

УДК 549 : 548.0

Пирогов Б.И.

Минералогическая кристаллография

Рассмотрены результаты исследований в области минералогической кристаллографии в трех направлениях: онтогении магнетита, гематита, гетита и других рудных минералов Криворожского бассейна и Ковдорского месторождения; кристалломорфологии и онтогении акцессорного циркона гранитоидов Украинского щита; использования методов минералогической кристаллографии в решении задач технологической минералогии.

Минералогическая кристаллография получила широкое развитие на кафедре минералогии, кристаллографии и месторождений полезных ископаемых Криворожского горнорудного института в семидесятые годы под руководством автора настоящей работы. Активное участие в развитии этого направления приняли сотрудники кафедры: проф. В.Н.Трощенко, доц. В.В.Иванченко, доц. В.Д.Евтехов, доц. В.Н.Тарасенко, кандидаты геолого-минералогических наук И.В.Холошин, А.Н.Трунин и др., а также геологи-производственники: кандидат геолого-минералогических наук Ю.Л.Ахкозов, инженер-геолог В.М.Малых и др. Объектами исследований являлись, прежде всего, тонко- и мелкозернистые образования (железные руды, железистые кварциты и разного состава сланцы, гранитоиды), что в значительной степени осложняло выделение минералов и исследование их кристалломорфологии. Работы по минералогической кристаллографии проводились в трех основных направлениях: 1) изучение онтогении рудных минералов, 2) исследование кристалломорфологии и онтогении акцессорного циркона, 3) решение проблем технологической минералогии руд.

1. Кристалломорфологические исследования в связи с изучением онтогении рудных минералов

Б.И.Пироговым [9] в 1975 г. впервые были рассмотрены особенности онтогении магнетита и гематита железистых кварцитов докембрия, относящихся к различным фациям метаморфизма. При рассмотрении осадочно-метаморфической природы рудных минералов отмечалось, что в результате интенсивной перекристаллизации минералов в железистых кварцитах при переходе от зеленосланцевой к эпидот-амфиболитовой фации метаморфизма происходила смена габитуса кристаллов. У гематита происходил переход от кристаллов с преимущественным развитием пинакоида {0001} к ромбоэдру {1011} в сочетании с пинакоидом {0001} и к двум ромбоэдрам {1014} и {0112}; у магнетита

– от октаэдра {111} к сочетаниям октаэдра с кубом {100} и куба с ромбододекаэдром {110}. Отмечалось, что с возрастанием ступени метаморфизма количество гематита убывает. Подчеркивалось широкое распространение среди железистых кварцитов эпитаКСических и синтаксических сростаний по плоскостям $\{111\} \text{Fe}^{+2}\text{Fe}_2^{+3}\text{O}_4 - \{0001\} \text{Fe}_2\text{O}_3$. С помощью электронно-микроскопических исследований был прослежен механизм формирования агрегатов вторичного гематита при мартитизации магнетита.

В работе Б.И.Пирогова и В.Ш.Викрематне [22] были рассмотрены особенности перекристаллизации магнетита железистых кварцитов при метаморфизме на основе исследования равновесности его индивидов в агрегатах. При этом оценивалась величина двугранных углов между границами сечений зерен, приближающихся к 120° , и уплощенность (кривизна) поверхности соприкасающихся зерен. Эти параметры позволили установить, что агрегаты магнетита из пород высокотемпературных фаций метаморфизма формировались при более устойчивых и равновесных термодинамических условиях.

