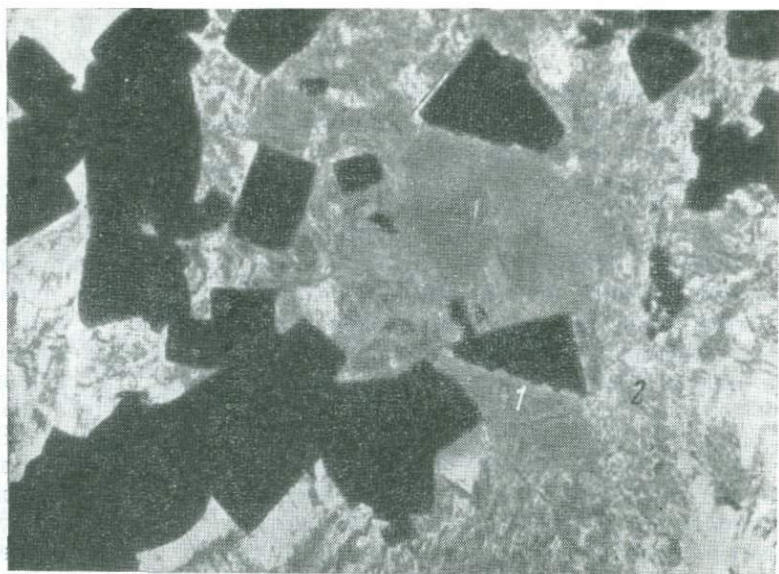
Замещения минералов, слагающих колчеданные руды, неруд-

ными минералами представлены в широких масштабах, особенно на Среднем Урале. На описании таких замещений мы неоднократно останавливались в своих статьях (Ярош, 1962, 1964<sub>1</sub>). Тем не менее этот вопрос представляет большой интерес, и ему следует уделить внимание еще раз.

*Замещение хлоритом пирита, халькопирита и других рудных минералов.* Взаимоотношения между пиритом и хлоритом в колчеданных рудах таковы, что второй ксеноморфен относительно зерен первого. Несмотря на это, не всегда удается обнаружить признаки, которые бы свидетельствовали о замещении пирита хлоритом. Такие признаки устанавливаются, например, в Зюльском месторождении в краевых частях и на выклинках рудных линз или по зонам интенсивной трещиноватости в последних. Здесь хлорит выделялся между зерен пирита и их обломков, корродируя и замещая частично или полностью последние. Зафиксированы такие случаи, когда идиоморфные зерна пирита сами, являясь выросшими при перекристаллизации и переотложении рудного вещества, строго псевдоморфно замещались крупночешуйчатым хлоритом (рис. 103, 104). Хлорит в свою очередь в масштабах забоев рудника и в пределах отдельно взятой его чешуйки замещался серицитом. Замещение было столь совершенным с точки зрения возникновения псевдоморфоз, что серицит унаследовал не только размер и форму чешуек хлорита, но и тончайшие трещинки спайности в них. В результате во вкрапленных рудах, а точнее в кварцево-серицитовых сланцах с вкраплениями зерен пирита, наблюдаются наряду с тонкочешуйчатым серицитом такие его выделения, генезис которых не понятен, если не знать, что это псевдоморфозы по псевдоморфозам хлорита (рис. 105). При изучении отдельных шлифов из указанной породы может создаться впечатление, что псевдоморфозы серицита по хлориту не являются таковыми, а что крупночешуйчатый серицит переотложен в тени давления около пиритных зерен. Такое переотложение хлорита и серицита вообще имеет место, но в рассматриваемом случае это не так по двум причинам. 1) наблюдается постепенное замещение первого вторым; 2) при интенсивном боковом давлении, обусловившем рассланцевание породы, такой серицит (или хлорит) вырасти не может. Его идиоморфные очертания в таких условиях не могли возникнуть.

Хлорит развивался не только по пириту. Он также замещал пирротин и магнетит.

Своеобразно протекало замещение хлоритом халькопирита. В начальные стадии процесса по трещинкам спайности в халькопирите появлялись отдельные чешуйки первого. Затем количество чешуек увеличивалось, они соединялись между собой, образуя своеобразную сетку (рис. 106). На конечных стадиях замещения чешуйки хлорита сливались в сплошные участки, которые количественно преобладают над халькопиритом или полностью замещали его.

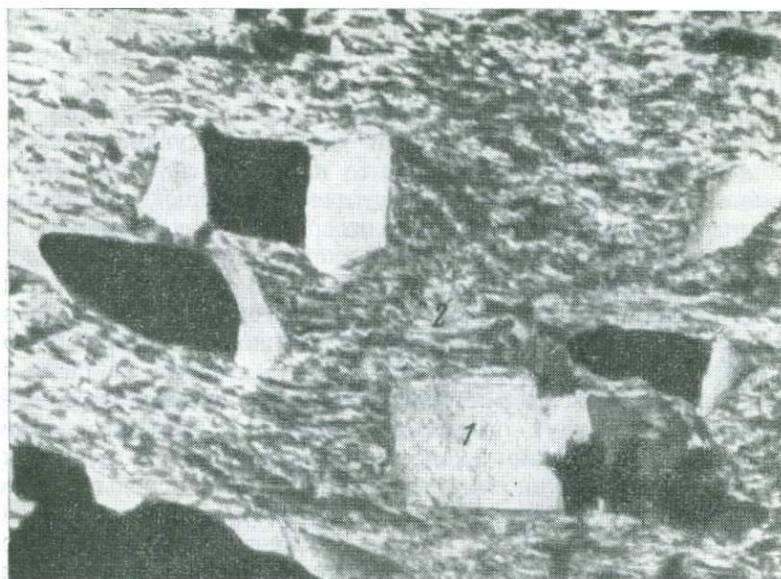


103. Полупсевдоморфозы крупночешуйчатого хлорита (1) по идиоморфным зернам пирита (черное), 2 — мелкочешуйчатый хлорит. Зюльское месторождение. Проходящий свет, без анализатора, увел. 130. Фото автора и Ф. П. Буслаява



104. Псевдоморфозы (совершенные) крупночешуйчатого хлорита по идиоморфным зернам пирита (черное). Зюльское месторождение. Проходящий свет, без анализатора, увел. 130. Фото автора и Ф. П. Буслаява

Хлорит: 1 — крупночешуйчатый, 2 — мелкочешуйчатый



105. Псевдоморфозы серицита (1) по псевдоморфозам хлорита по пириту; 2 — мелкочешуйчатый серицит; черное (идiomорфные зерна) — пирит. Зюзельское месторождение. Проходящий свет, без анализатора, увел. 130. Фото автора и Ф. П. Буслаева



106. Интенсивное замещение хлоритом (1) халькопирита (2). Белое — пирит. Зюзельское месторождение. Отраженный свет, увел. 98

Необходимо подчеркнуть, что в участках рудных тел, где наблюдается указанное замещение, хлорит мало затрагивает зерна пирита. Он их только частично корродирует и то в тех местах, где халькопирита не осталось совсем или последний сохранился в редких реликтах. Таким путем возникают участки густых вкраплений зерен пирита в хлорите на месте сплошной пирит-халькопиритовой руды. Без систематических наблюдений природу указанных участков в рудных телах разгадать невозможно. Их скорее можно принять за реликты хлоритизированной и недозаместившейся рудой породы. Тем более это можно сделать, когда хлорит частично или полностью будет замещен серицитом (а это наблюдается часто) и в последнем за счет железа, содержащегося в хлорите, появится масса тонких пиритных зерен, на фоне которых зерна этого же минерала, когда-то цементировавшиеся халькопиритом, будут выглядеть крупными. Иными словами, на месте сплошной пирит-халькопиритовой руды в рудных телах появляются локальные участки серицитовой породы с густой вкрапленностью неодинаковых по размеру зерен пирита.

Хлорит, развивающийся метасоматически по рудным минералам, в отличие от хлорита из боковых пород вдали от рудных тел, имеет густой темно-зеленый цвет (почти черный) и в шлифах фиолетовую интерференционную окраску.

*Замещение серицитом сульфидов.* Более 50 лет назад исследователями рудных месторождений уделялось серьезное внимание серициту, относительно времени его выделений в рудном процессе. Так, Роджерсом (Rodgeres, 1916) для ряда меднорудных месторождений Америки и Африки было показано, что упомянутый минерал является низкотемпературным и что он, накладываясь на руды, замещал их. Для месторождений Прииртышья это же показано П. Ф. Иванкиным (1957).

Возрастные соотношения между серицитом и сульфидами, слагающими колчеданные руды на Урале, представляются одним из ключевых вопросов в понимании генезиса этих руд и последующих в них метаморфических изменений. Еще в 1932 г. Д. К. Суслов и М. И. Меркулов (1932) указывали на более позднее выделение части серицита относительно сульфидов и жильных минералов. В 1936 г. об этом же писали Е. Е. Захаров и С. А. Юшко (1936). С. Н. Иванов и М. И. Меркулов (1937) отмечали постсульфидный серицит в Дегтярском месторождении. Позднее Е. К. Лазаренко (1947) высказал мнение, что часть белой слюды образовалась после пирита в колчеданных месторождениях Урала. Взаимоотношения серицита и колчеданных руд неоднократно рассматривались А. Н. Заварицким и другими исследователями. Однако, как уже отмечалось, были опубликованы многими авторами статьи и монографии, в которых утверждалось, что колчеданные руды на Урале метасоматически замещали рассланцованные породы, и в том числе серицит в последних. Нами впервые были приведены факты, свидетельствующие о замещении сульфидов

серицитом в Уральских колчеданных и Закавказских полиметаллических месторождениях (Ярош, 1962, 1964; Ярош, Хачатурян, 1964).

Наложение серицита на руды в колчеданных месторождениях Среднего Урала и некоторых месторождениях Южного, замещение им отдельных рудных минералов и их агрегатов настолько интенсивное и широко распространенное, что не идет в сравнение ни с какими другими замещениями (рудных минералов нерудными).

Более позднее выделение серицита относительно колчеданных руд доказывается многочисленными фактами. Указанный минерал выделялся в трещинах, пересекающих рудные тела (рис. 51) и локальные участки в последних (рис. 52). Часто чешуйки серицита выполняли трещины в руде, нарастая перпендикулярно стенкам последних напоподобие асбеста.

Замещение серицитом рудных минералов в колчеданных рудах прослеживается от отдельно взятых зерен или колломорфных обособлений таких минералов до масштабов забоев в рудниках. Учитывая важность излагаемого вопроса, нами приводятся такие доказательства в подтверждение сказанному, чтобы у читателя не возникли сомнения в их однозначном истолковании. На рис. 107 видно, что выделения серицита приурочены к трещинке, пересекающей четкую колломорфную структуру пирита, сфалерита и халькопирита, и главное — максимально развиты там, где трещиной пересекается сфалеритовый центр структуры. Рис. 108 показывает, что сфалерит в аналогичной структуре наполовину замещен серицитом, а пирита замещение коснулось только частично. На рис. 109 развитие серицита преимущественно по сфалериту уже такое, что от последнего сохранились только реликты или и таковых не видно. Рис. 110 свидетельствует также о развитии серицита в первую очередь по сфалериту, так как чешуйки первого полностью не заместили пирит, вследствие чего в них сохранились реликты тонких ритмов колломорфной структуры.

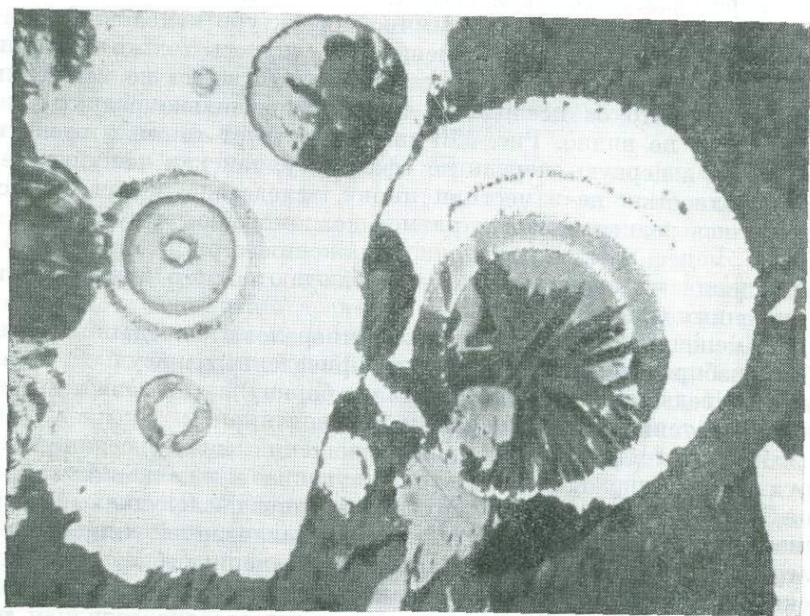
Не менее четкие признаки наложения серицита на руды и замещения их этим минералом наблюдаются и в других месторождениях (рис. 111).

Замещения серицитом рудных минералов в колчеданных рудах было избирательным, что видно из приведенных рисунков. В первую очередь замещению подвергался борнит, затем галенит, халькопирит, теннантит, сфалерит и наконец пирит.

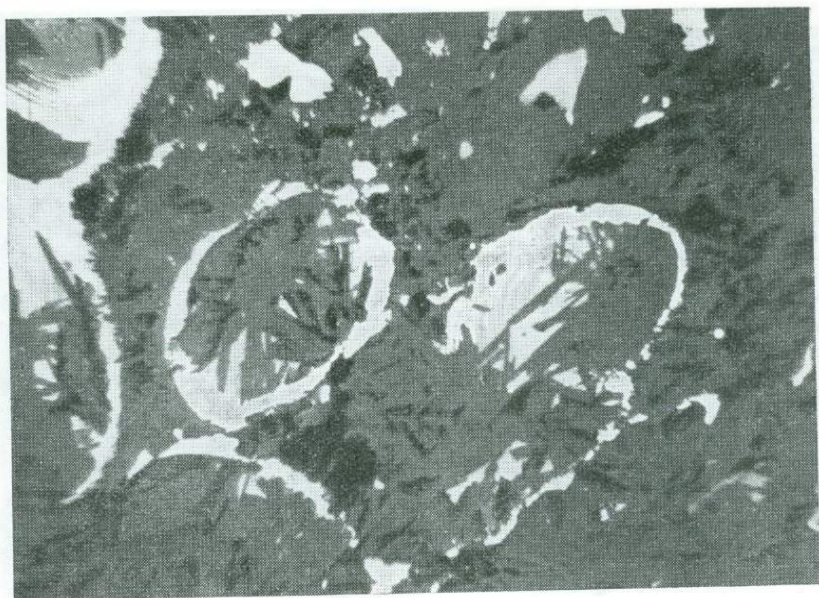
Ясные и бесспорные взаимоотношения между серицитом и рудными минералами, свидетельствующие о наложении первого на вторые, во многих случаях заглушены последующими тектоническими напряжениями и перекристаллизацией минеральных агрегатов. При описании пирита и сфалерита было показано, сколь сложные изменения устанавливаются в этих минералах. Вполне понятно, что если в рудах возникла гнейсовидная текстура и зерна пирита при этом дробились на линзовидные об-



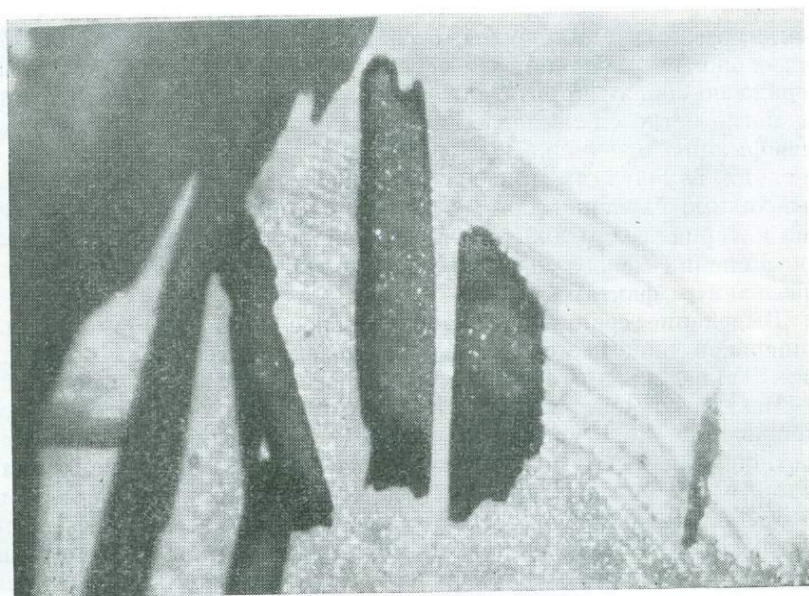
107. Выделение серицита (1) в трещине, пересекающей пирит (белое) и сфалерит (серое). Черное (слева в верхнем углу) — кварц. Месторождение им. III Интернационала. Отраженный свет, увел. 120



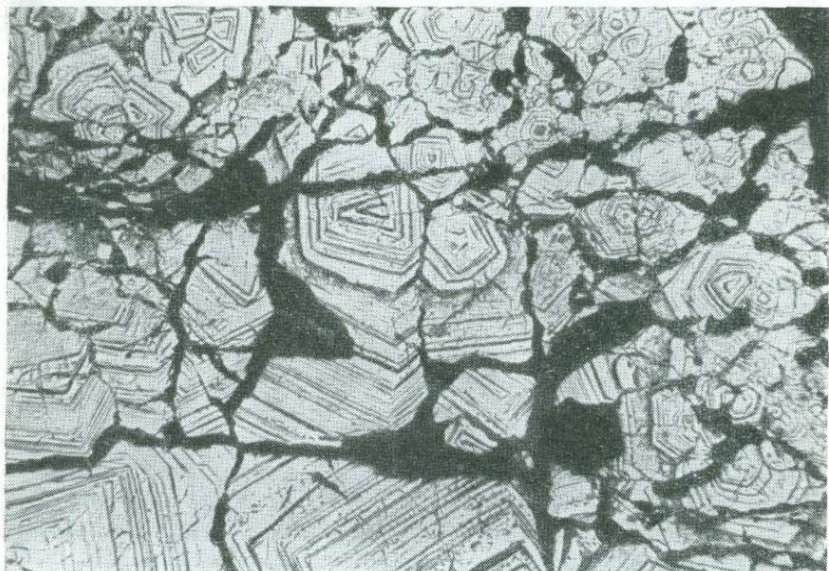
108. Избирательное и псевдоморфное замещение серицитом (черное) сфалерита (серое); белое — пирит. Месторождение им. III Интернационала. Отраженный свет, увел. 120



109. Псевдоморфное замещение сфалерита (серое) серицитом (черное), белое — пирит. Месторождение им. III Интернационала. Отраженный свет, увел. 120



110. Вследствие избирательного замещения сфалерита (серое) серицитом (черное) в чешуйках последнего сохранились детали (ритмы) колломорфного рисунка руды; белое — пирит. Месторождение им. III Интернационала. Отраженный свет, увел. 340

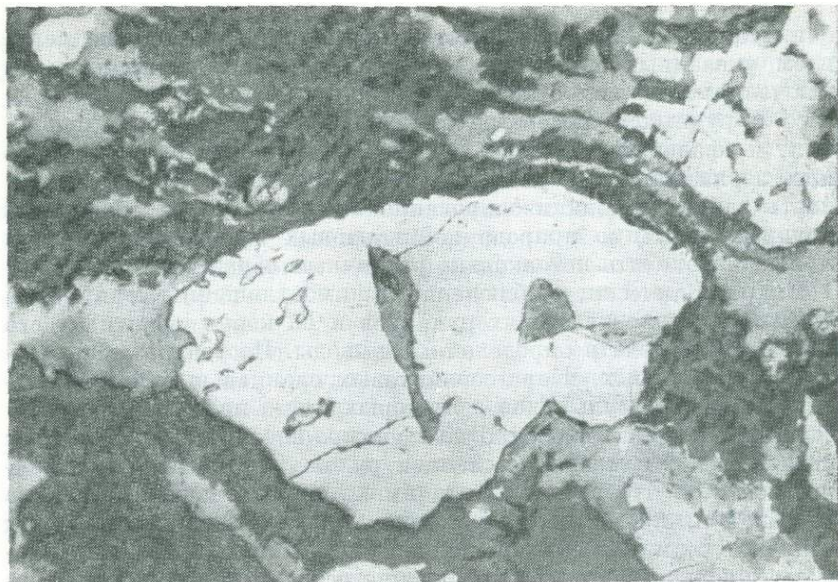


111. Наложение серицита (черное) на пирит (светлое). Гай. Отраженный свет, протравлено, увел. 120. Фото автора и Ф. П. Буслаева

ломки, то другие минералы, особенно серицит, претерпевали более сложные изменения. От четких псевдоморфоз указанного минерала по зернам пирита или других сульфидов в таких условиях не могло остаться и следа. Следовательно, получить достоверную информацию о порядке выделения серицита и рудных минералов в таких случаях трудно. Чтобы избежать ошибочных выводов, необходимо изучение данного вопроса проводить на большом объеме материала и устанавливать постепенные переходы от неясных соотношений между указанными минералами к однозначно истолковываемым фактам.

Выделение серицита и избирательное замещение им рудных минералов чаще всего происходило по вытянутым зонам нарушения. Такие зоны в общем параллельны контактам рудных тел.

Избирательное замещение серицитом рудных минералов обусловило такие текстурно-структурные особенности в рудах и такие соотношения между отдельными ее компонентами (минералами), которые без последовательных и тщательных исследований не могут быть правильно расшифрованы. Приведем конкретные примеры. На рис. 112 видно, как серицит в рудном агрегате развивается по сфалериту и халькопириту, не затрагивая зерен пирита, а последние не являются первичными. Они выросли при перекристаллизации рудного агрегата, о чем свидетельствуют пойкилитовые включения в них, в данном случае сфалерита и халь-



112. Избирательное замещение сфалерита (серое) серицитом (черное); белое — пирит (в нем халькопирит и сфалерит). Месторождение им. III Интернационала, Отраженный свет, увел. 120



113. Сфалерит (серое) почти полностью замещен серицитом (черное); белое — пирит с пойкилитами сфалерита и халькопирита. Месторождение им. III Интернационала. Отраженный свет, увел. 120

копирита. Рис. 113 отображает почти полное замещение серицитом указанных минералов, а зерна пирита с пойкилитовыми включениями других сульфидов остались незатронутыми. Очень часто в рудных телах встречаются такие участки, где халькопирит и сфалерит замещены серицитом полностью и сохранились лишь зерна пирита с указанными включениями. Если рассматривать такие участки изолированно от окружающей обстановки в рудных телах, то природа пойкилитовых включений в зернах пирита может быть истолкована различным образом.

Макроскопические наблюдения взаимоотношений серицита и рудных минералов в забоях рудников и на керне скважин часто не позволяют делать определенные выводы. Постепенные переходы от серицитовых, кварц-серицитовых сланцев с густой вкрапленностью зерен сульфидов (из которых всегда преобладает пирит) к сплошным рудам особенно по простиранию последних, создают впечатление о замещении сланцев рудой. Это впечатление усиливается тем, что зерна пирита имеют нередко четкие внешние очертания и, кроме того, трещины, пересекающие сланцы под разными углами, бываю выполняны пиритом или другими рудными минералами. Микроскопические исследования с применением структурного травления образцов из сланцев и из переходных участков к сплошной руде не оставляют сомнений в существовании явлений. Идиоморфные зерна пирита действительно бываю более поздними, нежели серицит. В них наблюдаются пойкилитовые включения последнего и других минералов, окружающих их. Однако эти зерна пирита не имеют отношения к процессу рудоотложения. Они образовались в результате переотложения пирита, на чем мы подробно останавливались выше. Наряду с такими зернами есть зерна пирита же, а их очень много, которые выглядят совсем по иному, а именно: они интенсивно корродированы серицитом, часто раздроблены на удлиненные обломки, реликты зон роста I в них пересекаются упомянутым минералом.

Пирит и сфалерит в трещинах сланцев имеют хорошую сохранность. Если сопоставить в масштабах месторождений количества сфалерита, образовавшегося после серицита, и сфалерита, на который накладывался серицит, то первый случай выглядит редким эпизодом на фоне второго. Зерна сфалерита в трещинах, пересекающих сланец, также не имеют отношения к процессу рудоотложения. Они являются результатом переотложения S и Zn из рудных тел при метаморфизме последних.