Рассматривая особенности морфологии магнетита железистых кварцитов различных фаций метаморфизма, Б.И.Пирогов [10] подчеркивал заметное искажение октаэдров минерала в железистых кварцитах зеленосланцевой фации с преобразованием внешней кубической симметрии его кристаллов вплоть до псевдомоноклинной и псевдотриклиной за счет изменения симметрии среды кристаллообразования. Заметное отклонение от прямолинейности границ зерен в агрегате (сплошном, ленточном, полиэдрическом, ветвистом, зернистом) свидетельствует об их миграции, обусловленной напряжением (тектоникой), и о неравновесных условиях с сильным напряжением. Изменение степени полигонизации зерен магнетита свидетельствует не только о снятии деформирующих напряжений, но и о физическом состоянии (в частности, степени пластичности) среды минералообразования. Рассмотрены особенности механизмов перекристаллизации в оолитоподобных, ветвистых и других агрегатах. Кварц, захваченный в процессе роста метакристаллов магнетита, обуславливал проявление различных по анатомии их сечений. Здесь существенную роль играла скорость роста. Иногда четко прослеживается ориентировка включений кварца по ребрам пирамиды роста; послышное их расположение связано с зональностью зерен магнетита.

Изменение внутреннего строения магнетита и гематита железистых кварцитов зеленосланцевой фации метаморфизма на фоне эволюции универсальной минералогической зональности железорудной толщи рассмотрено в работе Б.И.Пирогова и В.Ш.Викрематне [23]. Методом травления руд в полированных шлифах с дополнительными электронно-микроскопическими наблюдениями выявлены различные трансформации скелетного и слоевого механизмов роста с формированием зональных мозаичных и блоковых структур. Показано, что по-

слоистый механизм роста магнетита наблюдается во всех разновидностях железистых кварцитов. Интенсивность развития полицентрического роста увеличивается от центра толщи (ассоциация магнетита, гематита, кварца) к периферии (ассоциация кварца, карбонатов и амфиболов с подчиненным количеством магнетита). В этом же направлении магнетит очищается от включений, уменьшается развитие его скелетных форм роста. В малорудных железистых кварцитах (периферия толщи) существенно развиты зональные кристаллы. Для гематита антискелетный рост прослеживается во всех разновидностях кристаллов. Развитие скелетных кристаллов уменьшается от центра толщи к периферии, в противоположном направлении возрастает их пластическая деформация.

В работе Б.И.Пирогова [12] рассмотрены особенности морфологии и онтогении рудных минералов во взаимосвязи с тремя уровнями организации железисто-кремнистого материала: тонкой слоистостью железистых кварцитов (первый уровень, наиболее низкий), переслаиванием их минеральных разновидностей в соответствии с минералогическо-геохимической зональностью толщ железистых горизонтов (второй уровень), формированием определенных ассоциаций сосуществующих минералов в зависимости от характера и глубины процессов метаморфизма различных фаций (третий уровень, наиболее высокий). Последовательное сопоставление этих уровней позволяет говорить о полигенном происхождении основной массы рудных минералов. Отражена эволюция габитусных форм и особенностей роста индивидов и агрегатов минералов во взаимосвязи с тремя уровнями. Показано, что существенные изменения в морфологию и онтогению минералов нередко вносят метасоматоз и гипергенез.

В связи с региональными минералогическими исследованиями магнетита Ковдорского массива, прежде всего руд бадделеит-апатит-магнетитового месторождения, Б.И.Пироговым и И.В.Холошиным [19] выявлена эволюция в изменении морфологии, конституции и как следствие – свойств минерала. По морфологии и гранулометрическому составу выделены 5 морфологических типов кристаллов магнетита, подчеркивающих его пространственно-временную кристалломорфологическую эволюцию. Это обусловлено полигенной природой формирования кристаллов. Отмечено изменение микроскульптур роста и растворения на поверхности кристаллов магнетита с постепенным уменьшением степени расчлененности их гранного рельефа. Широкий комплекс современных методов анализа (микрозонд, рентген, ИКС, термо-ЭДС, электронная микроскопия и др.) с учетом кристалломорфологии магнетита позволил выделить по содержанию Fe и коэффициенту неоднородности его состава $K_n = \text{Fe}_2\text{O}_3 / \text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$ три категории неоднородности минерала, связав их с изменчивостью его морфологии и свойств. В конечном итоге авторами [20] на основе изучения эволюции морфологии, гранулометрического состава кристаллов и конституции магнетита была

разработана методика минералогического картирования и составлена карта неоднородности минерала. Это позволило проследить закономерности изменения процессов минералообразования на месторождении.