Нами потрачено много времени и усилий на то, чтобы в колчеданных месторождениях Урала обнаружить такие же ясные и однозначно истолковываемые признаки замещения рудными минералами серицита, какие приведены в доказательство замещения серицитом сульфидов. Таких признаков обнаружено не было. Возникает немалой важности вопрос — в колчеданных месторождениях Урала серицит весь образовался после руды или он был доруд-

ным и сингенетичным руде? В литературе имеются данные, свидетельствующие о том, что процесс серицитизации в породах, вмещающих колчеданные месторождения, был неодностадийным (Червяковский, 1959<sub>4</sub> и др.). О двух стадиях серицитизации мы также писали (Ярош, 1962).

Если сопоставить такие месторождения как, например, Карабашские и им. III Интернационала, с одной стороны, а Блявинское и Сибайское — с другой, то во всех них серицит есть. В Бляве этого минерала крайне мало, в Сибее больше. Эти месторождения, особенно Блявинское, в наибольшей мере сохранили свой первоначальный облик. Здесь не устанавливается признаков замещения сульфидов серицитом, а включения серицит-хлорит-кварцевой породы в руде встречаются (Кропачев и др., 1968). В Карабаше и на месторождении им. III Интернационала серицита очень много. Он входит в состав не только широко развитых кварцево-серицитовых сланцев, но в значительных количествах примешан к рудам, которые он замещал. Эти два месторождения интенсивно метаморфизованы. Весь облик этих месторождений, их руды иные, нежели в Бляве и Сибее.

Из приведенного сопоставления, а также литературных данных видно, что как в южно-, так и среднеуральских месторождениях несомненно серицит был дорудным; он образовался одновременно с отложением руды. Однако все дело в количествах такого серицита. Его было значительно меньше по сравнению с тем, который образовался после руд при их метаморфизме.

Выше было показано, что серицит претерпевал сложнейшие изменения. Эти изменения затушевывали или совсем изгладили те признаки, по которым можно было более или менее надежно отличать дорудный серицит от пострудного, а следовательно, и точно определять количества первого.

*Наложение на рудные минералы хлоритоида, стильпномелана и других нерудных минералов.* Большой интерес на фоне пространственных взаимоотношений серицита и колчеданной руды представляют такие же взаимоотношения хлоритоида с сульфидами. Первые находки упомянутого минерала в колчеданных месторождениях Урала относятся к тридцатым годам нашего столетия (Домарев, 1931). А. Н. Заварицкий уделял особое внимание таким находкам. Позднее хлоритоид был обнаружен А. А. Филимоновой на Кабане I (Филимонова, 1949) и довольно подробно описан В. П. Логинным (1951). Автором и Ф. П. Буслаевым этот минерал встречен на Зюзельском и одном из Карабашских месторождений (Буслаев, Ярош, 1967), а Ф. П. Буслаевым и О. М. Образцовым описан в Гае (1968). Хлоритоид из Зюзельского месторождения изучен хорошо.

Из литературы известно, что на генезис хлоритоида существует несколько точек зрения (Ищенко, 1957 и др.). Этот минерал может присутствовать как в породах, образовавшихся в результате контактового и регионального метаморфизма, так и в гидро-

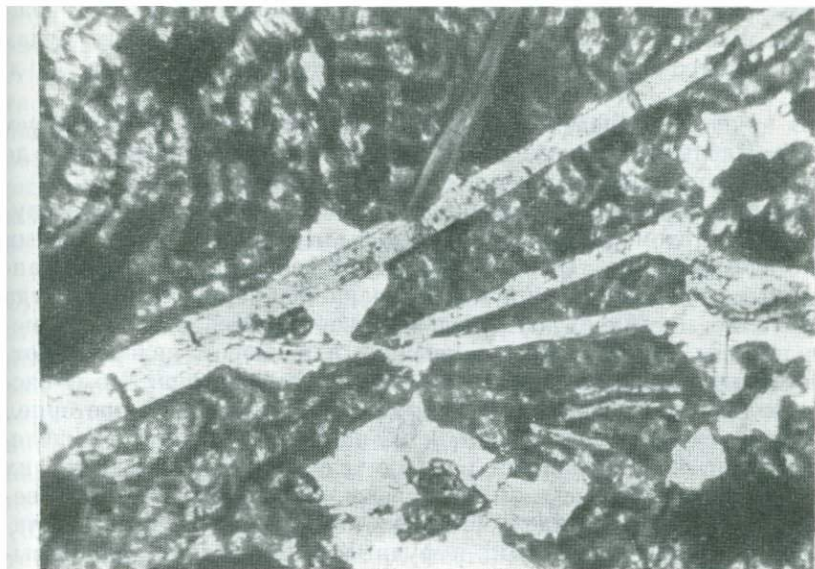
термально измененных породах. В. П. Логинов (1951) считает, что хлоритоид на Кабане I должен считаться первично-гипогенным минералом гидротермально-метасоматического происхождения. Однако не в этом дело. В Зюзельском месторождении, в Карабаше, на Кабане I, в Гае хлоритоид является пострудным минералом, он наложен на колчеданные руды (Буслаев, Ярош, 1967; Буслаев, Образцов, 1968). Его образование тесно связано с метаморфическими изменениями последних и вмещающих пород и примечательно, что исследованиями В. П. Логинова и нашими в минерале устанавливаются значительные примеси натрия. Это так же, как и в случае с серицитом, свидетельствует о щелочном и прежде всего натровом метасоматозе, который имел место при метаморфизме руд и вмещающих пород.

В среднеуральских колчеданных месторождениях встречается стильпноmelан. В. А. Заварицкий (1950) при описании этого минерала на месторождении им. III Интернационала, отнес его образование к актинолит-стильпноmelан-эпидотовой фации метаморфизма. Кроме месторождения им. III Интернационала, этот минерал нами встречен на Чадарском и Зюзельском месторождениях. Наши наблюдения показали, что в рудном поле месторождения им. III Интернационала стильпноmelан накладывался на породы любого состава, уже претерпевшие зеленокаменные изменения и рассланцованные. Этот минерал развивался в равномерно хлоритизированных породах по системе трещин или пятнами, неправильными скоплениями. Отмечены две разновидности окраски стильпноmelана: буро-зеленая и темно-зеленая. Наблюдалось развитие по темно-зеленому стильпноmelану бурой окраски в виде беспорядочных пятен, постепенно захватывающих всю пластинку. Смена окраски минерала, по-видимому, связана с переходом железа из окисной формы (зеленый) в закисную (бурый).

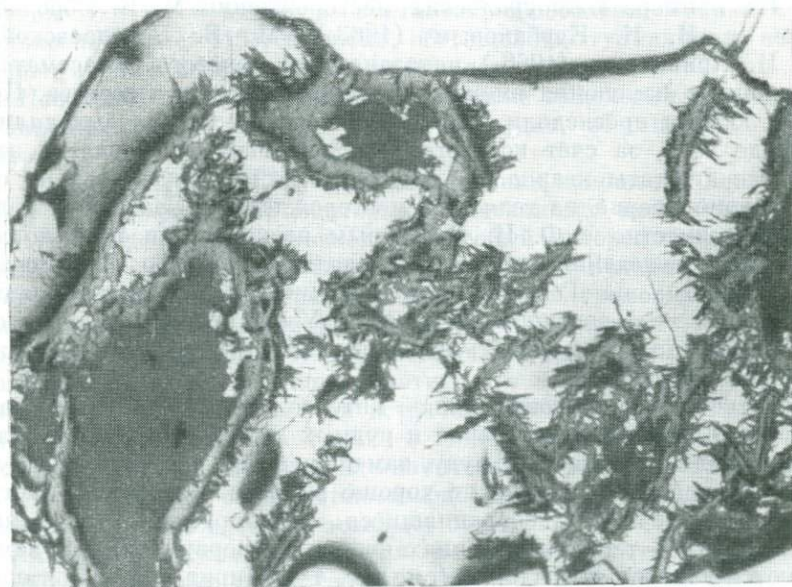
Сростки, пластинки стильпноmelана не подчиняются сланцеватости, они секут ее, в то время как хлорит участвует в кристаллизационной сланцеватости пород. Чешуйки упомянутого минерала строго подчиняются сланцеватости лишь в интенсивно серицитизированных породах. Стильпноmelан замещался кальцитом, кварцем и серицитом.

Стильпноmelан накладывался не только на породы, измененные зеленокаменным метаморфизмом, но и на руды. Это особенно хорошо видно в Чадарском и Зюзельском месторождениях. В первом наблюдается развитие упомянутого минерала в сплошной полосчатой пирит-сфалеритовой руде с включениями альбита (рис. 114). В отдельных участках руды количество стильпноmelана достигает 20% по объему. По нему псевдоморфно развивался поздний (переотложенный) пирит.

В таких месторождениях, как Тарньерское, Маукское, им. 50 лет Октября и ряде других, на руды накладывались биотит, актинолит и другие нерудные минералы. Наложение акти-



114. Наложение стибномелана (серые пластинки) на сфалерит (основной фон). Белое — альбит. Месторождение Чадарское. Проходящий свет, без анализатора, увел. 60



115. Замещение халькопирита (основной светлый фон) магнетитом (серое) и биотитом (черные чешуйки); белое (рельефные зерна) — пирит, черное (сплошное) — кварц. Месторождение им. 50 лет Октября. Отраженный свет, увел. 94

полита на руду отмечено уже давно в Белореченском месторождении. Выделение указанных минералов в колчеданных рудах чаще приурочено к трещинам, ослабленным зонам и т. д. (рис. 115).

В рудах колчеданных месторождений Урала присутствует кварц. Наблюдения показывают, что этот минерал выделялся до отложения руды, во время и после ее отложения.

Рудные минералы замещались кварцем, причем, как и в случае с серицитом, такие замещения были часто избирательными и псевдоморфными. Однако следует оговориться, что пространственные взаимоотношения между кварцем и серицитом не всегда ясны, и во многих случаях нельзя говорить уверенно о замещении первым того или иного сульфида и наоборот, нельзя усмотреть явных признаков замещения сульфидами кварца. Это объясняется тем, что кварц вместе с рудными минералами претерпел не менее сложные изменения, чем, например, серицит. Выделения кварца в колчеданных рудных телах и во вмещающих их породах морфологически многообразны. Этот минерал, как известно, встречается в виде зернистых агрегатов в тесных сростаниях с другими нерудными и рудными минералами, часто выполняет трещинки и пустотки в рудах и породах. В Карабаше и других месторождениях на стенках трещин, пересекающих рудные тела, нередко обнаруживаются друзы мелких и крупных кристаллов кварца. В сплошных рудах под микроскопом иногда видны типичные метакристаллы этого минерала.

На примере южноуральских месторождений М. Б. Бородаевской и Н. К. Курбановым (1963<sub>2</sub>), М. Б. Бородаевской и А. И. Кривцовым (1966<sub>4</sub>) показана роль гелевого метасоматоза в процессе изменения вмещающих пород основного состава. При этом авторы проследили, как большие массы кварца выделялись в виде геля, за счет которого в дальнейшем образовались зернистые агрегаты кварца. Д. А. Долгов (1959) указывает на образование кварца из геля и в месторождениях Среднего Урала. Нами совместно с Ф. П. Буслаевым раскристаллизация колломорфных выделений кварца наблюдалась в сильно окварцеванных породах на Гайском месторождении. Перекристаллизация кварца в месторождениях Среднего Урала — явление обычное. При описании замещений сфалерита пиритом на этом мы уже останавливались.

В свете изложенного большой интерес представляют пространственные соотношения кварца и рудных минералов. Кварц, наложенный на колчеданную руду, замещал в ней избирательно рудные минералы. Это особенно хорошо видно в тех случаях, когда в руде встречаются сохранившиеся колломорфные выделения сульфидов. В таких выделениях кварцем в первую очередь замещаются галенит и сфалерит (см. рис. 44). Пирит при этом также замещается, но частично. Вследствие этого в кварце сохраняются реликты колломорфной структуры (рис. 45). Если не проследить

всех деталей избирательного замещения кварцем сульфидов в упомянутых выделениях, то при наблюдении в отдельных участках рудных тел четких реликтов колломорфных структур пирита в кварце создается ложное впечатление о совместном выделении обоих минералов. В таких случаях трудно бывает даже предположить, что на месте реликтов колломорфных выделений пирита и эпигенетического к этим реликтам кварца (см. рис. 45) когда-то находились очень четкие, тонкоритмичные и сложные по составу колломорфные выделения сульфидов.

В рудах и вмещающих породах колчеданных месторождений Среднего Урала встречается турмалин. Е. К. Лазаренко (1947) отмечает этот минерал в Кузнечихе и считает, что относительно пирита и сфалерита он более ранний. Еще раньше А. А. Амрасланов (1937) указывал на присутствие турмалина в карабашских месторождениях. В Карабаше обильные выделения указанного минерала (друзы мелких кристалликов) были обнаружены нами на стенках пустоток и трещин в кварцево-серицитовом сланце в непосредственной близости от контакта с рудными телами (Южное месторождение, горизонт 320 м). В борнит-теннантитовой жиле быв. Дзержинского месторождения турмалин присутствует в руде, представленной борнитом, халькозином, сфалеритом и другими сульфидами. Взаимоотношения турмалина с рудными минералами не оставляют сомнения в его более позднем образовании относительно руд. Скопления мелких зерен указанного минерала приурочены к халькозину, который псевдоморфно развивается по борниту, к контактам обособлений борнита и халькозина (рис. 116). Полоски, обогащенные турмалином, пересекают зерна и агрегаты зерен сульфидов.

Необходимо подчеркнуть, что заметные выделения турмалина обнаруживаются главным образом в рудах, обогащенных борнитом.

Л. И. Яковлев (1959), описывая явления наложения контактового метаморфизма в некоторых колчеданных месторождениях Среднего Урала, подчеркивает, что особый интерес представляет факт наложения на серноколчеданную руду в Белореченском месторождении таких минералов, как актинолит, тремолит, амфибол-асбест, магнетит и пирротин. Руды упомянутого месторождения нами также изучались. Не останавливаясь на других минералах, наложенных на руду, лишь отметим, что в рудах других месторождений амфибол-асбест не встречен. Этот минерал обнаружен нами при геологической съемке в Полевском районе вблизи Зюзельского месторождения и на значительных расстояниях от него.

Более позднее образование амфибол-асбеста в рудах Белореченского месторождения настолько очевидно, что не требуется и микроскопических наблюдений. Во многих участках этого месторождения в сплошной серноколчеданной руде четко выражена сланцеватая текстура. Скопления волокон амфибол-асбеста длиной в несколько сантиметров располагаются вдоль сланцеватости



116. Наложение турмалина (черные продолговатые зерна) на медноколчеданную руду. Борнит-теннантитовая жила (Карабаш). Отраженный свет, увел. 100

Серое (основной фон) — борнит; светло-серое — халькозин; 1 — станнин; 2 — люцонит

руды и часто приурочены к трещинам, пересекающим сланцеватость в руде под углами  $15-45^\circ$ .

Изложенные выше результаты наших исследований и данные, содержащиеся в литературных источниках (Яковлев, 1959 и др.), свидетельствуют о широких масштабах метасоматических замещений в колчеданных месторождениях Урала. Замещения одних минералов другими были избирательными и часто псевдоморфными (возникали и псевдоморфозы по псевдоморфозам). Они проявлялись сложно и в течение длительного времени, сопровождаясь переотложением и перераспределением вещества, при этом происходила и перекристаллизация больших объемов рудных масс.

Замещения пирита пирротинном, магнетитом, халькопирита борнитом, борнита халькозином, пирротина магнетитом и другие сопровождалась высвобождением серы. При замещениях пирротинном и магнетитом халькопирита, пиритом и магнетитом сфалерита высвобождались медь, цинк, кадмий и другие элементы. Естественно, что эти элементы, а также сера попадали в раствор. В раствор переходили большие количества серы, железа, меди и других элементов при замещениях рудных минералов нерудными. Растворы не могли оставаться на одном месте. Они перемещались в пределах рудных тел, в боковые породы и выходили далеко за пределы рудных тел.

В рудных телах из растворов выделялись новообразования пирита, сфалерита и других сульфидов. Такие новообразования выполняли пустотки, трещины в руде и отлагались в ослабленных участках последней. За счет новообразований продолжали расти, например, зерна пирита.

Между элементами, находившимися в растворе, и сульфидами, слагающими руды, происходили обменные реакции, в результате которых осуществлялись новые замещения в минеральных агрегатах. Это наглядно подтверждается наблюдаемыми замещениями сфалерита пиритом, пирита сфалеритом и т. д.

Из растворов выделялись сульфиды и в боковых породах. Понятно при этом, что в зернах переотложенных сульфидов, если они не выделялись в трещинах и пустотах, должны быть пойкилитовые включения тех нерудных минералов, которые входят в состав боковых пород. На примере пирита это хорошо подтверждается, и об этом уже было сказано выше.

В тех участках рудных тел, где пирит, халькопирит и сфалерит замещались магнетитом, часть железа окислялась до трехвалентного. В этих участках сера также окислялась и давала сульфатные анионы, миграционная способность которых значительно выше, нежели у сульфидной серы. Сульфатные анионы, мигрируя в растворах в пределах рудных тел и боковых пород и встречаясь с катионами кальция, давали новообразования ангидрита. Выделения последнего нами давно описаны в Карабаше (Ярош, 1950), В. Г. Максеновым и К. Ф. Лисовым (1953) в месторождениях Красноуральского района. В Зюзельском месторождении, где на нижних горизонтах происходило псевдоморфное замещение серного колчедана магнетитом по всей мощности рудных тел, обильные выделения крупнозернистого ангидрита приурочены к трещинам, пересекающим кварцево-серицитовые сланцы с очень густой вкрапленностью мелких зерен пирита (Ярош, 1964<sub>1</sub>). В указанном месторождении серицит в широких масштабах развивался по пириту.

Упомянутые выше выделения ангидрита, так же как и выделения этого минерала в рудах Карабаша, месторождений Красноуральского района и других, едва ли правомерно связывать с последней стадией рудного процесса, как это делает Ю. М. Столяров (1965). В колчеданных месторождениях Урала, несомненно, есть первичный ангидрит, однако приведенные выше соображения и факты свидетельствуют о том, что этот минерал в среднеуральских месторождениях мог образоваться вне связи с рудным процессом, а вследствие метаморфических преобразований руд.

Физико-химические условия, при которых происходили метаморфические изменения в колчеданных месторождениях, были иными, нежели условия отложения первичных руд. На примере южно-уральских месторождений видно, что рудоносные растворы были пересыщенными и из них выпадали тонкодисперсные смеси сульфидов. Факты, подтверждающие это, нередки и в рудах сред-

неуральских месторождений. При метаморфизме, когда рудные и нерудные минералы в месторождениях, стремясь приспособиться к новым условиям, растворялись, то в растворе не могли образоваться такие же высокие концентрации элементов, как в рудоносных растворах, хотя для отдельных локальных участков это не исключено. Разные минералы по-разному реагировали на смену условий, и это наглядно подтверждается избирательным замещением рудных минералов нерудными. Если, например, сфалерит, находясь в тесных сростаниях с пиритом, замещался серицитом раньше последнего, то он раньше попадал и в раствор, из которого выделялся раньше пирита (переотложенного) в рудных телах или в боковых породах, где он образовал зерна, достигающие нескольких миллиметров в поперечнике. Пирит замещался нерудными минералами в последнюю очередь. Отсюда понятно, что более поздние выделения этого минерала накладывались на переотложенный сфалерит и замещали последний. Таким образом, при метаморфизме специфика физико-химических условий в месторождениях была такова, что обуславливала дифференциацию и перераспределение вещества.

При описании метаморфических изменений пирита отмечалось, что, будучи переотложенным, этот минерал (Зюзельское месторождение) в сравнении с непереотложенным содержит кобальта в три с лишним раза больше, а селена и теллура в 7—8 раз меньше. Эти данные свидетельствуют о том, что при замещении и переотложении минералов входящие в их состав химические элементы дифференцировались. Часть элементов накапливалась в зернах переотложенных минералов, а часть продолжала оставаться в растворе. Вследствие дифференциации в растворе скапливались в относительно повышенных концентрациях элементы, которые являлись малыми примесями к сульфидам и поэтому не могли дать самостоятельных минеральных образований. В результате из растворов в рудных телах и реже в боковых породах выпадали такие образования, как алтаит и другие редкие минералы, являющиеся в большинстве случаев эпигенетическими к основным рудным минералам и особенно к пириту. Вследствие дифференциации химических элементов создавались условия для образования и такого редкого минерала, как гринокит. Мелкие зерна этого минерала впервые на Урале описаны С. Н. Ивановым в рудах Сибая (1947). Указанные зерна гринокита были приурочены к пустоткам в руде.

Метасоматические замещения широких масштабов в рудах колчеданных месторождений Урала имеют большой теоретический и практический смысл. Замещения пирротинном и магнетитом пирита, халькопирита и сфалерита, а нерудными минералами этих же сульфидов и, кроме того, пирротина, борнита, теннантита и галенита отрицательно сказались на содержаниях ряда ценных компонентов в колчеданных рудах, т. е. указанные замещения обедняли, например, медью рудные тела. С другой стороны, метасо-

матические замещения, вызванные метаморфизмом, обуславливали в отдельных рудных телах или участках последних высокие концентрации той же меди, золота и других элементов. Примером этому являются борнитовые руды, где халькопирит замещился борнитом, в котором, как известно, содержание меди почти в два раза больше, нежели в халькопирите. В этих же рудах борнит замещался халькозином, т. е. минералом с еще более высокими содержаниями указанного элемента. Иными словами, в одних случаях колчеданные рудные тела обеднялись, а в других обогащались медью и другими элементами. Однако следует заметить, что в месторождениях, в которых много пирротина и магнетита или одного из них, борнита не бывает или если он и встречается, то в очень ограниченных количествах.

#### ОБРАЗОВАНИЕ В РУДАХ ЛИНЕЙНЫХ СТРУКТУР И ПОЛОСЧАТЫХ ТЕКСТУР

Чтобы закончить рассмотрение фактов, свидетельствующих о том, что колчеданные месторождения на Урале после своего образования претерпевали не только диагенетические, но и метаморфические изменения, необходимо в дополнение к уже приведенным данным остановиться на линейных структурах и уделить внимание полосчатым текстурам.

Линейные структуры горных пород, являясь результатом пластического течения, обусловленного складчатостью в подвижных поясах, в том числе и на Урале, распространены широко. Этим структурам, их генетическому анализу посвящена обширная литература. Линейные структуры в породах выступают как один из важнейших факторов, который показывает направления пластических течений в региональном масштабе, что показано П. Ф. Иванкиным (1957) для Прииртышья, а А. Д. Рафчевым (1962) для Урала. Указанные структуры имеют такое же значение и для колчеданных руд. На месторождениях Зюзельском, им. III Интернационала и других линейные структуры встречаются как в рудах, так и во вмещающих породах и ориентировка их в обоих случаях совпадает. Сам по себе этот факт, безусловно, важен, однако более значителен и интересен вопрос: как объяснить указанный факт, или, иными словами, линейные структуры в колчеданных рудных телах и вмещающих их породах возникли одновременно, или в первых они являются более поздними, нежели во вторых, т. е. унаследованными? Ответ на поставленный вопрос следует искать в самих рудах, а точнее в механизме образования полосчатых текстур этих руд, так как полосчатые текстуры являются плоскостными образованиями и в них, так же как и в сланцах (на плоскостях), видна линейность — ориентированные направления скользящих дифференциальных движений, влияющих на ориентировку минералов.

Текстурам и структурам руд и, в частности, колчеданных месторождений посвящены капитальные работы (Бетехтин и др., 1958 и др.) и многочисленные статьи (Шадлун, 1942, 1950<sub>1</sub>; Петровская, 1963 и др.). При описании диагенетических изменений руд в Блявинском и других южноуральских месторождениях, а также при характеристике признаков метаморфизма, проявленных в пирите и других минералах, мы также неоднократно останавливались на текстурах и структурах колчеданных руд. В частности, нами показано, как возникали брекчиевые, брекчиевидные и гнейсовидные текстуры, сложные пространственные соотношения между минералами, обусловленные распадом тонких смесей и процессами замещений и т. д. Повторять в каком-либо варианте уже известные данные из литературы и изложенные выше сведения нецелесообразно. Сейчас следует остановиться лишь на полосчатых текстурах, так как генезис таких текстур имеет прямое отношение к целям наших исследований.

Происхождение полосчатых текстур в рудах уральских колчеданных месторождений многие годы вызывает дискуссии среди исследователей и это понятно, так как в таких текстурах скрыты ответы на ряд важных вопросов, прямо касающихся генезиса и последующих изменений самих месторождений.

Из литературы известно, что одинаковые текстуры в различных рудах могут быть обусловлены разными причинами (Бетехтин, 1937; Шахов, 1961 и др.). Применительно к колчеданным рудам это же отмечено А. Д. Ракчевым (1956), Н. В. Петровской (1963, 1964) и другими исследователями.

Мнения геологов на происхождение только что упомянутых текстур в колчеданных рудах сводятся к следующему:

1. А. В. Стикней (Stikney, 1915), Е. Е. Захаров и С. А. Юшко (1936), Л. Афанасьев и М. Исаенко (1936), С. Н. Иванов (1957, 1959<sub>2</sub>), А. Д. Ракчев (1956), Н. В. Петровская (1959, 1963, 1964), М. Б. Бородаевская (1959), Г. Ф. Червяковский (1952, 1962) и другие считают, что полосчатые текстуры являются унаследованными при замещении рудой слоистых вулканогенно-осадочных и рассланцованных пород.

2. Д. П. Григорьев (1948), Е. К. Лазаренко (1947) допускают возникновение таких текстур в результате наложения медно-цинкового оруденения на ранее существовавшие и рассланцованные серноколчеданные рудные тела.

3. И. В. Ленных (1959) рассматривает полосчатые текстуры в колчеданных рудах как результат одновременного образования пород и руд.

4. А. Н. Заварицкий (1943<sub>3</sub>), С. Н. Иванов (1945), Т. Н. Шадлун (1950<sub>1</sub>), Г. Н. Пшеничный и Т. Н. Шадлун (1962), В. А. Заварицкий (1950) и другие полосчатость в рудах рассматривают как образование, обусловленное более поздним, нежели процесс рудоотложения метаморфизмом.

Из приведенного видно, что среди исследователей нет единого

мнения по одному из узловых вопросов в происхождении колчеданных руд.

Устанавливая признаки диагенетических изменений тонкодисперсных выделений сульфидов в южноуральских месторождениях, а также выясняя масштабы и особенности метаморфизма колчеданных руд в целом на Урале, естественно, мы не могли оставить без внимания и полосчатые текстуры. Свои наблюдения мы проводили годами, стремясь выяснить особенности проявления полосчатости не только в отдельных участках руды, вскрытых в разное время забоями рудников, но и в масштабах отдельных рудных тел и месторождений. Данные других исследователей и наши наблюдения показывают, что полосчатые текстуры в колчеданных рудах среднеуральских месторождений в отдельно взятых рудных телах проявлены не везде одинаково. Это наблюдается и в Гае, что раньше нас отмечено Н. В. Петровской. Полосчатость наблюдается прежде всего в тех рудных телах или участках рудных тел, которые обогащены сфалеритом и халькопиритом, а также теннантитом и галенитом. Наиболее четко она всегда проявлена в пережимах, в приконтактных частях рудных тел и на выклинивании последних, когда их мощность становится незначительной. Если мощности рудных тел значительны, то весьма четкая полосчатость от их приконтактных частей в направлении к центральным частям становится плохо заметной или незаметной совсем (Карабаш им. III Интернационала и другие месторождения).

Как правило, полосчатость повторяет контакты рудных тел вне зависимости от прямолинейности таких контактов или весьма сложных их изгибов. Даже в тех случаях, когда сланцеватость вмещающих пород ориентирована под прямым углом (или близко к этому) к контактам рудных тел, полосчатость параллельна контактам последних. Г. Ф. Червяковский, посвятивший несколько лет изучению полосчатых и борнитсодержащих руд месторождения им. III Интернационала, приводит очень интересные факты. По данным этого исследователя, рудная линза № 14 на горизонте 230 м почти под прямым углом пересечена дайкой диоритового порфирита. Дайка рассланцована, и рассланцевание в ней совпадает с общим рассланцеванием вмещающих пород. Около контакта с дайкой в руде видна полосчатость, которая повторяет все изгибы контакта руды и дайки и ориентирована в общем в широтном направлении, т. е. перпендикулярно сланцеватости (Червяковский, 1953).

В рудных телах Карабашской группы месторождений, на месторождении им. III Интернационала и других полосчатость нередко образует мелкие складки, флексуры и сложные завихрения при ровных контактах рудных тел. Наблюдается обтекание полосчатостью массивных существенно пиритовых блоков (см. рис. 10).

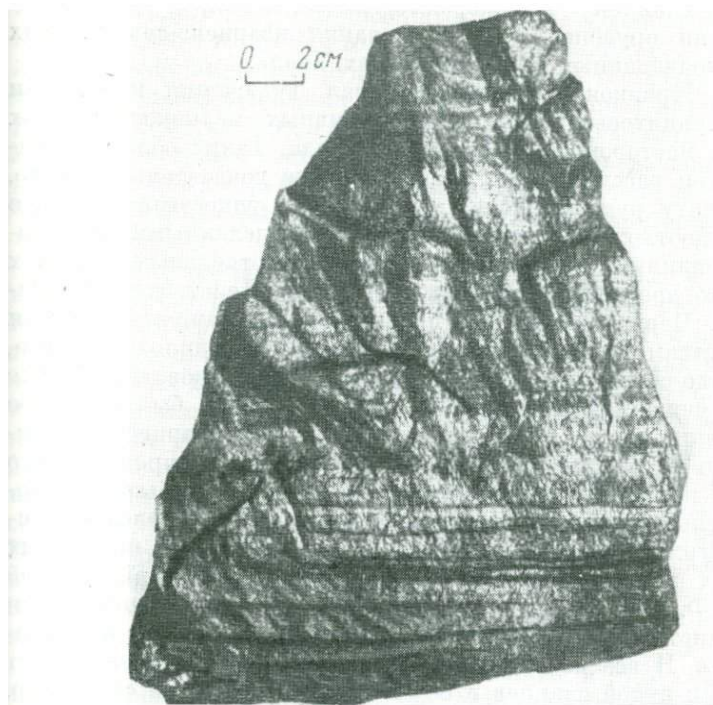
Представление о характере полосчатой текстуры в колчедан-

ной руде дают рис. 117, 118, однако это только характерные примеры. Отдельные полоски, обогащенные главным образом сфалеритом или халькопиритом или обоими этими минералами, могут иметь ширину от 1—3 мм до 10—30 см. Такие полоски особенно в приконтактных частях рудных тел имеют очень четкие границы и, не изменяясь по ширине, прослеживаются на многие метры в забоях рудников.

В большинстве случаев рудные тела залегают на контактах основных эффузивов и кислых пород (кварцевые альбитофиры). В непосредственной близости с рудными телами эти породы очень часто (Средний Урал) превращены в различные сланцы. Изучение многочисленных забоев рудников на месторождении им. III Интернационала, в Красноуральском и Кировоградском районах, на Зюзельском и в других показывает, что рудные тела с хорошо выраженной полосчатой текстурой значительными своими частями из сланцев выходят в слабо рассланцованные породы. Ни в сланцах, ни в породах, по которым образовались эти сланцы, нет слоистых текстур, хотя бы отдаленно напоминающих текстуры в рудах.

Как могли возникнуть полосчатые текстуры в колчеданных рудах и почему имеют место отмеченные особенности их проявления? Замещение рудой слоистых пород происходило, и это описано С. Н. Ивановым (1959<sub>2</sub>) в Сибире; С. В. Чесноковым и И. А. Буриковой (1968) приведены данные, свидетельствующие об унаследовании рудой флюидалной полосчатости кварцевых альбитофиров в Учалинском месторождении. Однако на фоне широко распространенных в том же Сибире и других южноуральских месторождений брекчиевидных и брекчиевых текстур, полосчатые текстуры, являющиеся унаследованными, представляют незначительный эпизод. Приуроченность наиболее четкой полосчатости к приконтактным частям рудных тел вне зависимости от характера контактов последних, несовпадение пространственной ориентировки полосчатости в руде и плоскостей сланцеватости в сланцах (а это нередкое явление в среднеуральских месторождениях) и особенно в дайках нельзя объяснить, если считать, что полосчатость в руде является унаследованной при замещении уже рассланцованных пород (т. е. сланцев). Можно допустить, что колчеданные рудные тела, имеющие сложную морфологию и резкие контакты с вмещающими породами, являются псевдоморфозами по блокам или участкам слоистых пород. Однако в таком случае надо опять допускать или предполагать, что слоистость в таких блоках или участках по каким-то неизвестным причинам была хорошо выражена только в их краевых частях, и не понятно, почему она появилась в контактах блоков с дайками, которые несомненно эпигенетичны к самим блокам. Подтвердить указанные допущения или предположения какими-либо фактами невозможно.

Вопрос об унаследовании колчеданной рудой текстуры заме-



117. Полосчатая текстура медноколчеданной руды. Месторождение им. III Интернационала



118. Сложный рисунок, образуемый полосчатостью в медноколчеданной руде. Месторождение им. III Интернационала.  $\frac{1}{2}$  натур. вел.

ценных ею сланцев — это же, естественно, и вопрос относительного времени оруденения и образования кварцево-серицитовых сланцев в колчеданных месторождениях Урала.

Г. Ф. Червяковский (1959<sub>2</sub>) описал включения и обломки кварцево-серицитовых сланцев в массивных медноколчеданных рудах ряда месторождений Среднего Урала. Такие обломки указанный автор рассматривает «... как веские доказательства того, что к моменту рудоотложения сланцы уже существовали и что процесс рудоотложения сопровождался определенными тектоническими усилиями, в результате которых в отдельных участках происходило дробление сланцев» (стр. 179). Действительно данные Г. Ф. Червяковского на первый взгляд кажутся вескими доказательствами того, что рудоотложение происходило после того, как кварцево-серицитовые сланцы уже существовали. Однако нельзя не считать и с другими фактами. Если бы первичное рудоотложение имело место после образования кварцево-серицитовых сланцев, то логично было бы ожидать, что прежде всего в обломках последних, включенных в руду, должны быть признаки, свидетельствующие о замещении рудными минералами серицита и других нерудных минералов. Таких признаков при самых тщательных исследованиях не обнаруживается. В приведенной работе Г. Ф. Червяковский довольно подробно останавливается на пространственных соотношениях рудных минералов и обломков сланцев. И все же описанные им факты не свидетельствуют о замещении рудой сланцев и об этом не упоминает и сам автор. Нет оснований думать, что это случайность.

Несовпадение контактов рудных тел с плоскостями сланцеватости вмещающих сланцев и изолированные обломки таких сланцев в руде следует оценивать при учете многочисленных данных, раскрывающих целую цепь сложных явлений, обусловленных метаморфизмом месторождений. Неоспоримые свидетельства интенсивных хрупких и пластических деформаций в рудных минералах (см. рис. 52, 55, 63, 69, 76, 77 и др.), совпадение ориентировки линейных структур в рудах и вмещающих породах, широкие масштабы замещений рудных минералов (в том числе колломорфных выделений и переотложенных зерен) нерудными минералами и прежде всего серицитом (рис. 108, 109 и др.), замещение последним стильпномелана, ранее наложенного на руды, неоднократная перекристаллизация рудных агрегатов с переотложением вещества показывают, что те факты, которые кажутся вескими для того, чтобы говорить о более позднем оруденении относительно кварцево-серицитовых сланцев, имеют иной смысл. Кварцево-серицитовые и серицитовые сланцы образовались при метаморфизме уже существовавших месторождений (речь не идет о гидротермально измененных породах, в которых, безусловно, был серицит и которые возникли до отложения и во время отложения руд). Колчеданные рудные тела на Среднем Урале подвергались сильным динамическим воздействиям, причем давление, которое

они испытали, было направленным. Руды, особенно обогащенные халькопиритом и сфалеритом, в таких условиях текли. Об этом свидетельствуют пиритные руды с гнейсовидной текстурой, обтекание блоков серного колчедана сфалерит-халькопирит-пиритовыми агрегатами (см. рис. 10), следы пластического течения, видимые под ультрафиолетовым светом (см. рис. 76, 77), определенная ориентировка линейных структур в рудных телах, наконец, те деформации в минералах, которые охарактеризованы выше при описании пирита и сфалерита.

Давление сказывалось и на вмещающих породах и на породах, включенных в рудные тела. В породах, так же как и в рудах, происходили хрупкие и пластические деформации, и породы тоже текли. Динамические воздействия как на породы, так и на заключенные в них колчеданные рудные тела продолжались длительное время. При этом рудные минералы претерпевали те изменения, на которых мы уже подробно останавливались. Во вмещающих породах так же протекали не менее сложные изменения и преобразования. Такие породы рассланцовывались, в них появились листовые силикаты. На примере месторождения им. III Интернационала В. А. Заварицким (1950) показан метаморфизм вмещающих пород и превращение таких пород в кварцево-серицитовые сланцы. В породах и рудах возникли линейные структуры, ориентировка которых в обоих случаях совпадает.

При течении руды текли и заключенные в руде породы. В отдельных участках рудных тел, где тектонические напряжения были наиболее сильными, от пород отрывались различной величины куски. Они могли быть и рассланцованными в той или иной степени. В одних случаях такие куски оказались ориентированными согласно с общей линейностью в руде, в других — они собраны в мелкие складочки (и оси таких складочек совпадают с осями складочек в руде и вмещающих породах), в третьих — ориентировка кусков различная.

Если при течении руды от породы отрывались куски, которые часто обтекаются рудой, то при течении породы от руды так же отрывались куски и они обтекаются сланцами. На месторождении им. III Интернационала, в Карабаше и других среднеуральских месторождениях такие явления не менее редки, нежели обрывки сланцев в руде.

Если брать колчеданные рудные тела в целом на Среднем Урале, то, как справедливо выражается Д. С. Коржинский, они «обжимаются и обтекаются сланцеватостью» (1963, стр. 23). Еще раньше не обтекание рудных тел сланцами обратили внимание Е. Е. Захаров и С. А. Юшко (1936) и другие исследователи. Эти факты рассматриваются как доказательство более позднего рассланцевания пород, нежели процесс рудоотложения. С. В. Чесноковым и И. А. Буриковой (1968) показано, что и в Учалинском месторождении рассланцевание наложено на руды и околорудные метасоматиты.

В ряде среднеуральских месторождений и особенно на месторождении им. III Интернационала довольно часто при общем обтекании сланцами рудных тел встречаются участки, где сланцеватость в породах не совпадает с контактами рудных тел. Такое несовпадение обусловлено пострудными передвижениями в породах. При таких передвижениях, направления которых четко зафиксированы в самих сланцах, отдельные блоки последних подворачивались, загибались к рудным телам и скользили по ним.

Генезис полосчатых текстур становится понятным при сопоставлении и учете всей суммы фактического материала, освещающего историю формирования рудных агрегатов в колчеданных месторождениях как Среднего, так и Южного Урала. Выше в деталях показано, как раскристаллизуются тонкодисперсные массы сульфидов и образуются их зернистые агрегаты, как в условиях метаморфизма такие агрегаты приобретают совершенно иной облик. В своих исследованиях мы обратили особое внимание на поведение главных рудных минералов — пирита, сфалерита и халькопирита. Эти минералы, как видно по многочисленным фактам, претерпевали сложные изменения. Они, а также и другие минералы, имеют явные признаки хрупких и пластических деформаций, перекристаллизации и метасоматических замещений. Деформации и перекристаллизация, в том числе и с переотложением рудных минералов, выступают как главные факторы, обусловившие в колчеданных рудах общую линейную ориентировку как отдельных зерен рудных и перудных минералов, так и агрегатов зерен последних. На примере пирита уже было показано, как вследствие деформаций, обусловленных стрессом, в руде появляется гнейсовидная текстура. Для уяснения генезиса полосчатых текстур в рудах, обогащенных сфалеритом и халькопиритом, особо важной является информация по первому минералу. Этот минерал прозрачный или полупрозрачный, а в случае ассоциации с борнитом он светится под ультрафиолетовым светом. Все это позволило в деталях проследить на обширном и представительном материале из месторождений Гайского, им. III Интернационала и многих других, как зарождаются и становятся четко выраженными полосчатые текстуры и линейные структуры в рудах. Рисунки 63, 76, 77, 80 и др. наглядно подтверждают сказанное. Присутствие в рудах листовых спликатов хлорита и особенно серицита, который наложен на руды и избирательно замещал в них сульфиды, также способствовало возникновению линейности в рудных агрегатах. Серицит — минерал, легко поддающийся деформации, играл роль «смазочного» материала, способствовал перемещению по директивным направлениям как отдельных зерен рудных минералов, так и агрегатов таких зерен. Деформации начинали проявляться прежде всего в краевых частях рудных тел и неизбежно сопровождалась перекристаллизацией минералов. Перекристаллизация в рудных агрегатах в условиях направленного давления протекала, таким образом, неравномерно.

Перекристаллизация, как показано Д. П. Григорьевым (1956), сложный процесс преобразования минеральных агрегатов во времени и пространстве. В колчеданных рудах перекристаллизация минералов обуславливала перераспределение вещества, очищение зерен минералов от примесей. Это надежно прослеживается на том же сфалерите, когда агрегаты темноокрашенных зерен этого минерала, будучи грубо продробленными, сцементированы халькопиритом, галенитом и тефантитом или одним из этих минералов, при интенсивной деформации перекристаллизуются, приобретают светлую окраску клейофана, в них за счет примесей железа появляются новообразования пирита, а перечисленные минералы оказываются растворенными и вынесенными из них и переотложенными в других местах. В светлоокрашенном сфалерите, кроме железа, значительно уменьшаются содержания и других элементов — примесей (см. табл. 2).

В результате перекристаллизации с переотложением и дифференциацией вещества отдельные вытянутые участки (полоски и струйки) в рудных телах оказались обогащенными одним или двумя минералами. Полосчатая текстура, таким образом, приобрела четкость своего рисунка в тех частях рудных тел, которые подверглись наиболее интенсивным воздействиям направленного давления.

Полосчатые текстуры в рудах колчеданных месторождений имеют и иное происхождение и об этом уже говорилось. Кроме полосчатых текстур, являющихся унаследованными, в том же Сибее и других южноуральских месторождениях наблюдается четкая, но своеобразная полосчатость в рудных агрегатах, которая является результатом последнего выделения сульфидов в контракционных трещинах, возникших при уменьшении объема раскристаллизовавшихся гелеподобных рудных масс или избирательного метасоматического замещения тектонически продробленных пород. Однако такая полосчатость резко отличается от полосчатости, обусловленной метаморфизмом руд. Во-первых, отдельные полоски в указанных случаях непрямолинейны и не прослеживаются на значительные расстояния в руде. Во-вторых, полоски имеют строго закономерное строение, отображающее последовательность выполнения сульфидными трещин или замещения отдельных обломков пород. В третьих, сфалерит в полосках не подвергался тем изменениям, которые подробно охарактеризованы выше. Этот минерал представлен здесь очень часто колломорфно-крустификационными выделениями (Ярош, 1965<sub>1</sub>) и содержит эмульсионные включения халькопирита — результат распада твердого раствора.

Таким образом, из приведенного материала видно, что полосчатые текстуры в рудах колчеданных месторождений Урала имеют различный генезис и в связи с этим различный и их рисунок. Полосчатые текстуры, являющиеся унаследованными при замещении рудой слоистых пород или пород с флюидальной полосчатостью, распространены незначительно. Четкие полосчатые текстуры

в Сибире и других месторождениях Южного Урала, являющиеся отображением последовательности формирования колломорфно-крупстификационных выделений сульфидов, распространены значительно шире. В прошлом такие текстуры несомненно были характерными и для руд месторождений Среднего Урала.

Полосчатые текстуры, возникшие вследствие метаморфизма, распространены в колчеданных рудах, особенно на Среднем Урале, наиболее широко. Особенности проявления таких текстур в рудных телах месторождений, наличие в рудах линейных структур и совпадение их ориентировки с ориентировкой таких же структур во вмещающих породах, признаки глубоких изменений рудных минералов, слагающих отдельные полосы в рудах, являются прямыми свидетельствами тех больших и сложных изменений, которым подверглись колчеданные месторождения в течение длительного геологического времени после своего образования.

Сопоставления фактических данных, свидетельствующих об изменении как отдельных минералов, слагающих колчеданные руды, так и рудных агрегатов, показывают, что условия, при которых происходило преобразование тех или иных месторождений, были различными. Кроме того, руды претерпевали различного рода изменения неодновременно. Вследствие этого в рудных агрегатах в одних случаях конечные результаты метаморфических изменений значительно или резко отличаются от таких же результатов в других случаях.

Обобщая весь объем фактического материала, приведенного выше, можно сказать, что руды колчеданных месторождений на Урале и особенно на Среднем Урале, после того, как они были отложены и претерпели соответствующие преобразования при диагенезе, в течение длительного геологического времени подвергались вместе с вмещающими их породами метаморфизму и были радикально изменены. Суть таких изменений состоит в следующем.

1. Под воздействием направленного давления в агрегатах рудных минералов и во вмещающих породах проявлялись хрупкие и пластические деформации. В обоих случаях отмечаются пластические течения. Деформации и пластические течения в рудах продолжались длительное время. Они начались до привноса в руды радиоактивных элементов растворами, вероятнее всего, связанных с гранитными интрузиями нормального ряда, и продолжались после привноса указанных элементов. Альфа-излучение радиоактивных элементов обусловило в пирите, сфалерите и других минералах дворики и фотолюминесценцию второго. Деформации уничтожали дворики и явились одной из причин смены цветов свечения сфалерита под ультрафиолетовым светом.

2. Вследствие деформаций и химически активных процессов в условиях повышенных температур в рудах в широких масштабах происходила перекристаллизация и метасоматические часто псевдоморфные замещения рудных минералов рудными же минералами и рудных нерудными.

3. При метасоматических замещениях одних минералов другими в раствор переходили большие количества серы и других элементов. Создавались условия для дифференциаций и перемещения этих элементов как в локальных участках колчеданных рудных тел, так и во всем их объеме, а также во вмещающие породы. В одних случаях рудные тела в целом или их отдельные участки обеднялись ценными компонентами, например, медью, а в других — обогащались.

4. Под воздействием факторов метаморфизма колчеданные руды изменили свой облик, который они приобрели при диагенезе. В них полностью или почти полностью исчезли прежние текстуры и структуры, во многих случаях изменился минеральный состав, стали иными пространственные соотношения между минералами, увеличился размер их зерен. В рудах появились линейные структуры, ориентировка которых совпадает с ориентировкой таких же структур во вмещающих породах. Иными словами, метаморфизованные руды стали непохожими на неметаморфизованные так же, как непохожа рыхлая осадочная порода на сланец, образовавшийся по этой породе.

## IV.

### ТИПЫ МЕТАМОРФИЗМА, ПРОЯВЛЕННОГО В КОЛЧЕДАНЫХ РУДАХ

#### ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Чтобы стали понятными причинные взаимосвязи различного характера изменений в колчеданных рудах, необходимо, насколько это позволяет имеющийся в нашем распоряжении фактический материал, а также литературные данные, рассмотреть вопрос, — когда и какой тип метаморфизма проявлялся в колчеданных месторождениях.

Выше приведен большой объем фактического материала, свидетельствующего о том, что колчеданные месторождения на Урале после своего образования в каждом конкретном случае претерпели различной интенсивности метаморфические изменения, а такие объекты на Южном Урале, как Блява, Комсомольское и другие месторождения, сохранили в наибольшей степени свой первоначальный облик. Все вместе взятые месторождения, как это следует из приведенных выше литературных источников, образовались неодновременно, однако просуществовали они длительный период геологического времени, и очень важно знать, когда, на каких стадиях развития уральской геосинклинали и в силу каких конкретных причин эти месторождения подверглись тем или иным изменениям. Работами С. Н. Иванова (1964<sub>1</sub>), С. Н. Иванова и В. М. Нечеухина (1964), Г. Ф. Яковлева (1968), М. Б. Бородаевской и А. Д. Ракчеева (1968) показано, что колчеданное рудообразование происходило после того, как вулканогенно-осадочные толщи в трогах геосинклинали претерпели определенное зеленокаменное перерождение, и что оруденение продолжалось и при метаморфизме таких толщ, в доорогенную стадию развития Урала. Следовательно, сейчас, как справедливо отмечают М. Б. Бородаевская и А. Д. Ракчеев (1968), нельзя упрощенно и в общем решать вопрос: метаморфизм пород был только дорудным или послерудным.