Б.И.Пироговым, И.В.Холошиным, В.Н.Тарасенко [21] на примере комплексных руд Ковдорского месторождения показано, что кристаллогенетические типы магнетита занимают вполне определенное положение в пространстве, определяя зональность месторождения по морфологии магнетита, отражающую общую зональность рудоотложения. Эволюция морфологии магнетита отражает все конституционные изменения в минерале.

В 1989 г. большой коллектив под руководством автора опубликовал монографию, посвященную минералогии железисто-кремнистых формаций докембрия Европейской части СССР [18]. В ней на материале наиболее крупных месторождений изложены представления о механизме кристаллизации и изменения основных минералов – магнетита, гематита, гидроксидов железа и кварца в связи с эволюцией процессов минералообразования. С использованием данных о кристалломорфологии, конституции, онтогении и свойствах минералов разработаны минералогические критерии генетической классификации железных руд. Показано, что минералогические особенности железистых кварцитов различных фаций метаморфизма выражаются в определенном типоморфизме ассоциаций и признаков минералов.

В работе В. В. Индутного и Б.И. Пирогова [8] рассмотрен опыт оценки онтогенетических характеристик руд Кривого Рога. По специально разработанной методике были изучены текстуры минеральных агрегатов магнетита, кварца, амфиболов и карбонатов различных разновидностей железистых кварцитов и показано на микроскопическом уровне, что они не представляют ярко выраженных слоистых мотивов, фиксируемых при визуальных наблюдениях. Внутреннее строение их отличается определенным разнообразием симметрий более высоких порядков, чем характерная для слоистых текстур L_2 : L_3 , L_4 , L_6 , L_∞ . Агрегаты минеральных фаз прорастают по достаточно сложным законам. Наиболее вероятно срастание мономинеральных и равновеликих агрегатов и отдельных индивидов. Предложены параметры количественной оценки текстур руд.

В работе Х.Ф. Аркоса Видаль и Б.И. Пирогова [1] рассмотрены онтогенез и типоморфизм гидроксидов железа Криворожского бассейна. Онтогенез минералов рассмотрена в развитии трех зон гипергенного минералообразования: замещения, цементации, свободной кристаллизации. Все эти изменения рассмотрены с учетом морфолого-структурного ряда минеральных ассоциаций гипергенно окисленных железистых пород и руд. Применительно к гидроксидам железа подробно рассмотрен морфолого-структурный ряд: минеральный индивид – субагрегат – минеральный агрегат – суперагрегат – минеральное тело. Ряд позволяет учесть пространственно-

геометрическую связь между индивидами и агрегатами, минеральными видами и парагенетическими ассоциациями, в том числе их формы и размеры. Это позволило проследить в целом эволюцию и динамику процессов гипергенеза в железисто-кремнистых породах, характер направленности процессов лимонитизации, их связи с явлениями мартитизации этих пород, изменением морфолого-структурных и других признаков гидроксидов железа, типов их сростаний с другими минералами, формированием различных окисленных типов железистых кварцитов и богатых руд как в региональном плане так и на глубину.

2. Исследования по кристалломорфологии акцессорного циркона

В.В.Иванченко и др. [7] была изучена связь кристалломорфологических особенностей акцессорного циркона с условиями образования гранитоидов Криворожья, что позволило использовать этот минерал при геологической корреляции. В.В.Иванченко [3] применительно к гранитам и мигматитам Криворожского бассейна изучил вариации в развитии граней отдельных простых форм и изменчивость внутреннего строения кристаллов циркона. Это позволило выделить минералогические признаки отличия весьма сходных петрографически, но разновозрастных комплексов.

В работах В.В.Иванченко [4], В.Н.Трошенко и В.В.Иванченко [24] расширена география кристалломорфологических исследований циркона в связи с корреляцией гранитоидов. Установлена выдержанность морфологических признаков его кристаллов в различных частях одного гранитоидного массива, удаленных иногда на несколько сот километров. В связи с изучением генетических типов акцессорного циркона В.В.Иванченко [3, 7] методом микротопографических исследований установил микроскульптуры роста, растворения, деформации на его гранях и отпечатки кристаллов-соседей.