Более 30 лет проблема метаморфизма колчеданных месторождений и вмещающих их пород не только на Урале, но и в других провинциях Союза, привлекает внимание геологов и вызывает дискуссии. Это свидетельствует о сложности проблемы и тех больших трудностях, с которыми сталкиваются исследователи при ее разработке. Учитывая сказанное, мы проводили свои исследования таким образом, чтобы получить новую информацию, которая бы последовательно и в деталях раскрывала всю совокупность изменений в колчеданных рудах, обусловленных диагенезом и метаморфизмом.

Литературные данные, освещающие не только колчеданные месторождения, но и историю геологического развития уральской геосинклинальной области в целом, а также результаты наших исследований позволяют с рядом допущений и предположений говорить о следующем ходе событий в жизни колчеданных месторождений на Урале.

Благодаря работам А. Н. Заварицкого и последующим теоретическим разработкам В. И. Смирнова, С. Н. Иванова, М. Б. Бородаевской, Г. Ф. Яковлева и других исследователей сейчас стало общепризнанным, что колчеданное рудообразование генетически связано с теми магматическими очагами, которые явились источниками вулканогенных образований, накопившихся в трогах уральской геосинклинальной области на ранней стадии ее развития. Однако ранняя стадия развития указанной области была весьма длительной и колчеданные месторождения образовались в конце вулканических циклов, которых было несколько. Месторождения, связанные с первым вулканическим циклом и залегающие в нижних частях разрезов вулканогенных толщ, подвергались метаморфизующему воздействию тех растворов и эманаций, с которыми связано отложение более молодых колчеданных руд в верхних этажах разреза вулканогенных и вулканогенно-осадочных толщ. В связи с этим на более древние колчеданные рудные тела накладывалась рудная минерализация, качественно отличающаяся от той, которая была присуща таким телам. Кроме того, в раннее образование рудных агрегатов: метасоматические замещения, перекристаллизация и т. д. Повторным изменениям подвергались и вмещающие породы, а также геохимические ореолы около рудных тел.

Указанные изменения в колчеданных рудах, а также во вмещающих породах в настоящее время практически трудно или невозможно распознать и выделить их отличительные признаки, так как в большинстве месторождений рудные тела подверглись последующим более интенсивным изменениям.

Совокупность всех признаков, свидетельствующих об изменениях в колчеданных рудах после их преобразований при диагенезе, дает возможность говорить о том, что колчеданные месторождения на Урале вместе с вмещающими их породами подверглись контактовому и региональному метаморфизму.

#### КОНТАКТОВЫЙ МЕТАМОРФИЗМ, СВЯЗАННЫЙ СО СРЕДНЕПАЛЕОЗОЙСКИМИ ГРАНИТОИДНЫМИ ИНТРУЗИЯМИ ГАББРОВОГО РЯДА

Ранняя стадия развития уральской геосинклинали была весьма длительной. В начальные этапы этой стадии в прогибах (тектонические рвы) происходило накопление толщ вулканогенно-осадочных пород. В это же время внедрялись и интрузивные комплексы.

Колчеданное оруденение было неодновременным, но по времени оно связано с начальными этапами ранней стадии развития геосинклинали. Колчеданные месторождения могли образоваться как до внедрения интрузий, так и после. В. П. Логинов указывает, что «к периоду колчеданного рудоотложения в зеленокаменной толще Урала присутствовали лишь те массивы полнокристаллических пород (гипербазитов, габбро, кварцевых диоритов, плагиогранитов), которые принадлежат к ранней офиолитовой (доортофировой) формации» (1958, стр. 355).

Интрузии внедрялись и в конце ранней стадии, когда мощности вулканогенно-осадочных пород были уже большими. Г. Ф. Яковлевым (1968) и другими исследователями показано, что в конце ранней стадии развития геосинклинали по тем же тектоническим разломам, по которым поднимались массы основной расплавленной магмы, заполнявшей трог, внедрялись гранитоиды — продукты дифференциации габбровой магмы. С этими интрузиями генетически связаны контактово-метасоматические месторождения железа и меди. Н. Д. Знаменским (1966) для Среднего Урала показано, что не все интрузии гранитоидов являются продуктивными. По данным этого исследователя, непродуктивные гранитоиды габбрового ряда от продуктивных отличаются определенными признаками и имеют более древний возраст, т. е. это те интрузии, о которых пишет В. П. Логинов.

О том, что упомянутые интрузии внедрялись в вулканогенно-осадочные породы до отложения колчеданных руд, свидетельствуют и такие данные. В 1 км на север от Светлореченского рудного участка (Полевской район) картированием оконтурен небольшой массив плагиогранита (1100 м в поперечном сечении).

Видимого влияния на руды участка этот массив не оказал. В Красноуральском районе, согласно данным В. П. Первова (1958<sub>2</sub>), почти во всех месторождениях встречены плагиограниты. «Иногда месторождения располагаются на продолжении выступов гранитов по простиранию (Южноайвинское, Абатуровское, Заводское, Новоандреевское, Андреевское)» (Первов, 1958<sub>2</sub>, стр. 34). В рудах месторождений содержатся магнетит, гематит, борнит и редко встречаются кубанит, т. е. минералы, возникшие при метаморфизме. Г. Ф. Червяковский указывает (устное сообщение), что в южной части Андреевского месторождения имеется плагиогранит, но на южном же фланге этого месторождения в серном колчедане скв. 1312 на гл. 208,25—212,65 м подсечен прослой мощностью около 3 м массивной гематито-мушкетовитовой руды. Касаясь возрастных соотношений между минералами, этот исследователь указывает, что видимых признаков замещений сульфидов гематитом и наоборот не обнаружено. Вместе с тем он отмечает зональность роста в пирите и отсутствие такой зональности или ее реликтовый характер в тех случаях, когда в сульфидной руде есть вкрапленность гематита или мушкетовита.

Приведенные данные свидетельствуют о проявлении метамор-

физма и, в частности, контактового в рудах месторождений Красноуральского района. Однако нет прямых доказательств, что такой метаморфизм обусловлен именно плагиогранитом. Гематит в Андреевском месторождении может иметь и иное происхождение.

А. В. Горох (1959), проводивший исследования на Красногвардейском месторождении, отмечает широкое развитие в серном колчедане метаколлоидных образований. Этот исследователь вслед за В. П. Первовым указывает на серицитизацию и рассланцевание плагиогранита и на наложение пиритной минерализации (прожилки) на эту породу. По данным А. В. Гороха, руды Красногвардейского месторождения не имеют заметных признаков метаморфизма, кроме пострудного продрабливания.

Нами до работ А. В. Гороха и после него изучались руды Красноуральских месторождений. В ряде случаев действительно довольно часто встречаются реликты колломорфных образований сульфидов, тем не менее говорить об отсутствии заметных признаков метаморфизма руд нет оснований. В рудах месторождений Красноуральского района признаки метаморфизма столь же явные, как и в других месторождениях, например, на месторождении им. III Интернационала. Это особенно хорошо видно при изучении сфалерита и борнитсодержащих руд. И все же широкое развитие плагиогранитов вблизи от рудных тел по логике вещей должны вызвать более интенсивные контактовые изменения в рудах, если бы плагиограниты были пострудные.

На Ольховском месторождении в крупнокварцевых порфирах в 1966 г. нами встречены обломки плагиогранита. Упомянутые порфиры, как и во многих других месторождениях, залегают в ложаче боку Ольховского месторождения в непосредственной близости от руды. Вся геологическая обстановка свидетельствует о том, что упомянутая порода является дорудной.

На Александринском месторождении, по данным Р. Г. Язевой (1967), крупнокварцевые порфиры в местах брекчирования сцементированы колчеданной рудой, в том числе и колломорфного строения. В крупнокварцевых порфирах нередко встречаются обломки плагиогранита, которого непосредственно в рудном поле месторождения нет, но в удалении от месторождения он встречается часто.

В рудах Александринского месторождения есть явные признаки их метаморфизма — наложение серицита на сульфиды, деформации в сфалерите и превращение его в клейофан, образование полосчатых текстур вследствие динамического воздействия, перекристаллизация, образование заметных масс сплошного гематита, замещение халькопирита борнитом, сфалерита пиритом и др. Однако такие изменения в рудах упомянутого месторождения проявлены в значительной степени меньше, нежели в среднеуральских месторождениях. Связывать эти изменения с внедрением плагиогранитных интрузий нельзя по следующим причинам: 1) интрузии находятся на значительном удалении от рудных тел; 2) обломки плагиогранитов встречаются в крупнокварцевом

порфира, на который наложено оруденение; 3) образование гематита в руде обусловлено контактовым воздействием небольшой интрузии основного состава, внедрившейся рядом с одним из рудных тел, в котором встречен гематит.

Таким образом, из приведенного можно заключить, что на Урале есть колчеданные месторождения, на которых метаморфизирующее воздействие плагиогранитов не устанавливается и факты свидетельствуют о том, что эти породы являются дорудными.

Интрузии гранитоидов, внедрившихся в вулканогенно-осадочные породы в конце ранней стадии развития геосинклинали и обусловившие контактово-метасоматические месторождения железа и меди, оказывали метаморфизирующее воздействие как на породы, так и на колчеданные месторождения, залегающие в этих породах. Интенсивному контактовому метаморфизму подверглись те месторождения, которые залегают близко от интрузий (Тарньерское, Зюзельское, им. 50 лет Октября, Приорское и другие). В месторождениях же, расположенных на различном удалении от таких интрузий, но влияние на которые последних все же в той или иной мере сказалось, соответственно устанавливаются и признаки различной интенсивности проявлений указанного метаморфизма. Например, в Сибее руды контактовому метаморфизму подверглись только на нижних горизонтах, а верхние части рудных тел остались не затронутыми таким метаморфизмом, и здесь отчетливо видны признаки диагенеза.

Под воздействием тепла интрузий и связанных с ними растворов, колчеданные рудные тела претерпевали сложные изменения, выразившиеся в замещениях основных сульфидов — пирита, сфалерита и халькопирита пирротином, этих же сульфидов и пирротина магнетитом. Такие изменения с удивительным постоянством отмечаются в рудах тех месторождений, в которых устанавливаются признаки контактового метаморфизма. Во вмещающих породах появлялись биотит, минералы группы амфибола, андалузит, кордиорит, иногда гранат и другие минералы. Многими из этих минералов замещались сульфидные агрегаты.

На примере Куросанского рудного поля А. И. Шмидтом (1961) показано, что скарновые минеральные образования накладывались и на измененные вмещающие породы.

Замещения в рудах сопровождалась интенсивной перекристаллизацией и дифференциацией вещества. Перекристаллизация рудных и нерудных минералов протекала при высоких температурах. В результате руды стали средне- и крупнозернистыми, а отдельные зерна пирита вырастали до 3—5 см и больше в поперечнике. Сфалерит приобрел темную окраску вследствие растворения в нем большого количества железа. В ряде месторождений (Зюзельское и др.) пирит стал кобальтоносным минералом, или к рудам оказался примешанным в тех или иных количествах молибденит (Тарньерское, им. 50 лет Октября и др.).

Н. Д. Знаменским (1966) установлены признаки интенсивного

калиевого и натрового метасоматоза, обусловленного растворами, генетически связанными с продуктивными гранитоидами. В рудах некоторых (например, Зюзельского) колчеданных месторождений, подвергшихся контактовому метаморфизму, проявления более позднего, не связанного с процессом рудоотложения натрового метасоматоза, обнаруживаются надежно. Об этом свидетельствует присутствие натрия в хлоритоиде, который эпигенетичен к руде (Буслаев, Ярош, 1967), а также результаты изучения серицита, о которых говорилось выше. Однако следует иметь в виду, что калиевый и натровый метасоматоз мог происходить и вне связи с контактовым метаморфизмом и проявляться неоднократно. Специально направленные исследования серицитсодержащих пород на Гайском месторождении (где признаки контактового метаморфизма не обнаружены), выполненные Ф. П. Буслаевым, показали, что натровый метасоматоз в указанных породах проявлен довольно интенсивно. В этом же месторождении есть и хлоритоид (Буслаев, Образцов, 1968), но примечательно, что этот минерал здесь практически не содержит щелочей.

Н. Г. Судовиковым (1962, 1965 и более ранние работы) показано, сколь большие массы вещества могут быть мобилизованы метаморфогенными растворами, которые транспортируют это вещество с нижних частей разрезов в верхние. Перемещение рудных компонентов в условиях повышенных температур и давлений подтверждено и экспериментально (Хитаров, 1961). Несомненно, что растворы, связанные с интрузиями гранитоидов, взаимодействовали с колчеданными рудами и вмещающими их комплексами пород не только в локальных участках (в пределах того или иного месторождения), но и по всему разрезу последних снизу вверх. В растворах был ряд химических элементов, вынесенных из магмы (или, по Н. Г. Судовикову, мобилизованных из пород). Вследствие обменных химических реакций, метасоматических замещений в эти растворы переходили и различные компоненты как из руд (сера, железо, медь, цинк и др.), так и из пород. По пути движения снизу вверх растворы в зависимости от физико-химических условий в одних местах отлагали свой полезный груз, в других обогащались таким грузом и несли его выше по разрезу до мест, благоприятных для новых минеральных образований. Новообразования, например, сульфидов отмечались как в пределах отдельных месторождений (верхние горизонты, фланги), так и в тех участках разреза, которые тектонически были подготовлены и находились на значительных удалениях от того или иного колчеданного месторождения. Таким путем возникали зоны вкрапленных и даже сплошных сульфидных руд, обогащенных существенно халькопиритом или сфалеритом и другими рудными минералами.

Минеральные новообразования сульфидов по многим признакам (внутреннее строение зерен, количества и качество примесей и т. д.) будут отличаться от сульфидных агрегатов в колчедан-

ных рудах, которые не претерпели заметных метаморфических изменений, так как условия отложения тех и других были совершенно различны. На примере южноуральских месторождений видно, что отложение сульфидов протекало в условиях, исключаящую резкую дифференциацию вещества. Из растворов же, поднимавшихся с нижних горизонтов вулканогенных комплексов, сульфиды отлагались более последовательно, т. е. происходила заметная дифференциация рудных компонентов. В результате выделения халькопирита, например, часто оказались пространственно и во времени оторванными от выделений пирита.

Упомянутые оторванные образования сульфидов накладывались и на колчеданные рудные тела, залегающие выше по разрезу комплекса вулканогенно-осадочных пород. Вследствие этого серноколчеданные или существенно серноколчеданные руды приобретали иное качество. Они обогащались медью, золотом и другими полезными компонентами. Следовательно, в ряде месторождений появились признаки, свидетельствующие об их регенерированном происхождении, на что М. Б. Бородаевская указывала еще в 1952 г. (Л. И. Яковлев, 1959).

Отложение новых порций сульфидов в колчеданных рудных телах, естественно, не могло быть равномерным. Этому мешали неравномерное продрабливание руд и другие причины. В месторождениях возникала вторичная зональность, которая усложнила и видоизменила первичную зональность, отображающую последовательность первичного минералообразования.

Таким образом, внедрением гранитоидных интрузий — продуктов дифференциации габбровой магмы в вулканогенно-осадочные комплексы пород — создавались условия не только для контактового метаморфизма колчеданных месторождений и пород, в которых они залегают, но и в связи с таким метаморфизмом для переноса на значительные расстояния вверх по разрезу, перераспределения и переотложения рудного вещества. В результате такого хода событий колчеданные рудные тела обеднялись в одних случаях, например, медью, в других — обогащались кобальтом или молибденом и т. д. Вблизи от месторождений и на значительном расстоянии от них возникали новые зоны вкрапленных и даже сплошных руд, значительно обогащенных той же медью, как сравнительно легкоподвижным компонентом. Такие зоны часто не представляют практического интереса. Они не имеют видимой связи с интрузиями гранитоидов. По ряду признаков сульфидные агрегаты в этих зонах будут отличаться от таких же агрегатов в колчеданных месторождениях, не подвергшимся заметным метаморфическим изменениям.

Контактный метаморфизм, обусловленный интрузиями гранитоидов, изменил не только колчеданные рудные тела. Изменение претерпели и первичные геохимические ореолы около таких тел. Мы не располагаем конкретными данными по этому вопросу, однако совокупность всего фактического материала по контакто-

вому метаморфизму колчеданных руд дает основание считать, что упомянутые изменения, если не в большинстве, то по крайней мере в ряде случаев, были весьма значительными.

В связи с внедрением в вулканогенно-осадочные комплексы, возникшие в трогах геосинклинали на ранних стадиях ее развития, более поздних интрузий — продуктов дифференциации тех же магматических очагов, которые дали массы эффузивных образований в трогах, и метаморфизирующим воздействием этих интрузий на колчеданные месторождения, нельзя не обратить внимание на немалой важности вопрос, который исследователями поставлен уже давно. Это вопрос об общностях и генетических связях колчеданных и контактово-метасоматических месторождений. А. Н. Заварицкий (1927), В. В. Никитин (1934), В. А. Обручев (1934) ставили вопрос о переходе контактово-гидротермального оруденения в колчеданное. А. Н. Заварицкий (1927) отметил, что Алексеевское месторождение (Кировоградский район), в котором есть скарновые образования, а оруденение представлено магнетитом и сульфидами, имеет большой теоретический интерес, так как оно свидетельствует о генетической связи между колчеданными и контактово-метасоматическими месторождениями. Месторождение залегает в той же геологической обстановке, что и месторождения Калатинское и Белореченское, но в отличие от последних в нем есть контакт изверженных пород с известняками, что обусловило развитие скарновых образований, сопровождающих оруденение.

С. Н. Иванов (1959<sub>3</sub>) также уделил внимание рассматриваемому вопросу. Этот исследователь, проанализировав большой фактический материал, показал, что колчеданные и контактово-метасоматические месторождения приурочены к комплексам одних и тех же пород, причем вторые в разрезах размещены несколько выше, нежели первые. Он обратил внимание также на частую близость в размещении тех и других месторождений и на почти одинаковый список химических элементов (особенно основных), характерных для руд в обоих случаях.

Д. С. Штейнберг (1963<sub>2</sub>) указывает на характерную и определенную сопряженность контактово-метасоматических месторождений, связанных с нижнекаменноугольными магматическими комплексами, и более древних колчеданных месторождений.

Л. Н. Овчинников в работе, обобщающей опыт изучения контактово-метасоматических месторождений Среднего и Северного Урала, показал закономерности размещения этих месторождений и их генетическую связь с гранитоидными интрузиями — продуктами дифференциации габбровой магмы (1960). Из этой работы и из работ других исследователей видно, что контактово-метасоматические месторождения приурочены к тем же комплексам вулканогенно-осадочных пород, в которых размещаются и колчеданные месторождения, и что продуктивные интрузии гранитоидов внедрялись по тем же глубинным разломам, по которым

в начальные стадии развития геосинклинали поднимались массы основной магмы, заполняя трюги.

Отмечая пространственные и генетические связи контактово-метасоматических месторождений с гранитоидными интрузиями, Л. Н. Овчинников пишет: «Основная масса месторождений не располагается на собственно контакте материнского интрузива, а находится среди осадочно-вулканогенной толщи, в том или ином удалении от нее. Более того, ряд месторождений, заключаясь в виде пластовых залежей или вкрапленных зон среди вулканогенных пород, не имеет видимой пространственной связи с интрузивными массивами» (1960, стр. 55). Касаясь медных месторождений, указанный автор подчеркивает, что они еще больше, чем железорудные, удалены от гранитоидных интрузивов, иногда совсем не имея видимой пространственной связи с ними: «... медные месторождения сосредотачиваются в самих верхах комплекса, уступая более низкие горизонты, близкие к интрузиву участки, более ранним, высокотемпературным магнетитовым залежам» (стр. 27).

Отмеченные особенности пространственного размещения месторождений относительно гранитоидных интрузий нашли себе логическое объяснение в уже упоминавшейся работе Л. Н. Овчинникова, однако они интересны и в связи с тем вопросом, который упоминался выше. Л. Н. Овчинников подчеркивает, что общим для всех месторождений контактово-метасоматического типа, за исключением единичных случаев, является их приуроченность к зонам контактового метаморфизма. В связи с этим он заключает: «Образование контактово-метасоматических месторождений — частный случай метаморфизма, вызванного интрузией; оно неразрывно связано с метаморфизмом и представляет наиболее интенсивное его появление» (стр. 55). Этот вывод, базирующийся на огромном фактическом материале, имеет прямое отношение к рассматриваемому вопросу. Если гранитоидные интрузии, внедрившиеся в вулканогенно-осадочные толщи, обуславливали в последних образование сложных метаморфических ореолов и зон, с исчерпывающей полнотой охарактеризованных Л. Н. Овчинниковым, то эти же интрузии, как следует из изложенного выше материала, метаморфизуют и на колчеданные месторождения, залегающие в вулканогенно-осадочных толщах и оказавшиеся в ореолах влияния интрузий. Неоспоримые признаки метаморфизующего воздействия последних на колчеданные руды видны в Тарньерском, Зюзельском и других месторождениях. В контактово-метасоматических месторождениях имеются сульфидные руды, представленные пирротином, пиритом, халькопиритом, в меньшей мере сфалеритом и другими сульфидами. Л. Н. Овчинников (1960) указывает на присутствие таких руд в месторождениях Турьинской группы, 3 Северного рудника и других, причем в ряде случаев, по данным этого исследователя, количество сульфидных руд бывает значительным.

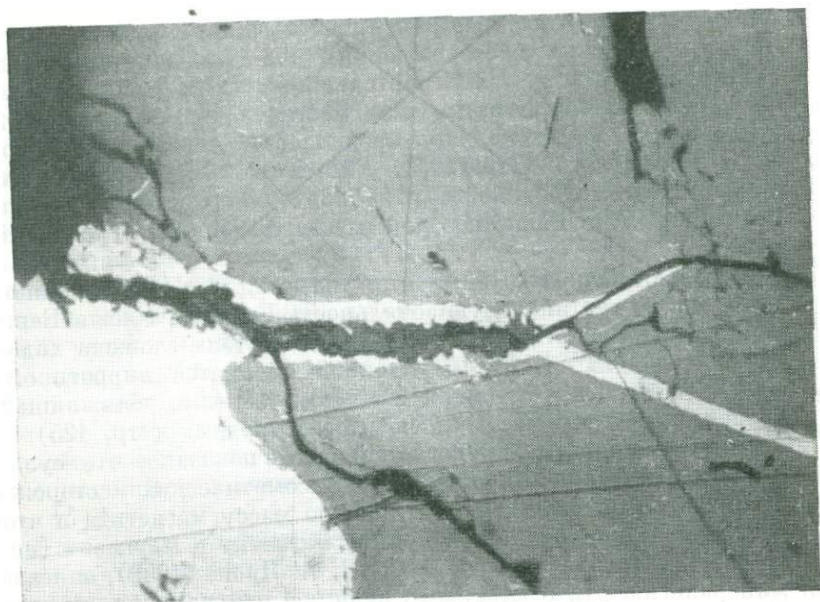
Приводя данные о распространении сульфидных руд в контактово-метасоматических месторождениях, Л. Н. Овчинников пишет: «Пирротин пользуется значительно большим распространением в контактово-метасоматических месторождениях Среднего и Северного Урала, чем это можно предполагать по данным, имеющимся в литературе» (стр. 205). Далее этот автор указывает, что халькопирито-пирротиновые руды образуют пластовые залежи в Богомоловском и Башмаковском месторождениях Турьинской группы.

Заслуживают большого внимания указания Л. Н. Овчинникова на некоторую вертикальную зональность Главной залежи Башмаковского рудника. «Верхняя часть рудного тела сложена халькопиритовой рудой, которая с глубиной сменяется пирротином. Массивный пирротин в нижней части залежи, ближайшей к интрузиву, уступает место магнетитовым рудам» (стр. 125).

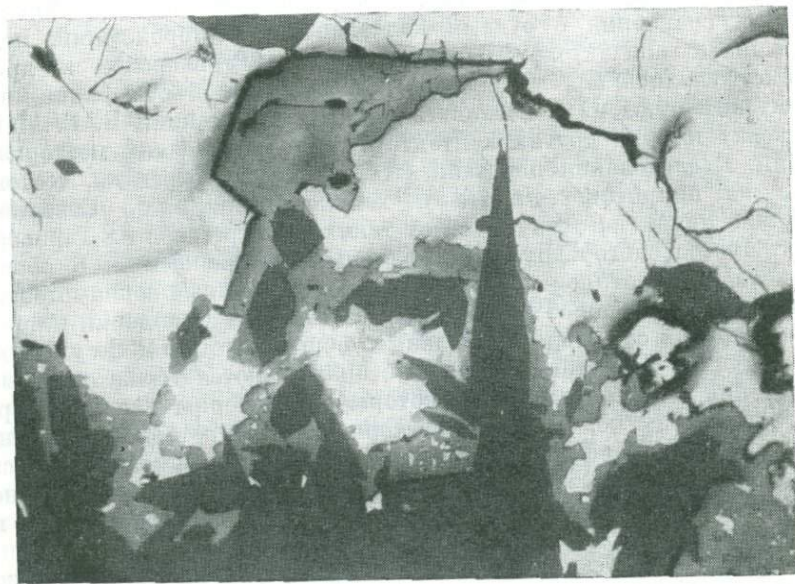
Л. И. Овчинниковым в приведенной работе показано, что сульфидная минерализация в контактово-метасоматических месторождениях является наложенной на основную массу магнетита и что при разложении пирротина образуются магнетит и марказит (незначительные количества магнетита). Н. А. Ярош (1959), описывая минералогию руд 3 Северного рудника, отмечает, что пирротин более поздний минерал, нежели пирит. Она подчеркивает чрезвычайно характерное замещение пирротина агрегатом более поздних пирита, марказита и магнетита. Такие же замещения часто встречаются и в колчеданных месторождениях, подвергшихся контактовому метаморфизму.

Для сравнения с рудами колчеданных месторождений, подвергшихся контактовому метаморфизму (Тарньерское и др.), нами изучались под микроскопом сульфидные и сульфидно-магнетитовые руды из 3 Северного рудника (коллекция В. Г. Максенкова) и ряда других контактово-метасоматических месторождений. Исследования показали, что, например, агрегаты, состоящие из пирротина, пирита и халькопирита, на 3 Северном руднике ничем не отличаются от таких же агрегатов из Тарньерского, Зюзельского и других колчеданных месторождений. В обоих случаях в пирротиновой массе отмечаются крупные зерна пирита, являющиеся порфиробластами, выросшими при замещении пирротином других сульфидов и главным образом пирита. В сульфидных рудах 3 Северного рудника устанавливаются те же сложные изменения и преобразования, которые характерны для Тарньерского и других колчеданных месторождений, претерпевших контактовый метаморфизм. В частности, пирротин является здесь более поздним образованием не только к пириту, что отмечено и Н. А. Ярош (имеется в виду пирит ранних генераций), но и к сфалериту (рис. 119).

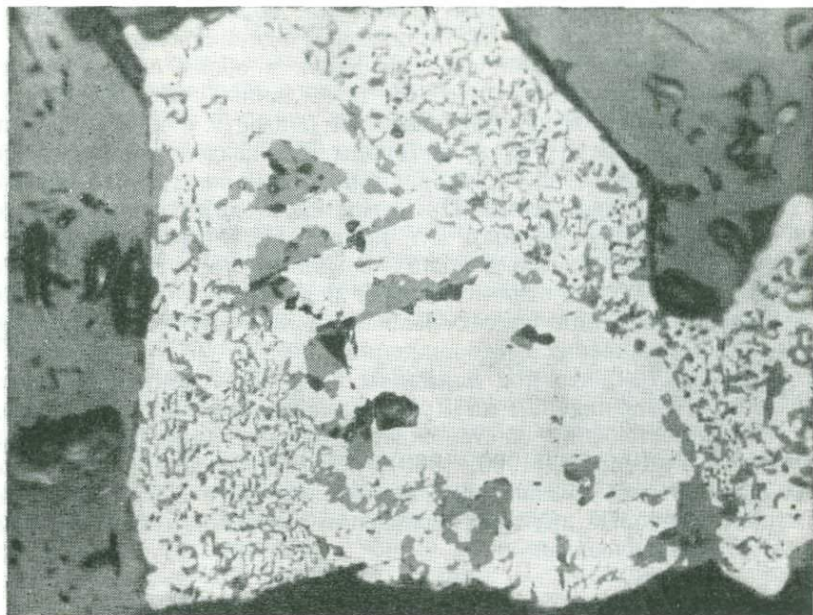
Наряду с признаками наложения сульфидов на магнетитовую руду устанавливаются и признаки, свидетельствующие о замещении магнетитом сульфидов, в том числе и пирротина (рис. 120).



119. Выделение халькопирита (светлое) и пирротина (светло-серое) в трещинах, пересекающих сфалерит (серое, основной фон); черное — нерудный минерал, 3-й Северный рудник. Отраженный свет, увел. 94



120. Замещение магнетитом (серое) халькопирита (светлое) и пирротина (светло-серое); черное — нерудный минерал, 3-й Северный рудник. Отраженный свет, увел. 94



121. Замещение магнетитом (серое) пирита (белое); черное — нерудный минерал. Гора Благодать. Отраженный свет, увел. 540

Пойкилитовые включения последнего отмечаются в зернах магнетита, слагающих основную массу руды.

Замещение магнетитом пирита наблюдается и в других месторождениях (рис. 121).

Так же как и в колчеданных, в контактово-метасоматических месторождениях сульфиды, и в первую очередь халькопирит, замещались нерудными минералами, а пирротин дисульфидизировался, превращаясь в марказит, или распадался на марказит и магнетит, на магнетит и пирит. Марказит, образовавшийся по пирротину, переходил в пирит.

Таким образом, в рудах контактово-метасоматических месторождений происходило не только наложение сульфидов на магнетит, но и развитие магнетита по сульфидам. В сульфидных этих месторождений фиксируется тот же характер, та же последовательность изменений, которые характерны для колчеданных руд, подвергшихся контактовому метаморфизму.

Мы не проводили систематического изучения руд контактово-метасоматических месторождений (так как это область больших самостоятельных исследований), и если говорить о генетических связях этих и колчеданных месторождений, то, естественно, надо признать, что раскрытие сущности таких связей — дело будущих исследований, однако учет общности геологических условий на-

хождения тех и других месторождений, зональность в рудных телах, отмеченная Л. Н. Овчинниковым, одинаковый характер и последовательность изменений сульфидов в обоих случаях дают основание предполагать, что те колчеданные месторождения, которые оказались в непосредственной близости с внедрившимися интрузиями гранитоидов, изменены под воздействием последних таким образом, что приобрели признаки контактово-метасоматических месторождений. При этом часть химических элементов из колчеданных рудных тел нижних частей разреза переходила в растворы, генетически связанные с гранитоидными интрузиями. За счет этих элементов возникали новообразования сульфидов в верхних частях разреза, в том числе и в контактово-метасоматических месторождениях.

Говоря о том, что под влиянием интрузий гранитоидов колчеданные месторождения на Урале приобретали признаки контактово-метасоматических месторождений, необходимо указать на работы Н. Г. Щербы (1966, 1969), который раньше нас предложил пересмотреть генезис ряда месторождений в Успенском рудном поясе, которые другими исследователями отнесены к контактово-метасоматическим.

#### РЕГИОНАЛЬНЫЙ МЕТАМОРФИЗМ, СОПРЯЖЕННЫЙ С ПОЗДНЕПАЛЕОЗОЙСКИМИ ГРАНИТНЫМИ ИНТРУЗИЯМИ И СКЛАДЧАТОСТЬЮ

Колчеданные месторождения, на которых сказалось влияние интрузий гранитоидов габбрового ряда, претерпели то сильный, то слабый, но ярко выраженный контактовый метаморфизм. Однако руды многих месторождений особенно Среднего Урала (Левиха, им. III Интернационала, Ольховское, Карабашская группа и другие) не имеют явных признаков такого метаморфизма, хотя изменены они очень сильно. Изменения в рудах перечисленных и аналогичных месторождений обусловлены региональным метаморфизмом. В. П. Логинов (1958) предполагает, что колчеданные месторождения на Урале испытали две стадии регионального метаморфизма: позднекаледонскую и варисскую. Д. И. Горжевский и В. Н. Козеренко (1965), рассмотревшие вопросы металлогении метаморфогенных месторождений, уделили много внимания метаморфизму сульфидных руд. Касаясь уральских колчеданных месторождений, названные авторы считают, что такие объекты, как, например, Учалинское месторождение, метаморфизованы в условиях цеолитовой фации регионального метаморфизма; месторождение им. III Интернационала, Кабанские и многие другие на Среднем Урале — в условиях кварц-альбит-мусковито-хлоритовой субфации фации зеленых сланцев, а Карабашские и Дегтярское — в условиях кварц-альбит-биотит-эпидотовой субфации только что упомянутой фации. Е. А. Кузнецов (1963) выделяет

четыре типа метаморфизма пород на Урале: региональный, контактовый, гидротермальный и динамический — и подчеркивает, что все эти типы взаимосвязаны и часто накладываются один на другой, повторяясь несколько раз.

Полученные нами фактические данные при изучении руд колчеданных месторождений Урала, а также учет информации других авторов по метаморфизму пород, вмещающих эти месторождения, показывают, что в колчеданных рудах многих месторождений зафиксированы признаки, свидетельствующие о том, что эти руды подвергались региональному метаморфизму, сопряженному с интрузиями гранитов верхнепалеозойского возраста и складчатостью, в условиях а) зеленосланцевой фации и б) амфиболитовой фации.

Зеленосланцевая фация. При метаморфизме в условиях этой фации колчеданные рудные тела испытывали сильные динамические напряжения (направленное давление). В минералах, слагающих колчеданные руды, интенсивно проявлялись хрупкие и пластические деформации и осуществлялась перекристаллизация на месте и с перераспределением вещества как внутри рудных тел, так и в боковые породы. В зернах пирита и сфалерита исчезала зональность роста. В рудах образовались полосчатые, гнейсовидные и сланцеватые текстуры, а также линейные структуры, ориентировка которых совпадает с ориентировкой таких же структур во вмещающих породах. Рудные тела разлинзовывались. Сфалерит большей частью утратил темную окраску и стал светлоокрашенным (клеюфан). Рудные минералы замещались рудными же минералами — пирит халькопиритом, сфалеритом, галенитом, сфалерит пиритом, халькопиритом и т. д. Пирротин и магнетит в рудах очень мало или нет совсем. Нерудные минералы накладываются на рудные и интенсивно их замещали. В наиболее широких масштабах происходили замещения сульфидов серицитом, хлоритом и кварцем, в меньшей степени хлоритоидом, стильномеланом и другими минералами. Замещения были избирательными и часто псевдоморфными.

Из литературы, освещающей историю развития Урала, известно, что гранитные интрузии нормального ряда верхнепалеозойского возраста внедрялись в крупные структурные единицы — поднятия и в общем нехарактерны для прогибов. Однако указанные граниты встречаются в пределах Тагило-Магнитогорского погружения. Это, например, Ахуново-Карагайский, Кацбахский, Сундукский массивы и ряд мелких интрузий. Восточная часть Челябинского массива залегает в зеленокаменных толщах, Верх-Исетский массив прорывает толщи вулканогенно-осадочных пород. С внедрением указанных гранитов связаны метаморфические изменения пород.

Вблизи таких месторождений, как им. III Интернационала, Левиха, Карабашская группа, Александринское, Гайское и другие, нет упомянутых гранитов, однако влияние последних сказа-

лось на их рудах. После того, как руды были уже значительно метаморфизованы, на них накладывались растворы, связанные с гранитными интрузиями. Растворы привнесли в руды незначительные количества радиоактивных и других элементов (олово, мышьяк, бор, золото, серебро) и метаморфизирующе воздействовали на них. В рудах происходила повторная перекристаллизация, халькопирит замещался борнитом, борнит халькозинном и т. д. Появились новообразования акцессорного давидита (?), станниина, аргентита, штроемeyerита, самородных золота и серебра (иногда в крупных выделениях), калаверита, турмалина и других.

Альфа-излучение радиоактивных элементов обусловило образование в рудных минералах радиоактивных двориков и фотолюминесценцию сфалерита. После того, как в минералах возникли дворики, руды продолжали испытывать динамические напряжения, и в них имели место пластические течения. Вследствие проявления деформаций и перекристаллизации дворики в минералах исчезали.

Региональному метаморфизму в условиях зеленосланцевой фации подвергались и месторождения, ранее претерпевшие сильные или слабые изменения при контактовом метаморфизме. Степень влияния такого метаморфизма на руды в каждом конкретном случае зависит от места расположения месторождений в пределах зон развития вулканогенно-осадочных комплексов. Например, в Сибайском месторождении им. 50 лет Октября влияние указанного метаморфизма устанавливается с трудом или незаметно совсем. В Зюзельском месторождении, на Чусовском рудном участке (Полевской район) и других объектах упомянутый метаморфизм обусловил значительные повторные изменения в рудах и вмещающих породах. Эти изменения выразились в дроблении рудных минералов, образовании гнейсовидных и полосчатых текстур в рудах, осветлении сфалерита, в повторной перекристаллизации минералов и появлении в них радиоактивных двориков (дворики в пирите и биотите и их значительно меньше, нежели в минералах из борнитсодержащих руд), в интенсивном и избирательном замещении руд серицитом, в замещениях биотита хлоритом, хлорита серицитом, граната клиноцоизитом и т. д.

**Амфиболитовая фация.** А. Д. Ракчевым (1956), В. А. Марксом (1958, 1969) и другими исследователями описан метаморфизм вулканогенно-осадочных пород на Урале в условиях амфиболитовой фации, обусловленный внедрением гранитов верхнепалеозойского возраста (Аракульская интрузия). На примере Маукского месторождения видно, что такой метаморфизм вызвал в рудах радикальные изменения, выразившиеся в интенсивной перекристаллизации, замещении халькопирита и пирита пирротинном, пирротина и других сульфидов магнетитом. На рудные агрегаты наложены биотит и другие нерудные минералы. Сфале-

рит приобрел темную окраску. Иными словами, признаки регионального метаморфизма амфиболитовой фации и контактового метаморфизма в колчеданных рудах совпадают, что раньше отметил Л. И. Яковлев (1959). Разница в проявлениях контактового метаморфизма и метаморфизма регионального в условиях амфиболитовой фации на месторождениях устанавливается главным образом по геологическим данным.

При региональном метаморфизме колчеданные руды претерпевали то сильные, то слабые изменения. Как и в условиях контактового метаморфизма, при региональном метаморфизме создавались условия (замещения рудных минералов рудными, рудных нерудными и т. д.) для дифференциации и переотложения вещества как внутри рудных тел, так и за их пределами. На руды накладывались растворы, генетически связанные с гранитными интрузиями верхнепалеозойского возраста. Вследствие этого видоизменялась и усложнялась первичная зональность в рудных телах. В одних случаях минеральный состав руд менялся мало, однако из них выносились полезные компоненты, в других — полезные компоненты привносились в руды и значительно менялся набор рудных минералов (борнитсодержащие руды). Без изменений не могли остаться и геохимические ореолы около рудных тел, хотя это и отрицается другими исследователями (Овчинников, Баранов, 1970). Вблизи рудных тел и в удалении от них появились вторичные зоны главным образом вкрапленных сульфидных руд. Около таких зон возникли и вторичные геохимические ореолы. Такие ореолы накладывались и на первичные ореолы, усложняя и изменяя в них пространственное распределение (зональность) химических элементов.

Таким образом, руды колчеданных месторождений на Урале имеют признаки изменений вследствие метаморфизма:

1) контактового, связанного со среднепалеозойскими гранитоидными интрузиями габбрового ряда (Тарньерское, Зюзельское, Сибайское, им. 50 лет Октября, Приорское и др.)

2) Регионального, сопряженного с позднепалеозойскими гранитами и складчатостью, в условиях фации зеленых сланцев (им. III Интернационала, Левихинская и Карабашская группы и многие другие) и фации амфиболитовой (Маукское),

3) контактового и регионального в условиях зеленосланцевой фации (Зюзельское, Чусовской рудный участок и другие).

Из изложенного выше видно, что метаморфизм обуславливал смену парагенетических ассоциаций минералов в колчеданных рудах. Это представляет значительный интерес в связи с тем, что парагенетическим ассоциациям рудных минералов как свидетелю смены физико-химических условий и состава растворов в процессе рудоотложения посвящены специальные исследования многих авторов (Григорьев, 1948; Бетехтин, 1953 и другие). Замещения главных сульфидов железа и меди друг другом, сульфидов магнетитом и совместное нахождение первых и послед-

него в колчеданных рудах, т. е. смена минеральных ассоциаций, понятны, если обратиться к диаграмме состав-парагенезис минералов в системе  $\text{Cu-Fe-S-O}$ , приведенной А. Г. Бетехтиным (1953, рис. 30). При метаморфизме физико-химические условия в месторождениях были иными, нежели в процессе первичного рудоотложения. Менялся окислительно-восстановительный потенциал, температура и давление. При сильно восстановительных условиях и повышенных температурах по пириту и халькопириту развивался пирротин. В условиях повышенного режима кислорода пирротин и другие сульфиды замещались магнетитом. При еще более высоком режиме кислорода по магнетиту развивался гематит. Понижение окислительного потенциала обуславливало замещение магнетита пиритом. Замещения одних минералов другими обуславливали переход в растворы больших количеств серы, концентрация которой могла быть повышенной или высокой. Растворы перемещались как внутри рудных тел, так и за их пределами. Повышенные концентрации серы в растворах способствовали замещению халькопирита борнитом, борнита халькозином.

Таким образом, если говорить об основных парагенезисах минералов в рудах колчеданных месторождений Урала, то следует отметить, что такие парагенезисы рассмотрены А. Г. Бетехтиным уже давно, однако необходимо подчеркнуть, что наблюдаемые в настоящее время парагенезисы рудных минералов в метаморфизованных рудах обусловлены сменой физико-химических условий не во время первичного рудоотложения, а главным образом метаморфизмом руд, что имеет принципиальное значение.

В связи со сменой парагенетических ассоциаций рудных минералов при метаморфизме колчеданных месторождений очень важны данные, которые хотя бы приближенно позволяют судить о температурах и давлениях во время метаморфизма. При описании замещений пирротиниом других сульфидов мы кратко уже останавливались на этом вопросе. В дополнение к этому следует обратить внимание на следующее. В месторождениях Кабанском, Рогаткина Яма, Зюзельском, Карабашских и Гайском обнаружен хлоритоид. Наложение этого минерала на колчеданную руду, например, в Зюзельском месторождении не вызывает сомнений. По данным Халфердаля (Halferdahl, 1964), упомянутый минерал устойчив при температурах от 400 и почти до 700° и давлениях 1—30 к/бар. Следовательно, эти данные указывают, что метаморфизм многих колчеданных месторождений Урала мог происходить в интервалах тех температур и давлений, в которых устойчив хлоритоид.

Из сопоставлений колчеданных месторождений Урала с такими же месторождениями в других провинциях Советского Союза и других стран, приведенных в работах Л. И. Яковлева (1959), В. И. Смирнова (1968), Д. И. Горжевского и В. Н. Козеренко (1965) и других исследователей, видно, что многочисленные месторождения во всем мире в зависимости от своего возраста и

истории геологического развития того или иного региона сильно или слабо метаморфизованы. При этом метаморфизм был контактовый и различных ступеней региональный. В результате в рудах сильно метаморфизованных месторождений, так же как и на Урале, появились пирротин и магнетит. Пирит стал азональным. В рудах и вмещающих породах возникли новообразования биотита, амфибола, граната и других высокотемпературных минералов. Руды перекристаллизовались и стали крупнозернистыми, в них возникли полосчатые текстуры. При контактовом метаморфизме руды в той или иной степени обогатились кобальтом, молибденом и другими элементами.

Наши выводы по метаморфизму колчеданных месторождений Урала не противоречат выводам многих исследователей, изучавших не только указанные месторождения, но и месторождения в других колчеданосных провинциях. Эти выводы логически вытекают как из результатов изучения колчеданных руд, так и из истории развития Уральской геосинклинали.

Как видно из всего выше изложенного материала, в основу настоящей работы положены результаты многолетних исследований руд наиболее представительных колчеданных месторождений Северного, Среднего и Южного Урала, а также Северных Мугоджар. Наряду с обычными методами изучения руд под бинокулярной лупой, под микроскопом в отраженном свете, применение электронного микроскопа позволило получить совершенно новую информацию, раскрывающую ряд сложных явлений, связанных с деформациями в минералах и их агрегатах, перекристаллизацией (рекристаллизацией) таких агрегатов, образованием резко зональных зерен пирита при раскристаллизации тонкодисперсных масс дисульфида железа и т. д.

Особо интересной и важной является информация, полученная при изучении руд в ультрафиолетовом свете и, в частности, одного из главных минералов, слагающих такие руды — сфалерита. Особенности проявления фотолюминесценции в упомянутом минерале дали возможность последовательно и в деталях проследить целую гамму очень сложных явлений, обусловленных метаморфизмом руд и невидимых при применении других методов исследования. Только в ультрафиолетовом свете видны детали внутреннего строения кристаллов и зерен сфалерита, поведение последних при динамических напряжениях и что еще важнее — радиоактивные дворики. Изучение фотолюминесценции сфалерита и радиоактивных двориков в этом и других рудных и нерудных минералах, входящих в состав колчеданных руд, имеет более широкое и общее значение.

Урал представляет собой одну из важнейших колчеданосных провинций не только Советского Союза, но и мира. Колчеданные месторождения этой провинции являются экономически важными объектами. В них сосредоточена значительная часть запасов меди страны, а также других полезных компонентов.

Образование колчеданных месторождений связано с ранней стадией развития уральской геосинклинальной области. Колчеданное рудообразование было неодновременным. Оно генетически связано с магматическими очагами, давшими накопления вулканических образований в трогах, и проявлялось в конце каждого вулканического цикла, когда излияния основного состава сменялись кислыми. Месторождения, которые образовались в конце первого вулканического цикла, подвергались изменениям в связи с образованием месторождений в более высоких частях разреза

в последующие вулканические циклы. Однако такие изменения колчеданных руд не были радикальными и повсеместными.

Изучение руд таких месторождений, как Блявинское, Комсомольское, Сибайское и некоторых других, показывает, что первоначально эти руды представляли собой тонкодисперсные массы, которые выделились относительно быстро из пересыщенных растворов типа коллоидных. В процессе диагенеза эти массы видоизменялись, превращаясь в зернистые агрегаты.

Колчеданные руды, видоизмененные при диагенезе, в дальнейшем претерпевали различной интенсивности изменения, обусловленные контактовым и региональным метаморфизмом.

Если устанавливаются неоспоримые признаки интенсивных метаморфических изменений главных рудных минералов — пирита, сфалерита и халькопирита и рудных агрегатов в целом, то, естественно, метаморфизм изменил и облик рудных тел и месторождений особенно на Среднем Урале. Колчеданные рудные тела и вмещающие их породы метаморфизовались одновременно. В минеральных агрегатах тех и других вследствие динамических напряжений имели место хрупкие и пластические деформации, перекристаллизация (рекристаллизация), переотложение вещества, метасоматические замещения. В рудных телах и вмещающих породах возникли линейные структуры, ориентировка которых в обоих случаях совпадает. В рудах образовались полосчатые, гнейсовидные и сланцевые текстуры, всегда наиболее отчетливо проявленные в приконтактных частях, в пережимах и на флангах рудных тел. Породам присуща сланцеватая текстура. Рудные тела облекаются (обтекаются, обжимаются) сланцами. Они (рудные тела) оказались разлинзованными так же, как и вмещающие породы.

Метаморфизм как контактовый, так и региональный проявлен не везде одинаково. Наиболее интенсивно второй проявлен на Среднем Урале. Здесь разлинзованы и колчеданные рудные тела и сильнее всего изменены руды.