В.В.Иванченко [5] обобщил результаты морфологических и гониометрических исследований и составил атлас руководящих форм акцессорного циркона в гранитоидах Среднего Приднепровья. Для каждого из геологических комплексов были определены главные, второстепенные и редкие морфологические типы кристаллов циркона, общее число которых достигает 50. На примере циркона описан [6] новый тип микроскульптур роста минералов – четырехлучевые вицинальные образования в виде мальтийского креста. Исследованы элементы онтогении акцессорного циркона в гранитоидах Криворожья. Сопоставление данных о внутреннем строении и внешней морфологии нескольких десятков тысяч кристаллов циркона позволило выделить генетические признаки реликтового, сингенетического и эпигенетического циркона. Описаны различные типы сростаний его кристаллов.

3. Минералогическая кристаллография в технологической минералогии

В монографии Б.И.Пирогова и В.В.Пироговой [14] рассмотрен ряд принципиальных вопросов технологической минералогии руд различных генетических типов. При рассмотрении процессов рудоподготовки акцентируется внимание на кристалломорфологических особенностях сосуществующих рудных и нерудных минералов в связи с их раскрытием при измельчении руд. Показано, что у магнетита наиболее эффективно реализуется раскрытие по границам зерен (граням кристаллов) при самоизмельчении руд, а при шаровом измельчении границы срастания индивидов раскрываются хуже, образуется много полиминеральных сростков и возрастает уровень переизмельчения минералов, что ухудшает их сепарацию. В зависимости от морфологии и кристаллохимии магнетита и гематита в различных классах крупности измельченные частицы отвечают определенным кристаллографическим граням, предопределяя различия в сорбционных и флотационных свойствах минералов. Весьма эффективным кристалломорфологическим параметром минеральных частиц, оценивающим их поведение в процессе измельчения и обогащения, является величина удельной поверхности минералов.

Б.И.Пироговым [11] в широком аспекте была представлена роль минералогических исследований в обогащении руд. Рассмотрены технологические свойства минералов как функция их конституции и генезиса, изменение свойств минералов при обогащении руд, типоморфизм минералов и минералого-технологическое картирование. Детальное минералогическое исследование руд позволяет оценить особенности их обогатимости, выделить технологические типы и сорта руд, предусмотреть рациональную систему подготовки их к обогащению с учетом неоднородности их состава, морфологии и свойств индивидов минералов и выбора оптимальных условий их раскрытия.

Б.И.Пироговым и Ж.Мананга [15] изучены особенности срастаний минералов в железистых кварцитах докембрия и рассмотрена их роль в обогащении. Зная физические свойства границ зерен в минеральных агрегатах железистых кварцитов, можно проследить все явления, связанные с их структурно-текстурной перестройкой при перекристаллизации, при последовательной и одновременной кристаллизации минералов в равновесных и неравновесных условиях и т.д. Широко используя онтогенический подход к оценке границ срастаний индивидов, для каждой минеральной разновидности железистых кварцитов можно объективно оценить возрастные взаимоотношения минералов и особенности проявления границ срастаний. После специального травления четко проявляется граница срастания (шва) и четко фиксируется ее ширина, которая увязывается с раскрытием минералов при измельчении.

Особое место в познании технологических свойств минералов занимает онтогенический метод [13]. Он позволяет выявить динамику взаимосвязи технологических свойств минералов (руд) с их морфологи-

ей, гранулометрией и конституцией, т.е. увязать с генезисом месторождения на фоне конкретной геолого-структурной позиции месторождения. При этом необходимо определить: а) оптимальные условия раскрытия зерен полезного компонента, исследуя морфологию, гранулометрию, характер границ сростаний рудных и нерудных минералов; б) контрастность свойств разделяемых минералов с учетом особенностей их конституции (анатомия индивидов, степень неоднородности их состава и свойств) для оптимизации технологического процесса; в) основные типы и разновидности руд, выделяемых при минералогическом картировании месторождений с их всесторонней минералогическо-технологической характеристикой.