Благодаря неравномерности проявления и различной интенсивности метаморфизма не только в целом на Урале, но и в отдельных районах того же Среднего Урала, одинаковые или близкие как по составу руд, так и по первичному составу и характеру околорудных изменений пород, а так же по структурным особенностям месторождения приобрели новые и различные признаки, новые и не везде одинаковые отличительные черты. В одних месторождениях сильно или значительно изменился минеральный и вещественный состав — появились новообразования пирротина, магнетита, молибденита, биотита, роговой обманки и других минералов, пирит в той или иной мере стал кобальтоносным; в других — также изменился и вещественный и минеральный состав, однако эти изменения качественно иные — за счет халькопирита образовался борнит, вместе с борнитом выделились редкие минералы станнин, люцит, штрөмейерит, зерна

аксессуарного давидита (?) и др.; в третьих — весьма резко проявились линейные структуры и полосчатые текстуры, а рудные тела сильно разлинзованы; в четвертых — те или иные метаморфические изменения в рудах проявлены слабо или относительно слабо и в них хорошо сохранились признаки диагенетических преобразований. Кроме того, есть месторождения, в которых нижние части рудных тел сильно изменены контактовым метаморфизмом (руды представлены в основном пирротинном, пирротинном и магнетитом), а в верхних частях таких тел сохранились колломорфные структуры и даже тонкодисперсные выделения сульфидов, т. е. в таких месторождениях возникла вторичная вертикальная зональность. Такая зональность может в основном сохраниться и при последующем региональном метаморфизме.

Новые признаки в месторождениях, новые отличительные черты последних, если не учитывать, что такие признаки и черты являются результатом метаморфизма, дают основание усматривать различные условия и резкую смежу условий первичного рудообразования в однотипных месторождениях, но по-разному метаморфизованных, а сами месторождения относить к различным генетическим типам, подтипам или к переходным образованиям, например, между колчеданными и контактово-метасоматическими.

Изменив облик месторождений и вмещающих их пород, метаморфизм сивелировал и замаскировал первичные соотношения между рудами и породами. Главные факторы, обусловившие локализацию оруденения — дизъюнктивные тектонические нарушения, во многих месторождениях на Среднем Урале утратили четкость своего проявления, стали запутанными и спорными. Тектонически раздробленные породы (около рудных тел и на их простираниях) до отложения руды и замещающиеся рудой, сложно метасоматически изменены и часто превращены в тонкокристалловатые кварцево-серицитовые и кварцево-хлорито-серицитовые сланцы. По сохранившимся в таких сланцах сильно раздавленным и уплощенным обломкам исходную породу не всегда основательно относят к пирокластам, т. е. к туфам со всей вытекающей отсюда логикой для структурных и генетических построений и, в частности, для «реставрации» вулканических построек центрального типа.

Контактовый или региональный метаморфизм высокотемпературных ступеней, где они проявились, изменили до неузнаваемости не только колчеданные руды, но и вмещающие вулканогенно-осадочные породы, претерпевшие до этого зеленокаменный метаморфизм и гидротермально измененные сильно или слабо в связи с рудоотложением. За счет таких пород образовались роговики и близкие к ним породы, в которых присутствуют биотит, роговая обманка, гранат, антофиллит, андалузит и т. д. Таким образом, видоизмененными и замаскированными оказались не только дизъюнктивные тектонические нарушения — места ло-

кализации оруденения, но и геохимические ореолы и ореолы первичных гидротермальных изменений в породах, связанных с процессом рудоотложения. Следовательно, в таких случаях обычные поисковые признаки на колчеданные руды отсутствуют. Примером этому являются Тарньерское месторождение на Северном, а Маукское на Среднем Урале и месторождения им. 50 лет Октября, Приорское и другие в Северных Мугоджарах.

Таким образом, совокупность фактов, приведенных в данной работе и свидетельствующих о метаморфизме колчеданных руд и в целом месторождений на Урале, имеет большое теоретическое и прикладное значение. Учет таких фактов позволяет понять, как в прошлом во многом схожие месторождения, образовавшиеся при одинаковых или близких условиях, стали совсем непохожими друг на друга, как видоизменены и замаскированы дизъюнктивные тектонические нарушения — места локализации оруденения, в какой степени оказались преобразованными не только руды, но и первичные геохимические ореолы и ореолы гидротермально измененных пород — один из наиболее надежных поисковых признаков.

Без учета метаморфизма месторождений и вмещающих их пород трудно, а в ряде районов (районы месторождений Тарньерского, Маукского, Северные Мугоджары) невозможно надежным образом установить закономерности размещения самих месторождений и эффективно осуществлять поиски. Следовательно, метаморфизм колчеданных месторождений, выявлению и характеристике признаков которого посвящена большая часть нашей работы, имеет прямое и непосредственное отношение к металлогеническим обобщениям и прогнозированию в различных масштабах, а также к поискам новых месторождений.

Выражая результаты наших исследований в тезисной форме, можно сделать следующие выводы научного и прикладного значения:

1. Колчеданные руды на Урале первоначально отлагались главным образом в виде тонкодисперсных масс простого и сложного состава из растворов типа коллоидных в условиях, исключаящих резкую дифференциацию вещества. Указанные растворы, вероятно, образовывались из пересыщенных истинных растворов в местах перепадов давления и температуры.

2. После выпадения из растворов тонкодисперсные массы руд преобразовывались в стадию диагенеза, когда геологические условия в месторождениях заметно не менялись. Вследствие диагенетических преобразований тонкодисперсные рудные массы превращались в зернистые агрегаты сульфидов с характерными текстурами и структурами.

3. Зернам и кристаллам пирита, образовавшимся в стадию диагенеза, присуща весьма четкая зональность роста, которая явилась предметом специальных исследований многих авторов. Природа такой зональности следующая. Питательной средой

для роста указанных зерен и кристаллов были субмикроскопические сферической формы частицы дисульфида железа. Такие частицы адсорбировались поверхностями растущих зерен и кристаллов пирита, вращались в последние. Однако скорость роста зерен и кристаллов указанного минерала была относительно большой и наиболее крупные из частиц сохранялись, перекрываясь новыми слоями таких же и более мелких частиц. Вследствие таких условий роста зерен и кристаллов пирита внутреннее их строение оказывалось далеким от совершенства. В них сохранились слои (в плоскостных срезах зерен и кристаллов — это трех-, четырех-, пятиугольники и другие геометрические фигуры), в которых тонкодисперсный дисульфид железа оказался недораскристаллизованным в пирит. Такие слои при травлении минерала и проявляются в виде грубых зон роста.

4. Пройдя стадию диагенеза, руды вместе с вмещающими их породами подвергались метаморфизму:

1) контактовому, связанному со среднепалеозойскими гранитоидными интрузиями габбрового ряда. Признаки этого метаморфизма в рудах следующие: главные рудные минералы — пирит, сфалерит и халькопирит замещались пирротином, пирротин и другие сульфиды замещались магнетитом. Минералы перекристаллизовывались и в них исчезала зональность роста. Пирит в той или иной мере стал кобальтоносным. В рудах появились незначительные количества новообразований молибденита. Сфалерит вследствие растворения в нем большого количества железа приобрел темную окраску. Вмещающие породы превращены в роговики и близкие к ним образования, в состав которых входят биотит, антофиллит, андалузит, кордиерит и другие минералы. Многие из этих минералов наложены на руды.

2) региональному, сопряженному с позднепалеозойскими гранитными интрузиями и складчатостью, в условиях фации зеленых сланцев и фации амфиболитовой.

В условиях зеленосланцевой фации метаморфизма в колчеданных рудах вследствие динамических напряжений (одностороннее давление) проявлялись хрупкие и пластические деформации; рудные тела разлизывались. Происходила перекристаллизация рудных агрегатов, и они становились полнокристаллическими. Зоны роста в зернах пирита и сфалерита исчезали. Сфалерит утрачивал темную окраску и превращался в светлоокрашенный клейофан. Перекристаллизация была на месте и с переотложением вещества как в пределах рудных тел, так и во вмещающие породы. Рудные минералы замещали друг друга (пирит замещался сфалеритом и халькопиритом, сфалерит пиритом, халькопиритом и т. д.), и сами замещались нерудными минералами — хлоритом, серицитом, кварцем, хлоритомом, стильномеланом и другими. Замеще-

ния были интенсивными и часто псевдоморфными. В рудах исчезли совсем или почти совсем прежние текстуры и структуры и возникли новые. Особенно широкое развитие получили полосчатые текстуры и меньшее — гнейсовидные и сланцеватые. Кроме того, в рудах образовались линейные структуры, которые ориентированы одинаково с такими же структурами во вмещающих породах. Во многих месторождениях на руды наложены растворы, связанные с гранитами позднепалеозойского возраста. Такие растворы привнесли в руды незначительные количества урана и других элементов (олово, бор, мышьяк, золото, серебро) и обусловили замещение халькопирита борнитом, борнита халькозином. В рудах, помимо этого, возникли новообразования станнина, люцонита, аргентита, штрмейерита, самородных золота и серебра, турмалина, акцессорного давидита (?) и других минералов. Альфа-излучение урана обусловило образование двориков в рудных минералах и фотолюминесценцию сфалерита. После образования двориков в минералах руды подвергались динамическим напряжениям. Вследствие деформаций и перекристаллизации минералов дворики в них исчезали.

Вмещающие породы превращались в кварцево-хлоритовые, кварцево-хлорито-серицитовые, кварцево-серицитовые сланцы.

Признаки метаморфизма колчеданных руд в условиях амфиболитовой фации и в условиях контактового метаморфизма практически совпадают, т. е. по главным рудным минералам — пириту и другим развивался цирротин, по цирротину и другим сульфидам — магнетит, на руды накладывался биотит и т. д. Разница в проявлениях указанных типов метаморфизма на месторождениях устанавливается по геологическим данным.

5. Вследствие метасоматических замещений, обусловленных метаморфизмом и широко проявлявшихся в рудах, в растворы переходили большие количества различных химических элементов. Растворы взаимодействовали как с рудами, так и с вмещающими породами. Создавались условия для дифференциации и перераспределения вещества и внутри рудных тел, и за их пределами. В результате в одних случаях рудные тела обеднялись полезными компонентами, а в других — обогащались.

6. Смена парагенетических ассоциаций минералов в метаморфизованных рудах обусловлена не первичным рудоотложением, а метаморфизмом, что имеет принципиальное научное и прикладное значение. В результате такой смены в колчеданных рудных телах возникла вторичная зональность (не связанная с гипергенезом), которая маскирует и искажает первичную зональность. Без учета этого факта не могут быть сделаны правильные выводы о ходе процесса первичного рудоотложения — порядок выделения минералов и их ассоциаций, стадии оруденения и т. д. В каждом конкретном случае должны учитываться характер и степень метаморфизма руд и признаки их регенерации.

7. Сульфидная минерализация (рудопроявления) в зеленокаменных породах не всегда первична, т. е. связана с процессом первичного рудоотложения. К оценке такой минерализации надо подходить осторожно, так как она может являться результатом переотложения руд при метаморфизме и масштабы ее будут чаще незначительными.

8. Изменения, обусловленные метаморфизмом, коснулись как колчеданных руд, так и вмещающих их пород. Следовательно, в той или иной степени изменился набор, количественные соотношения, распределение в пространстве химических элементов, которые были привнесены в породы в связи с процессом первичного рудоотложения и гидротермальной их проработкой. Иными словами, измененными оказались и первичные геохимические ореолы около месторождений. Вследствие дифференциации, переноса и переотложения вещества при метаморфизме вблизи месторождений и в удалении от них (вверх по разрезу) могли появиться новые геохимические ореолы, которые качественно будут отличаться от первичных ореолов. Широко практикуемые работы и исследования по геохимическим ореолам с целью обнаружения новых месторождений должны учитывать характер и степень метаморфизма не только руд, но и вмещающих пород, среди которых последние залегают.

9. В результате радикальных изменений при контактовом метаморфизме и метаморфизме региональном в условиях амфиболитовой фации колчеданные месторождения утрачивали некоторые из десяти характерных для них признаков (Иванов, 1953з) и приобретали ряд новых признаков, присущих, например, контактово-метасоматическим месторождениям. Такие новые признаки не могут служить надежным основанием для отнесения месторождений к неколчеданному типу.

10. Оценка колчеданного оруденения площадей развития вулканогенно-осадочных пород, претерпевших зеленокаменное перерождение, должна производиться не только по уже известным признакам, но и при учете радикальных изменений этих пород, обусловленных метаморфизмом, особенно контактовым и региональным в условиях амфиболитовой фации.

11. В сильно метаморфизованных рудах значительно может быть изменен минеральный состав и примеси в пирите. В них (рудах) не сохраняются первичные тонкие смеси и прорастания, например, сфалерита и халькопирита. Однако в некоторых объектах, как, например, в Гарньерском месторождении в отдельных участках рудных тел в уже перекристаллизованный крупнозернистый сфалерит по трещинкам спайности проникали халькопирит и замещающий его пирротин. В результате образовались тонкие прорастания, которые мало чем отличаются от прорастаний в неметаморфизованных или слабо метаморфизованных рудах. При экономической оценке руд указанные факты должны приниматься во внимание.

12. Новая информация, полученная при изучении руд колчеданных месторождений Урала, важна не только потому, что в этих рудах она в деталях раскрывает сущность и последовательность сложных изменений, обусловленных диагенезом и метаморфизмом. Эта информация имеет более широкое и общее значение. Впервые для колчеданных месторождений Урала показаны последовательность замещения в широких масштабах рудных минералов нерудными. Особенно интересны данные по радиоактивным дворикам в минералах и фотолюминесценции сфалерита. Такие данные, во-первых, интересны с точки зрения методических приемов исследования минеральных агрегатов (они впервые освещают в колчеданных рудах ряд взаимосвязанных явлений, обусловленных метаморфизмом); во-вторых, указывают на характер и относительное время влияния гранитных интрузий на колчеданные руды, т. е. речь идет о решении одного из больших вопросов геологии Урала; в третьих, показывают, что методика, при помощи которой получены эти данные, может быть с успехом применена для изучения не только колчеданных руд, но и других объектов и не только на Урале.

Мы даем себе полный отчет в том, что выполненные нами исследования не охватывают всей проблемы диагенеза и метаморфизма колчеданных руд на Урале. Однако эти исследования показывают, сколь разнообразные и сложные изменения обнаруживаются в этих рудах, которые после своего образования просуществовали длительное геологическое время. На Урале есть месторождения и других руд — железа, титана, хрома и т. д. Эти руды также просуществовали длительное время и несомненно претерпевали изменения, теоретическое и практическое значение которых едва ли можно оспаривать. Изучение, например, ильменита из различных месторождений и пород показало, что этот широко распространенный в природе титансодержащий минерал при метаморфизме претерпевал такие изменения, при которых по нему образовывались рутил, гематит и магнетит (Ярош, 1955).

Кроме Урала, и в других провинциях нашей страны есть колчеданные месторождения. Проводя свои исследования, мы для сравнения только частично коснулись небольшого материала по ряду Закавказских, Алтайских, Казахстанских месторождений и одному из месторождений Бурятии. Во всех случаях были обнаружены признаки изменений, которые наблюдаются и в рудах уральских колчеданных месторождений.

- Амирасланов А. А.* К вопросу о фазах оруденения в уральских колчеданных месторождениях.— Проблемы сов. геол., 1934, № 7.
- Амирасланов А. А.* Некоторые соображения о генезисе колчеданных месторождений Урала.— Мин. сырье, 1935, № 8.
- Амирасланов А. А.* Минералогическая характеристика колчеданных месторождений Урала и вторичные процессы в них.— Труды Всес. научно-исслед. ин-та минер. сырья, 1937, вып. 121.
- Амирасланов А. А.* Структурные факторы, контролирующие локализацию колчеданных месторождений Советского Союза.— Сб. «Вопросы геологии Азии», т. 2. Изд-во АН СССР, 1955.
- Афанасьев Л. М.* Геолого-петрографическое исследование измененных боковых пород колчеданных месторождений Красноуральска, Калаты и Дегтярки на Среднем Урале.— Труды Геол. ин-та АН СССР, 1936, 4.
- Афанасьев Л., Псаенко М.* Геология и медные месторождения Красноуральского района.— Труды Моск. геол.-разв. ин-та им. Орджоникидзе, 1936, 1.
- Барсанов Г. П., Шевелева В. А.* Материалы по изучению люминесценции минералов.— Труды Мин. музея АН СССР, 1953, вып. 5.
- Батурич Г. Н.* Глубоководные рудные осадки гидротермального генезиса.— В кн. «История мирового океана. Геологическое строение, происхождение, развитие». Изд-во «Наука», 1971.
- Белова Н. В.* Некоторые особенности кристаллохимии сульфидов.— В кн. «Вопросы петр. и минер.», т. II. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1953.
- Берстнева З. Я., Каргин В. А.* О механизме образования коллоидных частиц.— Успехи химии, 1955, 24, вып. 3.
- Бетехтин А. Г.* Классификация текстур и структур руд.— Изв. АН СССР, серия геол., 1937, № 1 и 2.
- Бетехтин А. Г.* Парагенезис рудных минералов в системах Fe—S—O и Cu—Fe—S—O.— Изв. АН СССР, серия геол., 1950, № 5.
- Бетехтин А. Г.* Парагенетические соотношения и последовательность образования минералов.— Записки Всес. мин. об-ва, 1951, ч. 80, № 2.
- Бетехтин А. Г.* Гидротермальные растворы, их природа и процессы рудообразования.— В кн. «Основные проблемы в учении о магматогенных рудных месторождениях». Изд-во АН СССР, 1953.
- Бетехтин А. Г. и др.* Текстуры и структуры руд. Госгеолтехиздат. 1958.
- Бетехтин А. Г., Генкин А. Д., Филимонова А. А., Шадлуи Т. Н.* Структурно-текстурные особенности эндогенных руд. Изд-во «Недра», 1964.
- Берзина И. Г., Берман И. Б., Гурвич М. Ю., Флеров Г. Н., Шимелевич Ю. С.* Определение концентрации урана и его пространственного распределения в минералах и горных породах.— Атомная энергия, 1967, 23, вып. 6.
- Бородаевская М. Б.* Некоторые вопросы структурного картирования колчеданных полей восточного склона Урала.— Труды ЦНИГРИ, 1959, вып. 29.
- Бородаевская М. Б.* Структурные условия рудных тел в колчеданных месторождениях Южного Урала.— В кн. «Закономерности размещения полезных ископаемых», т. V. Изд-во АН СССР, 1962.
- Бородаевская М. Б.* Некоторые вопросы генезиса медноколчеданных залежей Южного Урала.— Труды ЦНИГРИ, 1963, вып. 52.

- Бородаевская М. Б., Курбанов Н. К.* Некоторые особенности гидротермального метаморфизма основных эффузивов в связи с формированием колчеданных руд на примере Молодежного месторождения (Южный Урал).—Труды ЦНИГРИ, 1963, вып. 57.
- Бородаевская М. Б.* 1. Структурные типы медноколчеданных месторождений Урала.— В кн. «Закономерности размещения полезных ископаемых», т. VII. Изд-во «Наука», 1964.
- Бородаевская М. Б.* 2. Соотношение колчеданного оруденения с магматизмом и некоторые вопросы генезиса колчеданных руд на примере Южного Урала. Межд. геол. конгресс, XXII, сессия. Доклады сов. геологов. Проблема 5. Проблемы генезиса руд. Изд-во «Недра», 1964.
- Бородаевская М. Б.* Возрастные соотношения колчеданных руд Южного Урала с вмещающими их комплексами вулканогенных пород.— В кн. «Материалы межвед. совещ. по проблеме «Рудоносность вулканогенных формаций». Изд-во «Недра», 1965.
- Бородаевская М. Б.* 1. Соотношение колчеданного оруденения с элементами пликвативной и дизъюнктивной тектоники.— Труды ЦНИГРИ, 1966, вып. 66.
- Бородаевская М. Б.* 2. Положение колчеданных залежей в стратиграфическом разрезе вулканогенных толщ.— Труды ЦНИГРИ, 1966, вып. 66.
- Бородаевская М. Б.* и др. Особенности геологического строения Гайского рудного поля и некоторые вопросы генезиса медноколчеданного оруденения.— В кн. «Материалы по геологии и полез. ископ. Оренбургской области», вып. 2. Челябинск, 1967.
- Бородаевская М. Б. и др.* Геологическое строение гайского рудного поля и условия локализации в нем медноколчеданного оруденения (Южный Урал).— Труды ЦНИГРИ, 1968, вып. 83.
- Бородаевская М. Б., Кривцов А. И.* О роли коллоидных растворов в формировании гидротермально-метасоматических пород, вмещающих колчеданные залежи (на примере некоторых месторождений Южного Урала).— В кн. «Материалы к II конференции по околорудному метасоматозу». Л., 1966.
- Бородаевская М. Б., Кривцов А. И.* Роль коллоидных растворов при формировании околорудовозмененных пород на примере сульфидных месторождений, связанных с вулканогенными формациями проблемы метасоматоза (Труды II конференции по околорудному метасоматозу). Изд-во «Недра», 1970.
- Бородаевская М. Б., Кривцов А. И., Курбанов Н. К., Ширый Е. П.* Некоторые вопросы структурно-формационного районирования палеовулканических колчеданосных областей (Южный Урал).— Труды ЦНИИРИ, 1970, вып. 92.
- Бородаевская М. Б., Курбанов Н. К.* Соотношение колчеданного оруденения с субвулканическими телами и малыми интрузиями.— Труды ЦНИГРИ, 1966, вып. 66.
- Бородаевская М. Б., Курбанов Н. К., Кривцов А. И., Сагдо В. В., Ширый Е. П., Конгарь Е. С.* Закономерности размещения колчеданных месторождений на Южном Урале.— Изв. АН СССР, серия геол., 1969, № 10.
- Бородаевская М. Б., Перижняк И. А., Фоминых А. Ф., Требухин В. С.* Новые данные о геологическом строении Гайского рудного поля (Южный Урал).—Труды ЦНИГРИ, 1965, вып. 63.
- Бородаевская М. Б., Ракчеев А. Д.* Метаморфизм магматических комплексов Магнитогорского и южной части Тагильского мега-синклиория.— В кн. «Палеозойский вулканизм и колчеданные месторождения Южного Урала». Изд-во Моск. ун-та, 1968.
- Бородаевская М. Б., Ракчеев А. Д., Вахрушев М. И., Милецкий Б. Г., Новгородова М. И.* О полигенном характере медноколчеданных месторождений в Северных Мугоджарах.— Докл. АН СССР, серия геол., 1970, 194, № 2.
- Бородаевская М. Б., Требухин В. С., Конгарь Е. С.* Реконструкция девонских палеовулканов в Гайском рудном районе и их рудоносность.— Труды ЦНИГРИ, 1970, вып. 92.
- Бородаевская М. Б., Шмидт А. И.*

- Условия образования колчеданных месторождений на примере Южного Урала.— Труды ЦНИГРИ, 1967, вып. 75.
- Буслаев Ф. П., Образцов О. М.* О хлоритоиде из Гайского месторождения (Южный Урал).— Труды Ин-та геологии и геохимии УФАИ СССР. Минералы месторождений полезных ископаемых Урала. Мин. сб., 1968, № 8.
- Буслаев Ф. П., Овчинников Л. Н.* Об искажении значений абсолютного возраста слюд в связи с их метаморфизмом.— В сб. «Вопросы датировки древнейших (катархейских) геологических образований и основных пород». Изд-во «Наука», 1967.
- Буслаев Ф. П., Ярош П. Я.* Хлоритоид из Зюзельского колчеданного месторождения. Минералы изверженных горных пород и руд Урала. М.—Л., изд-во «Наука», 1967.
- Вахромеев С. А.* О новых минералах в рудах колчеданных месторождений Урала.— Записки Всеросс. мин. об-ва, 1942, № 3—4.
- Вахромеев С. А.* Минералогический состав и структуры руд колчеданных месторождений Урала и некоторые данные об их генезисе.— Записки Ур. геол. об-ва, 1948, вып. 1.
- Вахромеев П. С.* О брекчиевых текстурах руд Учалинского колчеданного месторождения.— Труды ГГИ УФАИ СССР, 1955, вып. 26.
- Вахромеев И. С.* О возрасте диабазовых порфиритов Карамалыташского альбитофира-диабазового комплекса и колчеданного оруденения в Сибайской антиклинали (Южный Урал).— Изв. АН СССР, серия геол., 1967, № 3.
- Вахромеев И. С.* Структурно-геологические позиции рудных районов и рудных полей с колчеданным оруденением в Магнитогорском погружении.— В кн. «Материалы по геологии и геофизике рудных месторождений восточного склона Южного Урала». Уфа, 1969.
- Вертушков Г. Н.* Жильный кварц из жил восточного склона Урала.— Докл. АН СССР, 1946, 51, № 1.
- Вертушков Г. Н.* Метаморфизм жильного кварца.— Труды Свердл. горного ин-та им. В. В. Вахрушева. Материалы по геологии Урала, 1955, вып. 22.
- Вертушков Г. Н.* Гранитизация железистых кварцитов из восточной контактовой зоны Уфалейского гранитного массива.— В кн. «Магматизм и связь с ним полезных ископаемых». Труды II Петрогр. совещ. Госгеолтехиздат, 1960.
- Виноградов В. И.* Распределение изотопов серы в минералах рудных месторождений.— В кн. «Изотопы серы и вопросы рудообразования». Изд-во «Наука», 1967.
- Винклер Г.* Генезис метаморфических пород. Изд-во «Мир», 1969.
- Воюцкий С. С.* Курс коллоидной химии. Изд-во «Химия», 1964.
- Войткевич Г. В., Хайретдинов И. А., Гриценко В. А., Прозоров В. Г., Чемутова В. И.* О роли микроорганизмов в процессе окисления пирротина (на примере месторождения Медвежьего, Восточный Саян).— Геология рудных месторождений, 1968, № 1.
- Галдин Н. Е.* Структурные условия рудоотложения на Карабашских колчеданных месторождениях.— Сов. геология, 1961, № 8.
- Генкин А. Д., Логинов В. П., Органова Н. И.* О взаимоотношениях и особенностях размещения гексагональных и моноклинных пирротинов в рудах.— Геология рудных месторождений, 1965, № 3.
- Герман А. К., Русакова Л. Д.* Медноколчеданное месторождение Блява на Южном Урале.— В кн. «Материалы по геологии и полезным ископаемым Южного Урала», вып. 3. Свердловск, 1962.
- Герман-Русакова Л. Д.* Миграция элементов в зоне окисления Блявинского медноколчеданного месторождения на Южном Урале.— Труды Ин-та геол. рудных местор., петрографии, минералогии и геохимии, 1962, вып. 68.
- Горелов Н. А.* Маукское медноколчеданное месторождение.— В сб. «Материалы по геологии и полезным ископаемым Урала», вып. 7. Свердловск, 1958.
- Горжевский Д. И., Козеренко В. Н.* Связь эндогенного рудообразования с магматизмом и метаморфизмом. Изд-во «Недра», 1965.
- Горох А. В.* Метакolloидные колчеданные руды Красногвардейского месторождения (Средний Урал).— Труды ГГИ УФАИ СССР, 1959, вып. 42.

- Григорьев Д. П.* Закономерности образования сульфидов в колчеданных месторождениях Среднего Урала.— Записки Всес. мин. об-ва, 1948, вып. 1.
- Григорьев Д. П.* К дискуссии о медной минерализации колчеданных месторождений.— Записки Всес. мин. об-ва, 1949, ч. 78, № 1.
- Григорьев Д. П.* Перекристаллизация минералов.— Записки Всес. мин. об-ва, 1956, ч. 85, № 2.
- Грицаенко Г. С. и др.* Электронная микроскопия минералов. Изд-во АН СССР, 1961.
- Грищенко Л. Н.* Изотопный состав серы сульфидов медноколчеданных месторождений Сибай (Южный Урал).— Геология рудных месторождений, 1963, № 4.
- Гудалин Г. Г., Ковалев Ф. И.* Оценка месторождений при поисках и разведке. Вып. 6. Медь. Госгеол-издат, 1951.
- Дианова Т. В.* Вулканогенные горные породы восточной части Павдинского района.— Труды ГГИ УФАИ СССР, 1958, вып. 33.
- Динс Дж. и Винйард Дж.* Радиационные дефекты в твердых телах. ИЛ, 1960.
- Дологов Ю. А.* Роль коллоидов в образовании кварца колчеданных месторождений Среднего Урала.— В сб. «Проблемы геохимии», вып. 1. Изд. Львовск. ун-та, 1959.
- Домарев В. С.* Месторождение «Рябининская разведка» на Урале.— Изв. Главн. геол.-развед. упр., 1931, вып. 44.
- Дюпарк Л., Сигг Г.* Медные месторождения в Сысертской даче на Урале.— Труды Геол. ком., новая серия, 1914, вып. 101.
- Заварицкий А. Н.* Геологический очерк медных руд на Урале. Часть 1. Колчеданные месторождения Урала.— Труды Геол. ком., новая серия, 1927, вып. 173.
- Заварицкий А. Н.* Колчеданное месторождение Блява в Южном Урале и колчеданные залежи Урала вообще.— Труды Геол. ин-та АН, 1936, 5.
- Заварицкий А. Н.* Некоторые основные вопросы геологии Урала.— Изв. АН СССР, серия геол., 1941, № 3.
- Заварицкий А. Н. 1.* О некоторых особенностях колчеданных месторождений Блява, Сибай, Учаль.— Изв. АН СССР, 1943, серия геол., № 1.
- Заварицкий А. Н. 2.* О некоторых доводах в пользу дорудного и послерудного метаморфизма пород, среди которых залегают колчеданные месторождения.— Изв. АН СССР, серия геол., 1943, № 1.
- Заварицкий А. Н. 3.* О генезисе колчеданных месторождений.— Изв. АН СССР, серия геол., 1943, № 3.
- Заварицкий А. Н.* Метаморфизм и метасоматоз в уральских колчеданных месторождениях.— В кн. «Колчеданные месторождения Урала». Изд-во АН СССР, 1950.
- Заварицкий В. А.* Метаморфизм зеленокаменных пород, вмещающих колчеданные месторождения им. III Интернационала (бывш. Сандonato) на Среднем Урале.— В кн. «Колчеданные месторождения Урала». Изд-во АН СССР, 1950.
- Замятин П. М.* Богомоловская группа колчеданных месторождений на Урале.— Мин. сырье и цветные металлы, 1929, № 5-6.
- Захаров Е. Е.* Первичные полосчатые структуры колчеданных руд восточного склона Урала.— Труды Ин-та прикл. минер., 1927, вып. 32.
- Захаров Е. Е., Юшко С. А.* Карпунское медно-цинковое месторождение на Среднем Урале. Изд-во АН СССР, 1936.
- Знаменский Н. Д.* Гранитоиды габбровой формации Среднего Урала.— Труды ГГИ УФАИ СССР, 1966, вып. 71.
- Иванов С. Н.* Метаморфизм уральских колчеданных месторождений.— Сов. геология, 1939, № 2.
- Иванов С. Н.* Новые данные о генезисе колчеданных месторождений Среднего Урала.— Изв. АН СССР, серия геол., 1943, № 1.
- Иванов С. Н.* Опыт изучения геологии и минералогии колчеданных месторождений, т. 1. Дегтярское месторождение.— Труды ГГИ УФАИ СССР, 1945, вып. 8.
- Иванов С. Н.* Сибайское месторождение. Опыт изучения геохимии и минералогии колчеданных месторождений.— Труды ГГИ УФАИ СССР, 1947, вып. 11.
- Иванов С. Н. 1.* Изучение зон роста зерен пирита в колчеданных ме-

- сторождениях Урала.— Записки Всес. мин. об-ва, 1950, № 2.
- Иванов С. Н.* 2. Критика работы А. В. Пэка «Структура и некоторые вопросы генезиса Левихинских колчеданных месторождений на Среднем Урале».— В сб. «Колчеданные месторождения Урала». Изд-во АН СССР, 1950.
- Иванов С. Н.* 1. О характерных особенностях рудных месторождений колчеданного типа.— Труды ГГИ УФАН СССР, 1955, вып. 26, мин. сб. № 3.
- Иванов С. Н.* 2. Еще о зонах роста кристаллических зерен шпирита из колчеданных месторождений Урала.— Записки Всес. мин. об-ва, серия вторая, 1955, ч. 84, вып. 4.
- Иванов С. Н.* 3. О характерных особенностях рудных месторождений колчеданного типа.— Труды ГГИ УФАН СССР, 1955, вып. 26.
- Иванов С. Н.* О генезисе колчеданных месторождений Урала.— Докл. АН СССР, 1957, 112, № 4.
- Иванов С. Н.* 1. Некоторые основные проблемы размещения сульфидного оруденения в колчеданных провинциях.— В кн. «Закономерности размещения полезных ископаемых», т. II. Изд-во АН СССР, 1959.
- Иванов С. Н.* 2. Обсуждение некоторых современных вопросов образования колчеданных месторождений Урала.— Труды ГГИ УФАН СССР, 1959, вып. 43.
- Иванов С. Н.* 3. Некоторые проблемы локализации рудных месторождений колчеданного типа.— Труды ГГИ УФАН СССР, 1959, вып. 32.
- Иванов С. Н.* Факторы размещения колчеданных месторождений в геосинклинальных системах и их отражение на металлогенических картах (на примере Урала).— Труды Горно-геол. ин-та УФАН СССР, 1962, вып. 58.
- Иванов С. Н.* 1. Некоторые вопросы базальтоидной металлогении Урала.— В кн. «Закономерности размещения полезных ископаемых», т. VII. Изд-во «Наука», 1964.
- Иванов С. Н.* 2. Генезис рудных месторождений колчеданного типа в связи с развитием геосинклинального магматизма и метаморфизма. Межд. геол. конгресс, XXII сессия. Доклады советских геологов. Проблема 5. Проблемы генезиса руд. Изд-во «Недра», 1964.
- Иванов С. Н.* О причинах образования гидротермальных рудных месторождений.— В кн. «Закономерности размещения полезных ископаемых», т. IX. Изд-во «Наука», 1970.
- Иванов С. Н., Егоров П. И.* Карабашские месторождения медноколчеданных руд.— Материалы по геологии и полезным ископаемым урала, вып. 7. Свердловск, 1958.
- Иванов С. Н., Курицина Г. А., Ходякович А. Н.* Новые данные о генезисе колчеданных месторождений урала. Междунар. геол. конгресс, XXI сессия. Доклады советских геологов. Проблема 16, генетические проблемы руд, 1960.
- Иванов С. Н., Логинов В. П.* О связи колчеданных месторождений Урала с вулканогенными формациями.— В кн. «Материалы Межвед. совещания по проблеме «Рудоносность вулканогенных формаций»». Изд-во «Недра», 1965.
- Иванов С. Н., Меркулов М. И.* Дегтярское колчеданное месторождение. ОНТИ, 1937.
- Иванов С. Н., Нечеухин В. М.* О времени зеленокаменных изменений и происхождении натриевых и существенно калиевых магматических серий в геосинклинальных образованиях Урала.— Докл. АН СССР, 1964, 157, № 3.
- Иванов С. Н., Нечеухин В. М.* О соотношении колчеданного оруденения и зеленокаменных изменений рудовмещающих вулканогенных толщ.— Геология рудных месторождений, 1969, № 1.
- Иванкин П. Ф.* Подметаллические месторождения Прииртышья. Госгеолтехиздат, 1957.
- Ищенко Д. И.* О хлоритоиде в породах Кривого Рога.— Мин. сб. Львовск. геол. об-ва, 1957, № 11.
- Каблуков И. А. и др.* Физическая и коллоидная химия, 1949.
- Карасик М. А.* Об условиях образования тонких выделений халькопирита, пирротина и сфалерита в магнетитовых рудах контактово-метасоматических месторождений.— Труды ГГИ УФАН СССР, 1955, вып. 26, мин. сб., № 3.
- Ковалев Ф. И.* Генезис колчеданных и золото-баритовых месторожде-

- ний Баймакского района.— Сов. геология, 1944, сб. 2.
- Комовский Г. Ф., Ложникова О. Н.* Люминесцентный анализ при изучении руд и минералов. Госгеол-издат, 1954.
- Коржинский Д. С.* Очерк метасоматических процессов.— В кн. «Основные проблемы в учении о магматогенных рудных месторождениях». Изд-во АН СССР, 1953.
- Коржинский Д. С.* Вопросы колчеданного оруденения в вулканогенных толщах.— Труды Первого Уральского петрогр. совещ., т. II. Свердловск, 1963.
- Котляр В. И.* Типы месторождений, связанные с палеовулканизмом.— В кн. «Материалы межвед. совещания по проблеме «Рудоносность вулканогенных формаций». Изд-во «Недра», 1965.
- Крейгер В. М., Аристов В. В., Волюнский И. С., Крестовников А. И., Кучинский В. В.* Поведение золота в зоне окисления золотосульфидных месторождений. Госгеол-техиздат, 1958.
- Крейгер В. М., Роговер Г. Б.* Блявинское медноколчеданное месторождение.— Проблемы сов. геол., 1935, 5, № 6.
- Кропачев С. М., Бородаев Ю. С., Гончарова Т. Я., Зарайский Г. Н., Старостин В. И., Яковлев Г. Ф.* Блявинский рудный район.— В кн. «Палеозойский вулканизм и колчеданные месторождения Южного Урала». Изд-во Моск. ун-та, 1968.
- Кузнецов Е. А.* Тектоника Среднего Урала. Изд-во АН СССР, 1941.
- Кузнецов Е. А.* Очерк метаморфизма на Урале.— Труды Первого Уральского петрогр. совещ., т. III. Свердловск, 1963.
- Куллеруд Г., Йодер Х.* Стабильные отношения пирита в системе Fe—S. В кн. «Проблемы эндогенных месторождений», вып. 3. Перевод с англ. Изд-во «Мир», 1966.
- Курек Н. Н., Наковник Н. И. и др.* Измененные окислительные породы и их поисковое значение.— Труды ВСЕГЕИ, 1953.
- Курицина Г. А.* Парагонит из кварцево-серпидиновых сланцев Красноуральских месторождений.— Труды ГГИ УФАН СССР, 1960, вып. 35.
- Кусков Н. Н., Куликов А. А.* Тарьерское колчеданное месторождение на Северном Урале.— Разведка и охрана недр, 1967, № 7.
- Кюри Д.* Люминесценция кристаллов. ИЛ, 1961.
- Лазаренко Е. К.* Минералогия медно-цинковых месторождений Среднего Урала. Изд-во Львовск. ун-та, 1947.
- Лазаренко Е. К.* О генезисе медно-цинковых месторождений Среднего Урала.— Ученые записки Львовск. ун-та, серия геол., 1953, вып. 6.
- Лазаренко Е. К.* Нерудные минералы в колчеданных залежах Урала.— Ученые записки Львовск. ун-та, 1954, т. 31, серия геол., вып. 7.
- Лазаренко Е. К.* Цинковые обманки колчеданных залежей Среднего Урала.— Ученые записки Львовск. ун-та, 1955, 35, серия геол., вып. 8.
- Лазаренко Е. К.* Сульфиды меди в колчеданных залежах Среднего Урала.— Ученые записки Львовск. ун-та, 1958, вып. 9.
- Лазаренко Е. К.* Геохимическая характеристика распределения элементов в медно-цинковых месторождениях Среднего Урала.— В сб. «Проблемы геохимии», вып. 1. Изд-во Львовск. ун-та им. Ивана Франко, 1959.
- Лебедев Л. М.* Метаколлоиды в эндогенных месторождениях. Изд-во «Наука», 1965.
- Ленных И. В.* Основные вопросы геологии колчеданных месторождений Южного Урала.— Труды ГГИ УФАН СССР, 1959, вып. 43.
- Логинов В. П.* Геология Кабанских колчеданных месторождений (Средний Урал) и некоторые черты их генезиса и метаморфизма.— В кн. «Колчеданные месторождения Урала». Изд-во АН СССР, 1950.
- Логинов В. П.* Алюмосилициты Кабанского колчеданного месторождения (Средний Урал).— Труды Ин-та геол. наук, 1951, вып. 134, серия рудных месторождений, № 15.
- Логинов В. П.* Закономерности локализации колчеданных месторождений на Среднем Урале и некоторые вопросы их генезиса.— В сб. «Закономерности размещения полезных ископаемых», т. 1, Изд-во АН СССР, 1958.

- Логонов В. П., Русинов В. Л., Колесова А. Н., Симбирягина З. П. Контактные взаимоотношения некоторых даек плагиоклазового порфирита с колчеданной рудой месторождения Лёвиха Южная (Средний Урал).— В кн. «Физико-химические проблемы формирования горных пород и руд», т. II, 1963.
- Лопатина Л. Н., Лосев Н. В., Смулов А. А. Экспериментальные данные по вопросу о поведении сульфидов Pb, Zn, Cu, Fe в коллоидных растворах при повышенных температурах.— Геол. рудных местор., 1960, № 4.
- Мак-Лин Д. Метаморфизм в металлах.— В кн. «Природа метаморфизма». Перевод с англ. Изд-во «Мир», 1967.
- Максенков В. Г., Лисов К. Ф. Ангидрит из Красногвардейского колчеданного месторождения на Урале.— Труды ГГИ УФАН СССР, 1953, вып. 20, мин. сб. № 2.
- Маркс В. А. О метаморфизме горных пород, вмещающих Маукское колчеданное месторождение на Среднем Урале.— Труды ГГИИ УФАН СССР, 1958, вып. 34.
- Маркс В. А. Метаморфизм альбит-эпидот-амфиболитовой фации горных пород зеленокаменной зоны в Верхне-Уфалейском районе на Среднем Урале.— В кн. «Метаморфизм горных пород главной вулканогенной зоны Урала». Изд-во «Наука», 1969.
- Мерлич Б. В. Некоторые данные о геологии колчеданных месторождений им. III Интернационала.— Изв. АН СССР, серия геол., 1945, № 4.
- Нарвайт Г. Э. Послемагматическое минералообразование и оруденение. В Западных Мугоджарах. Алма-Ата, Изд-во «Наука», 1971.
- Никитин В. В. Геологические исследования Центральной группы дач Верхне-Исетских заводов, Ревдинской дачи и Мурзинского участка, 1907.
- Обручев В. А. Рудные месторождения, ч. II. Росгеонефтеиздат, 1934.
- Овчинников Л. Н. Контактво-метасоматические месторождения Среднего и Северного Урала.— Труды ГГИ УФАН СССР, 1960, вып. 39.
- Овчинников Л. Н. Обзор данных по абсолютному возрасту геологических образований Урала.— Труды Первого Уральского петрогр. совещ., т. I. Свердловск, 1963.
- Овчинников Л. Н., Максенков В. Г. Об использовании термолуминесценции в геологии.— В сб., посвященный 70-летию А. П. Виноградова. Изд-во АН СССР, 1965.
- Овчинников Л. Н., Баранов Э. Н. Эндогенные геохимические ореолы колчеданных месторождений.— Геология рудных месторождений, 1970, № 2.
- Озеров Ю. К. К вопросу о соотношениях колчеданных рудных тел с дайками диоритовых порфиритов в месторождении им. III Интернационала (Средний Урал).— Труды ЦНИГРИ, 1959, вып. 29.
- Озеров Ю. К. Против одностороннего подхода к решению вопросов генезиса колчеданных месторождений.— Геология рудных месторождений, 1960, № 4.
- Озерова Н. А., Добровольская М. Г., Дудкина А. С. К вопросу об условиях формирования ртутно-колчеданной залежи вулкана Менделеева. Вулканизм и глубины Земли.— В кн. «Материалы III Всес. вулканогенического совещ., 28—31 мая, 1969». Изд-во «Наука», 1971.
- Остапенко Г. Т. Рекристаллизация минералов в условиях стресса.— Геохимия, 1968, № 2.
- Пейве А. В. Тектоника Североуральского бокситового пояса.— Материалы к познанию геологического строения СССР, новая серия, вып. 4. М., 1947.
- Первов В. П. 1. Кабанская группа медных месторождений.— Материалы по геологии и полезным ископаемым Урала, вып. 7. Свердловск, 1958.
- Первов В. П. 2. Красноуральская группа колчеданных месторождений.— Материалы по геологии и полезным ископаемым Урала, вып. 7. Свердловск, 1958.
- Перелаяв А. П. Руды Султановского колчеданного месторождения на Урале.— Труды ГГИ УФАН СССР, 1959, вып. 43.
- Перелаяв А. П., Прахова Е. В. Новые месторождения медных руд в восточной вулканогенной зоне Урала.— Труды ГГИ УФАН СССР, 1959, вып. 32.

- Петровская Н. В.* О минералогическом картировании при изучении колчеданных месторождений Урала.— Труды ЦНИГРИ, 1959, вып. 29.
- Петровская Н. В.* 1. О минеральных ассоциациях и некоторых условиях формирования колчеданных месторождений Южного Урала.— Геология рудных месторождений, 1961, № 2.
- Петровская Н. В.* 2. Ассоциация рудообразующих минералов, элементы строения рудных тел и некоторые черты генезиса Сибайского медноколчеданного месторождения (Южный Урал).— Труды ЦНИГРИ, вып. 40, 1961.
- Петровская Н. В.* О полосчатых текстурах руд Гайского и некоторых других медноколчеданных месторождений Южного Урала.— Труды ЦНИГРИ, 1963, вып. 52.
- Петровская Н. В.* О роли тектонических факторов в образовании полосчатых текстур колчеданных руд (на примере месторождений Южного Урала).— Геология рудных месторождений, 1964, № 4.
- Петровская Н. В.* Особенности минералогии руд и строения рудных тел Гайского месторождения.— Труды ЦНИГРИ, 1968, вып. 83.
- Петровская Н. В.* О роли деструкции и «гелевого метасоматоза» при формировании округлых и обломковидных обособлений сульфидов в колчеданных месторождениях Южного Урала.— Труды ЦНИГРИ, 1969, вып. 80.
- Петровская Н. В., Гриненко Л. Н.* Исследование изотопного состава элементов в связи с вопросами генезиса рудных месторождений.— Геология рудных месторождений, 1962, № 2.
- Петровская Н. В., Касьянов А. В.* Некоторые черты минералогии и генезиса Учалинского месторождения на Южном Урале.— Труды ЦНИГРИ, 1960, вып. 37.
- Платонов А. Н., Марфукин А. С.* Оптические спектры поглощения сфалеритов.— Записки Всес. мин. об-ва, 1968, ч. 97, вып. 3.
- Поткин Ф. М.* Медноколчеданные месторождения Кировградского района.— Материалы по геологии и полезным ископаемым Урала, вып. 7. Свердловск, 1958.
- Прахова Е. В.* О микротвердости пирита из колчеданных месторождений Урала.— Труды ГГИ УФАИ СССР. Минералы месторождений полезных ископаемых Урала, 1968, мин. сб. № 8.
- Прокин В. А.* Уральская петрографическая провинция магматических и метаморфических горных пород. Междунар. геол. конгресс, сессия XXI. Изд-во АН СССР, 1960.
- Прокин В. А.* Оценка колчеданных рудопроявлений по метасоматическим изменениям вмещающих пород (на примере Урала).— Сов. геология, 1967, № 9.
- Прокин В. А., Рудаков В. М.* Брекчиевидные руды Сибая.— Труды ГГИ УФАИ, 1959, вып. 43.
- Пронин А. А.* Основные тектонические структуры Урала и их происхождение.— Изв. АН СССР, серия геол., 1959, № 8.
- Пронин А. А.* О глубинной тектонике и образовании гранитов Урала. Межд. геол. конгресс, XXI сессия. Доклады сов. геол., 1960.
- Пронин А. А.* Главнейшие металлогенические эпохи и рудные формации Урала.— В сб. «Закономерности размещения полезных ископаемых», т. V. Изд-во АН СССР, 1962.
- Пронин А. А.* О связи тектонического и магматического процессов в геологической истории Урала.— Труды Первого Уральского петрогр. совещ., т. I. Свердловск, 1963.
- Пронин А. А.* Основные черты истории тектонического развития Урала. М.— Л., Изд-во «Наука», 1965.
- Пшеничный Г. П., Шадлуи Т. Н.* О полосчатых и сланцеватых текстурах руд Гайского месторождения на Южном Урале.— Геология рудных месторождений, 1962, № 6.
- Пишбрам К.* Окраска и люминесценция минералов. ИЛ, 1959.
- Пэк А. В.* Структура и некоторые вопросы генезиса колчеданных месторождений Среднего Урала.— Записки Уральск. геол. об-ва, 1948, вып. 1.
- Пэк А. В.* Структура и некоторые вопросы генезиса Левихинских колчеданных месторождений на Среднем Урале.— В сб. «Колчеданные месторождения Урала». Изд-во АН СССР, 1950.
- Ракчеев А. Д.* Метаморфизм пород