В.Д.Евтеховым и др. [2] показано, что метасоматоз в железистых кварцитах докембрия сопровождался перекристаллизацией, раскристаллизацией, растворением, псевдоморфизацией и другими явлениями. Для разных типов метасоматоза (железо-магнезиальный, натриевый и др.), а также в соответствии с различными зонами метасоматических тел соотношение этих явлений было различным. Результатом является изменение сочетаний габитусных форм кристаллов магнетита в метасоматитах различного генезиса и минерального состава. При этом следует иметь в виду, что к ростовым формам относится, преимущественно, октаэдр, а к формам растворения – куб и ромбододекаэдр. Выявленные кристаллогенетические ряды магнетита могут использоваться при геолого-технологическом картировании месторождений железорудных натриевых метасоматитов.

Наиболее полное представление о роли минералогической кристаллографии и минералогических методов в решении многих прикладных вопросов дает монография Б.И.Пирогова и др. [17]. Среди геолого-минералогических факторов, определяющих обогатимость руд, наряду с особенностями конституции минералов, особое значение имеют текстурно-структурные признаки руд, учитывающие морфологический тип текстуры, типы сростаний минералов, морфологию и гранулометрию минеральных индивидов и агрегатов, анатомию и особенности неоднородности минералов. В процессе выявления и исследования сростаний и последовательности формирования ассоциирующих минералов определялась морфология и анатомия контактирующих минералов, состав и свойства минералов, морфология и характер границ сростаний. Включая эти характеристики в элементы геолого-технологического картирования месторождения, определяя на их основе прогнозные технологические характеристики руд, возможно осуществлять управление технологическими процессами их обогащения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Аркас Видаль Х.Ф., Пирогов Б.И.* Онтогенез и типоморфизм гидроксидов железа Криворожского бассейна // Минералогический сборник.– 1992.– № 45, вып. 2.– С. 68-76.
2. *Евтехов В.Д., Кондратьева Д.Н., Коновал А.Н.* Кристаллогенетические ряды магнетита в железисто-кремнистых формациях докембрия и их использование при минералого-

технологической оценке бедных железных руд / Минералогическая кристаллография и ее применение в практике геолого-разведочных работ // Киев: Наукова думка, 1986.– С. 154-159.

3. **Иванченко В.В.** Типоморфизм циркона в плагิโอгранитоидах Криворожья // Минералогический сборник.– 1976.– № 30, вып.2.– С. 60-65.

4. **Иванченко В.В.** Корреляция гранитоидных комплексов Криворожско-Кременчугской и Орехово-Павлоградской структурно-формационных зон Украинского щита по типоморфным признакам циркона / Петрология и корреляция кристаллических комплексов Восточно-Европейской платформы // Киев, 1979.– С. 247-248.

5. **Иванченко В.В.** Атлас руководящих форм акцессорного циркона в гранитоидах Украинской железорудной провинции / Проблемы метаморфогенного рудообразования в докембрии // Киев, 1982.– С. 75-77.

6. **Иванченко В.В.** Новый тип скульптур роста минералов // Доклады АН УССР. Серия Б.– 1984.– № 4.– С. 9-10.

7. **Иванченко В.В., Киселев А.С., Курлов Н.С., Троценко В.Н.** Минералогические критерии расчленения и корреляции гранитоидов Криворожско-Кременчугской зоны // Минералогический сборник.– 1975.– № 29, вып. 3.– С. 97-106.

8. **Индутный В.В., Пирогов Б.И.** Опыт количественной оценки онтогенических характеристик руд Кривого Рога // Записки Всесоюзного минералогического общества.– 1990.– № 4.– С. 94-99.

9. **Пирогов Б.И.** Онтогенез гематита и магнетита железистых кварцитов / Минералогия осадочных образований // Киев.– 1975.– Вып. 2.– С. 59-65.