- зеленокаменной полосы и его отношение к колчеданному и медно-цинковому оруденениям в районе Южно-Кузнецкого месторождения на Среднем Урале.— Сов. геология, 1956, сб. 51.
- Ракчеев А. Д.* Закономерности размещения колчеданных тел на Урале (на примере Карабашской группы месторождений).— Сов. геология, 1962, № 7.
- Рамдор П.* Рудные минералы и их сростания. ИЛ, 1962.
- Реми Г.* Курс неорганической химии. Т. II. Изд-во «Мир», 1966.
- Рёслер Г. И., Бауман Л., Ланге Х., Фандрих К., Шеффлер Х.* Геосинклинальный магматизм и подводно-гидротермальные рудные месторождения.— В кн. «Геология и геохимия рудных месторождений». Труды XXIII межд. геол. конгресса. Изд-во «Мир», 1971.
- Роговер Г. Б.* Медноколчеданное месторождение Блява. ГОНТИ, 1939.
- Руденко Б. М.* Новые данные по геологии медноколчеданного месторождения «50 лет Октября».— Изв. АН КазССР, серия геол., 1968, № 3.
- Ручкин Г. В., Демис Ю. И.* Некоторые вопросы генезиса медноколчеданных месторождений Блявинского рудного поля (Южный Урал).— Сов. геология, 1969, № 1.
- Ручкин Г. В., Николайчук Г. В.* О зональности колчеданных месторождений Блявинского рудного поля (Южный Урал).— Геология рудных месторождений, 1968, № 6.
- Сергиевский В. М.* Проявления колчеданной минерализации к северу от Красноуральска.— Изв. АН СССР, серия геол., 1944, № 5.
- Сергиевский В. М.* Краткий геологический очерк меденосной вулканической зоны Урала.— В кн. «Геология и полезные ископаемые Урала», вып. 1. М.—Л., Госгеолтехиздат, 1947.
- Сергиевский В. М.* Колчеданные месторождения Урала.— Материалы по геологии местор. полезных ископ. СССР, 1953.
- Сергиевский В. М.* 1. Магматизм и металлогения Урала.— В сб. «Магматизм и связь с ним полезных ископаемых». Госгеолтехиздат, 1960.
- Сергиевский В. М.* 2. Магматизм и развитие тектонических структур Урала.— Материалы по геол. и полезным ископ. Южного Урала, 1960, вып. 2.
- Сергиевский В. М.* Основные закономерности развития тектонических структур, магматизма и металлогении Урала.— В кн. «Труды Первого Уральского петрогр. совещания», т. II. Свердловск, 1963.
- Сиренко Г. А., Хоткевич В. И.* Рентгенографическое изучение кинетики снятия искажений кристаллич. решетки пластически деформированных металлов.— ФММ, 1962, 14, 542.
- Скрипиль В. И.* О строении вулканогенных пород Гайского рудного поля и размещении в них колчеданного оруденения.— Геология рудных месторождений, 1961, № 1.
- Смирнов В. И.* Конвергентность колчеданных месторождений.— Вестник Моск. ун-та, 1960, № 2.
- Смирнов В. И.* Металлогения геосинклиналей.— В сб. «Закономерности размещения полезных ископаемых», т. 5. Изд-во АН СССР, 1962.
- Смирнов В. И.* Соотношение эндогенного и экзогенного рудообразования в субмаринных вулканогенных геосинклинальных комплексах. Межд. геол. конгресс, XXII сессия. Доклады советских геологов. Проблема 5. Проблемы генезиса руд. Изд-во «Недра», 1964.
- Смирнов В. И.* 1. Сульфидное рудообразование в субмаринных вулканогенных геосинклинальных комплексах.— В кн. «Материалы межвед. совещания по проблеме «Рудоносность вулканических формаций». Изд-во «Недра», 1965.
- Смирнов В. И.* 2. Геология полезных ископаемых. Изд-во «Недра», 1965.
- Смирнов Г. А.* 3. О палеографическом картировании Урала.— Труды Первого рабочего совещания по палеографии Урала. Свердловск, 1965.
- Смирнов В. И.* Рудные месторождения СССР за 50 лет Советской власти.— Геология рудных местор., 1967, № 5.
- Смирнов В. И.* Колчеданные месторождения.— В кн. «Генезис эндогенных рудных месторождений». Изд-во «Недра», 1968.
- Смирнов В. И.* Глубинные источники рудного вещества эндогенных ме-

- сторожений.— В кн. «Связь поверхностных структур земной коры с глубинами». Киев, 1971.
- Соболев И. Д.* Основные черты магматизма Урала.— Материалы по геологии и полезные ископ. Урала, 1961, вып. 8.
- Соболев И. Д.* Тектоника и магматизм Урала.— Труды Первого Уральск. петрогр. совещ., 1963, т. I.
- Столяров Ю. М.* Ангидрит и гипс в колчеданных месторождениях Урала в связи с проблемой их генезиса.— Геология рудных местор., 1965, 7, № 2.
- Судовиков Н. Г.* Условия эндогенно-рудообразования в докембрие. Ученые записки Ленингр. ун-та, серия геол. наук, геохимия, 1962, № 312, вып. 13.
- Судовиков Н. Г.* Метаморфогенное рудообразование.— Сов. геология, 1965, № 1.
- Суслов Д. К., Меркулов М. И.* Колчеданные месторождения Карабашского района на Урале. Цветметиздат, 1932.
- Татаринов П. М., Строна П. А.* Особенности месторождений, связанных с вулканогенными формациями.— Записки Всес. мин. об-ва, вторая серия, 1967, ч. 96, вып. 1.
- Твалчрелидзе Г. А.* Опыт систематики эндогенных месторождений складчатых областей (на металлогенической основе). Изд-во «Недра», 1966.
- Уманский Я. С и др.* Физическое металловедение. Гос. метал. изд., 1955.
- Федорова Г. Г.* О структуре глинистых суспензий и ее значении для объяснения некоторых сторон процесса осадкообразования.— Литология и полезные ископаемые, 1966, № 1.
- Филимонова А. А.* Срастания борнита и халькопирита в колчеданных рудах месторождения Кабан 1 (Средний Урал).— Изв. АН СССР, серия геол., 1949, № 1.
- Филимонова А. А.* Опыты по нагреванию борнитсодержащих колчеданных руд.— Изв. АН СССР, серия геол., 1952, № 3.
- Филимонова А. А.* Изменение формы халькопирит-сфалеритовых срастаний под влиянием нагревания.— Геология рудных местор., 1964, № 3.
- Флин Д.* Деформация при метаморфизме.— В кн. «Природа метаморфизма». Изд-во «Мир», 1967.
- Фролова Т. И.* Структурный анализ рудоносных сланцев Карабашских колчеданных месторождений.— Вестник Моск. ун-та, 1952, № 2, серия физ.-математ. и естественных наук, вып. 1.
- Харлей П. М.* Возраст земли. Изд-во физ.-мат. лит., 1962.
- Херасков Н. П., Перфильев А. С.* Основные особенности геосинклинальных структур Урала.— Труды Геол. ин-та АН СССР, 1963, вып. 92.
- Хитаров Н. И.* Проблемы изучения термальных полей Большого и Малого Кавказа.— В кн. «Проблемы геотермии и практического использования тепла Земли». Т. II, Изд-во АН СССР, 1961.
- Чакраварти Р.* Особенности минерального состава руд Блявинского медноколчеданного месторождения. Изд-во Моск. ун-та, 1966.
- Червяковский Г. Ф.* Искусственное получение минералов, типичных для борнитсодержащих руд колчеданных месторождений.— Труды ГГИ УФАН СССР, 1948, вып. 14, мин. сб. № 1.
- Червяковский Г. Ф.* О колломорфных текстурах в рудах некоторых среднеуральских колчеданных месторождений.— Записки Всес. мин. об-ва, 1952, № 4.
- Червяковский Г. Ф.* О минералогическом изменении руды в эндоконтакте порфиров на месторождении им. III Интернационала.— Труды ГГИ УФАН СССР, 1953, вып. 20.
- Червяковский Г. Ф.* О фазах складчатости и расланцевания на Урале.— Докл. СССР, 1955, 105, № 4.
- Червяковский Г. Ф.* 1. О новой точке зрения С. Н. Иванова на генезис колчеданных месторождений Урала.— Сов. геология, 1958, № 11.
- Червяковский Г. Ф.* 2. Месторождение им. III Интернационала (быв. Сан-Донато).— Материалы по геологии и полезным ископ. Урала, 1958, вып. 7.
- Червяковский Г. Ф.* 1. К вопросу классификации колчеданных месторождений Урала.— Труды ГГИ УФАН СССР, 1959, вып. 40.
- Червяковский Г. Ф.* 2. О включениях и обломках кварцево-серицитовых сланцев в массивных мед-

- колчеданных рудах некоторых месторождений Среднего Урала.— Труды ГГИ, УФАН СССР, 1959, вып. 43.
- Червяковский Г. Ф.* 3. О процессах серицитизации в зеленокаменной полосе Среднего Урала.— Труды ГГИ УФАН СССР, 1959, вып. 43.
- Червяковский Г. Ф.* О замещении халькопирита борнитом с образованием решетчатых структур.— Труды ГГИ УФАН СССР, 1960, вып. 35.
- Червяковский Г. Ф.* О некоторых закономерностях в размещении колчеданных месторождений Урала.— Труды ГГИ УФАН СССР, 1962, вып. 58.
- Червяковский Г. Ф.* Типы колчеданных месторождений Урала и закономерности их размещения.— В сб. «Закономерности размещения полезных ископ.», т. 7. Изд-во «Наука», 1964.
- Чесноков С. В., Бурикова И. А.* О роли динамометаморфического расщепления в генезисе околорудных сланцев Учалинского колчеданного месторождения на Южном Урале.— Докл. АН СССР, 1968, 182, № 1.
- Чухров Ф. В.* Коллоиды в земной коре. Изд-во АН СССР, 1955.
- Чухров Ф. В.* К состоянию вопроса о роли коллоидов в рудообразовании.— Сов. геология, 1965, № 2.
- Шадлу Т. Н.* Сфалерит. Минералогия Урала, т. II. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1941.
- Шадлу Т. Н.* О колломорфных структурах руд месторождений Яман-Касы на Южном Урале.— Записки Всерос. мин. об-ва, 1942, ч. 21, вып. 3-4.
- Шадлу Т. Н.* Некоторые признаки метаморфизма в колчеданных рудах (месторождение им. III Интернационала).— Изв. АН СССР, серия геол., 1947, № 5.
- Шадлу Т. Н.* 1. Особенности минералогического состава, структуры и текстур руд некоторых колчеданных месторождений Урала.— В кн. «Колчеданные месторождения Урала». Изд-во АН СССР, 1950.
- Шадлу Т. Н.* 2. Некоторые особенности внутреннего строения зерен пирита в колчеданных залежах.— Мин. сб. Львовск. геол. об-ва, 1950, № 4.
- Шадлу Т. Н.* 1. О некоторых метаморфических текстурах и структурах руд.— Изв. АН СССР, серия геол., 1954, № 2.
- Шадлу Т. Н.* 2. Особенности строения колчеданных руд и их метаморфизм. Автореф. докт. дисс., 1954.
- Шадлу Т. Н.* Теллурувисмутит из колчеданной руды Учалинского месторождения (Южный Урал).— Записки Всес. мин. об-ва, 1961, ч. 90, вып. 3.
- Шадлу Т. Н., Розанов Ю. А.* Влияние одностороннего давления на структуру колчеданной руды.— Изв. АН СССР, серия геол., 1949, № 3.
- Шарфман В. С., Степанова Т. П.* Сибайская рудоносная вулканическая постройка в Магнитогорском мегасинклинории Урала.— Изв. АН СССР, серия геол., 1971, № 1.
- Шахов Ф. Н.* Текстуры руд. Изд-во АН СССР, 1961.
- Шелудко А.* Коллоидная химия. ИЛ, 1960.
- Шмидт А. И.* Возрастные соотношения серноколчеданного и золото-полиметаллического оруденения в Курсанском рудном поле (Южный Урал).— Геология рудных месторождений, 1961, № 6.
- Шнейдерген Г.* Рудные месторождения. ИЛ, 1958.
- Штейнберг Д. С.* Некоторые закономерности локализации уральских эндогенных месторождений железа и меди, генетически связанных с интрузиями.— Материалы по геологии Урала. Труды Свердл. горн. ин-та, 1955, вып. XXII.
- Штейнберг Д. С.* 1. Основные проблемы магматизма и метаморфизма Урала.— Труды Первого Уральского петрогр. совещ., т. II. Свердловск, 1963.
- Штейнберг Д. С.* 2. Основные черты петрологии и металлогении интрузивных формаций Урала.— Труды Первого Уральского петрогр. совещ., т. I, Свердловск, 1963.
- Штейнберг Д. С.* О химической классификации эффузивных горных пород.— Труды Ин-та геол. АН СССР, Уральский филиал, 1964, вып. 72.
- Штрейс И. А.* Стратиграфия и тектоника зеленокаменной полосы Среднего Урала.— В кн. «Текто-

- ника СССР», т. III, Изд-во АН СССР, 1951.
- Щерба Г. Н.* Руды, связанные с палеовулканизмом, и некоторые их особенности.— Геология рудных месторождений, 1966, № 5.
- Щерба Г. Н.* О так называемых контакто-метасоматических месторождениях в восточной части Успенского рудного пояса.— Изв. высших уч. зав., геология и разведка, 1969, № 2.
- Юрин Ю. Ф., Ярош П. Я.* Особенности внутреннего строения зерен халькопирита из руд колчеданных месторождений Урала.— Труды Ин-та геологии и геохимии УФАИ СССР. Минералы месторожд. полезных ископ. Урала, 1968, мин. сб. № 8.
- Язев Р. Г.* О природе порфировых и обломочных пород, вмещающих Александринское медноколчеданное месторождение (Южный Урал).— Сов. геология, 1967, № 12.
- Яковлев Л. И.* О явлениях наложенного контактового метаморфизма в некоторых колчеданных месторождениях Среднего Урала.— Труды ЦНИГРИ, 1959, вып. 29.
- Яковлев Г. Ф., Авдонин В. В., Гончарова Т. Я., Кропачев С. М.* Тектоно-магматическое развитие и колчеданное оруденение Южного Урала в палеозое.— Вестник Моск. ун-та, серия геол., 1966, вып. 4.
- Яковлев Г. Ф.* Тектоно-магматическое развитие и колчеданные месторождения Южного Урала.— В кн. «Палеозойский вулканизм и колчеданные месторождения Южного Урала». Изд-во Моск. ун-та, 1968.
- Ярош Н. А.* К минералогии руд Третьего Северного рудника.— Труды ГГИ УФАИ СССР, 1959, вып. 42.
- Ярош П. Я.* 1. Валлерит и кубанит из Карабаша.— Записки Всес. мин. об-ва, 1949, ч. 78, серия 2, вып. 1.
- Ярош П. Я.* 2. Реликты колломорфных структур пирита из Карабаша.— Записки Всес. мин. об-ва, 1949, ч. 78, серия 2, вып. 2.
- Ярош П. Я.* Ангидрит из Карабашского колчеданного месторождения.— Записки Всес. мин. об-ва, 1950, № 4.
- Ярош П. Я.* Штрмейерит в рудах Карабашских колчеданных месторождений.— Записки Всес. мин. об-ва, 1951, № 3.
- Ярош П. Я.* Некоторые детали внутреннего строения зерен пирита из колчеданных месторождений Урала.— Записки Всес. мин. об-ва, 1953, № 4.
- Ярош П. Я.* 1. О явлениях срастания самородного золота и серебра в одном из колчеданных месторождений Урала.— Труды Свердл. горн. ин-та. Материалы по геологии Урала, 1955, вып. 22.
- Ярош П. Я.* 2. Выделения рутила при метаморфических изменениях ильменита.— Записки Всес. мин. об-ва, вторая серия, 1955, ч. 84, вып. 4.
- Ярош П. Я., Ершова В. Г.* Топаз, флюорит, десмин и монтмориллонит из медноколчеданных месторождений Лёвиха на Среднем Урале.— Труды Свердл. горн. ин-та, геология и полезн. ископ. Урала, 1960, вып. 35.
- Ярош П. Я.* Об оптической анизотропии пирита.— Труды Свердл. горн. ин-та, 1961, вып. 38, геология и полезн. ископ. Урала.
- Ярош П. Я.* О двух стадиях серицитизации на Зюзельском колчеданном месторождении.— Докл. АН СССР, 1962, 147, № 6.
- Ярош П. Я.* О минералах титана в рудах Зюзельского колчеданного месторождения на Среднем Урале.— Труды Свердл. горн. ин-та, 1963, вып. 42, геология и полезные ископаемые.
- Ярош П. Я.* О метасоматозе и метаморфизме колчеданных руд Зюзельского месторождения.— Геология рудных месторождений, 1964, № 4.
- Ярош П. Я.* 1. О зонах роста в сфалерите из колчеданных месторождений Урала.— Труды Ин-та ГГИ УФАИ СССР, 1965, вып. 70.
- Ярош П. Я.* Метаморфизм руд колчеданных месторождений Урала.— Труды Второго Уральского петрогр. совещ., т. III, 1969.
- Ярош П. Я., Буслаев Ф. П.* О причинах изменения окраски серицита из колчеданных месторождений Урала.— Труды ГГИ УФАИ СССР, 1968, мин. сб. № 8, минералы местор. полезн. ископ. Урала.
- Ярош П. Я., Буслаев Ф. П., Никулова А. А.* О диагенетических брек-

- чневидных текстурах в рудах южноуральских колчеданных месторождений.—Геология рудных месторождений, 1969, № 1.
- Ярош П. Я., Буслаев Ф. П., Шерстобитова Л. А.* Исследование тонкой скульптуры граней кристаллов пирита под электронным микроскопом.—Записки Всес. мин. об-ва, 1968, ч. 97, вып. 2.
- Ярош П. Я., Хачатурян Э. А. 2.* О взаимоотношениях рудных и нерудных минералов в Ахтальском и Шамлугском месторождениях.—Изв. АН Арм. ССР, 17, 1964, № 6.
- Ярош П. Я., Юрин Ю. Ф.* Фотолюминесценция сфалерита из колчеданных месторождений Урала.—Докл. АН СССР, 1965, 165, № 3.
- Ярош П. Я., Юрин Ю. Ф.* Использование фотолюминесценции сфалерита при решении некоторых вопросов генезиса колчеданных руд.—Записки Всес. мин. об-ва, вторая серия, 1966, ч. 95, вып. 6.
- Adams F. D., Vaneroft J. A.* On the amount of friction developed in rocks during deformation, etc.—*J. Geopl.*, 1917, N 25, p. 597—637.
- Birman J. L.* Theory of luminescent centres and processes in ZnS type II—VI Compounds.—*Proc. Internat. Conf. Luminescence. Budapest, 1966, v. I. Budapest, 1968.*
- Garlick G. F. J.* Luminescence centres in solids.—*Proc. Internat. Conf. Luminescence, Budapest, 1966, v. I. Budapest, 1968.*
- Gross K. A.* X-ray line broadening and stored energy in deformed and annealed calcite.—*Phyl. Mag.*, 1965, 118, 801.
- Gross K. A., Paterson M. S.* Natural X-ray line broadening in limestones and marbles.—*Amer. J. Sci.*, 1965, 263, 238.
- Halferdahl Z. B.* Chloritoid its composition, X-ray and optical properties, stability and occurrence.—*J. Petrolog.*, 1961, № 1.
- Hewes L. J.* A theory of surface cracks in mud and lava relating geometrical relations.—*Amer. J. Sci.*, 1948, N 3, 246.
- Joly J., Rutherford E.* The Age of Pleochrois Haloes.—*Philosophical Magazine*, ser. 6, 1913, 25, April.
- Kalliokoski J.* Diagenetic piritization in three sedimentary rocks.—*Econ. Geol.*, 1966, 61, N 5.
- Lindgren W.* Processes of mineralization and enrichment in the Tintic Mining District, Utah.—*Econ. Geol.*, 1915, N 3, 10.
- Love L. G., Amstutz.* Review of Microscopic pyrite from the Devonian Chattanooga shale and Rammelsberg Banderz.—*Fortschr. Miner.*, 1966, 43, N 2.
- Paterson M. S.* X-ray line broadening on plastically deformed calcite.—*Phyl. Mag.*, 1959, N 4, 451.
- Ramdohr P.* Die Lagerstätte von Broken Hill in New South Wales Heidelberg.—*Beitr. Mineralogie*, 1950, N 2.
- Ramdohr P.* Neue Beobachtungen über radioaktive Hofe und radioaktive Sprengungen.—*Abhandl. Akad. Wiss. Berlin. Kl. Chem.*, 1957, 2.
- Rodgeres F. Augustin.* Sericite a Low Temperature Hydrothermal Mineral.—*Econ. Geol.*, 1916, N 12, 11.
- Shionoga Shigeo.* Investigation on Luminescence of ZnS-type crystals.—*Proc. Internat. Conf. Luminescence. Budapest, 1966, 1, Budapest, 1968.*
- Stanton R. L., Rafter T. A.* Sulfur isotope ratios in co-existing galena and sphalerite from Broken Hill, New South Wales.—*Econ. Geol.*, 1967, N 8, 62.
- Stickey A. W.* The pyritic copper deposits of Kyshtim, Russia.—*Econ. Geol.*, 1915, N 7, 10.
- Stokes A. K.* A numerical Fourier analysis method for the correction of widths and shapes of lines on X-ray powder photographs.—*Proc. Phys. Soc.*, 1948, N 346, 61, pt. 4.
- Swanson C. O., Gunning G. C.* Sullivan Mine.—*Struct. Geol. Canad. ore deposits. Montreal, 1948.*
- Szigerti G.* The role of lattice defects produced by deformation in the luminescence of zinc sulphides.—*Proc. Internat. Conf. Luminescence. Budapest, 1966, 1, Budapest, 1968.*

# СО ДЕРЖАНИЕ

Введение . . . . .	5
<b>I</b>	
Краткий очерк геологии колчеданных месторождений Урала . . . . .	12
<b>II</b>	
Диagenез колчеданных руд . . . . .	15
Общие замечания . . . . .	15
Макропризнаки диагенетических изменений в рудах . . . . .	16
Блявинское месторождение . . . . .	16
Сибайское месторождение . . . . .	23
Результаты микроскопического изучения руд месторождений Блявинского, Комсомольского и Сибайского . . . . .	35
<b>III</b>	
Метаморфизм колчеданных руд . . . . .	74
Общие замечания . . . . .	74
Признаки метаморфических изменений в минералах . . . . .	76
Пирит . . . . .	76
Сфалерит . . . . .	96
Халькопирит . . . . .	132
Серцит . . . . .	134
Метасоматические замещения в рудах . . . . .	138
Замещение одних рудных минералов другими рудными минералами . . . . .	138
Замещение рудных минералов нерудными . . . . .	170
Образование в рудах линейных структур и полосчатых текстур . . . . .	186
<b>IV</b>	
Типы метаморфизма, проявленного в колчеданных рудах . . . . .	200
Общие замечания . . . . .	200
Контактовый метаморфизм, связанный со среднепалеозойскими гранитоидными интрузиями габбрового ряда . . . . .	201
Региональный метаморфизм, сопряженный с позднепалеозойскими гранитными интрузиями и складчатостью . . . . .	212
Заключение . . . . .	218
Литература . . . . .	226

*Петр Яковлевич Ярош*

**Диагенез и метаморфизм  
колчеданных руд на Урале**

*Утверждено к печати  
Институтом геологии и  
геохимии Уральского  
научного центра АН СССР*

Редактор издательства *И. А. Клишова*  
Художественный редактор *С. А. Литвак*  
Художник *А. А. Кущенко*  
Технический редактор *В. В. Волкова*

Сдано в набор 22/II 1973 г. Подписано к печати 23/III 1973 г.  
Формат 60×90<sup>1/16</sup>. Печ. л. 15. Бумага № 1. Уч.-изд. л. 15,9.  
Тираж 700 экз. Т-04811. Тип. зак. 1628.

Цена 1 р. 59 к.

Издательство «Наука», 103717 ГСП, Москва, К-62,  
Подсосенский пер., д. 21

2-я типография Издательства «Наука» 121099, Москва, Г-99,  
Щубинский пер., 10

1 p. 59 к.

765