10. **Пирогов Б.И.** Особенности морфологии магнетита железистых кварцитов // Минералогический сборник.– 1981.– № 35, вып. 2.– С. 17-21.

11. **Пирогов Б.И.** Роль минералогических исследований в обогащении руд // Минералогический журнал.– 1982.– № 1.– С. 81-92.

12. **Пирогов Б.И.** Морфология и онтогенез магнетита и гематита железистых кварцитов // Минералогический журнал.– 1983.– № 4.– С. 46-54.

13. **Пирогов Б.И.** Онтогенетический метод в познании технологических свойств минералов / Проблемы онтогенеза минералов // Ленинград, 1985.– С. 22-30.

14. **Пирогов Б.И., Пирогова В.В.** Минералогическое исследование железных и марганцевых руд // Москва: Недра, 1973.– 216 с.

15. **Пирогов Б.И., Мананга Ж.** Особенности сростаний минералов в железистых кварцитах докембрия и их роль в обогащении // Доклады АН УССР. Серия Б.– 1983.– № 10.– С. 3-7.

16. **Пирогов Б.И., Пирогова В.В., Тарасенко В.Н. и др.** Изменение технологических свойств минералов как фактор эффективного обогащения руд / Проблемы направленного изменения технологических и технических свойств минералов // Ленинград, 1985.– С. 34-43.

17. **Пирогов Б.И., Поротов Г.С., Холошин И.В., Тарасенко В.Н.** Технологическая минералогия железных руд // Ленинград: Наука, 1988.– 302 с.

18. **Пирогов Б.И., Стебновская Ю.М., Естехов В.Д. и др.** Железисто-кремнистые формации докембрия Европейской части СССР. Минералогия // Киев: Наукова думка, 1989.– 168 с.

19. **Пирогов Б.И., Холошин И.В.** Оценка неоднородности магнетитов Ковдорского массива при регионально-минералогических исследованиях // Минералогический сборник.– 1985.– № 39, вып. 1.– С. 39-47.

20. **Пирогов Б.И., Холошин И.В.** Минералогическое картирование комплексных руд Ковдорского месторождения на основе изучения магнетита / Минералогическое картирование рудоносных территорий // Свердловск, 1985.– С. 88-96.

21. **Пирогов Б.И., Холошин И.В., Тарасенко В.Н.** Кристаллогенетический ряд магнетита и его использование при картировании комплексных руд Ковдорского месторождения // Минералогическая кристаллография и ее применение в практике геолого-разведочных работ // Киев: Наукова думка, 1986.– С. 145-154.

22. **Пирогов Б.И., Викрематне В. Ш.** Особенности перекристаллизации магнетита железистых кварцитов при метаморфизме // Доклады АН УССР. Серия Б.– 1981.– № 5.– С. 19-23.

23. **Пирогов Б.И., Викрематне В.Ш.** Особенности строения магнетита и гематита железистых кварцитов докембрия // Записки Всесоюзного минералогического общества.– 1982.– №1.– С. 93-98.

24. **Троценко В.Н., Иванченко В.В.** О корреляции малых тел аплито-пегматоидных гранитов с кировоградским гранитоидным комплексом // Геологический журнал.– 1979.– № 6.– С. 89-96.

ПИРОГОВ Б.И. Мінералогічна кристалографія.

РЕЗЮМЕ. Методи мінералогічної кристалографії є ефективним інструментом вирішення проблем онтогенії мінералів і технологічної мінералогії.

ПИРОГОВ Б.И. Минералогическая кристаллография.

РЕЗЮМЕ. Методы минералогической кристаллографии являются эффективным инструментом решения проблем онтогенции минералов и технологической минералогии.

PIROGOV B.I. Mineralogical crystallography.

SUMMARY. The methods of mineralogical crystallography are effective instruments to solve the problems of minerals ontogeny and technological mineralogy.

*Надійшла до редакції
21 листопада 2000 р.*