



ГЕОЛОГИЯ  
РУДНЫХ  
МЕСТОРОЖДЕНИЙ,  
ПЕТРОГРАФИЯ,  
МИНЕРАЛОГИЯ

Издательство · Наука ·

Академия наук СССР

Институт геологии  
рудных месторождений,  
петрографии, минералогии  
и геохимии



ГЕОЛОГИЯ  
РУДНЫХ  
МЕСТОРОЖДЕНИЙ,  
ПЕТРОГРАФИЯ  
И МИНЕРАЛОГИЯ

R108



Издательство  
"Наука"  
Москва  
1976





### Геология рудных месторождений, петрография и минералогия

В книге отражены основные достижения в научной деятельности Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии АН СССР. Главнейшими направлениями исследований ИГЕМ являются изучение вопросов рудообразования и металлогении, петрологии, магматизма, метаморфизма и метасоматизма, минералогии и геохимии, геохронологии и совершенствование физических и физико-химических методов исследований состава, свойств и структур минералов и горных пород, внедрение новых методов их исследований. Рассмотрены история научных исследований в этих направлениях и перспективы дальнейших работ.

Книга рассчитана на широкий круг геологов.

Редакционная коллегия

академик Ф.В. ЧУХРОВ (ответственный редактор),

В.И. РЕХАРСКИЙ, Ю.Г. САФОНОВ

## ОТ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ

Настоящий сборник включает материалы научной сессии Ученого совета Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии (ИГЕМ) АН СССР, посвященной 250-летию юбилею Академии наук СССР.

На сессии было рассмотрено состояние исследований по основным научным направлениям, разрабатываемым в Институте. Сводные доклады, представленные руководителями основных структурных подразделений Института, базировались на материалах ответственных исполнителей тематических работ. В связи с этим проводимые обзоры следует рассматривать как результат работы большого коллектива ученых, как правило, упоминаемых в текстах докладов или в списках используемых работ.

Ограниченный объем сборника не позволил отдельно характеризовать все научные, научно-методические и аналитические работы, выполняемые в Институте. Эти неизбежные ограничения компенсируются в значительной мере материалом обзоров по основным научным направлениям, так как исследования, выполняемые в Институте, являются комплексными, использующими весь арсенал современных химических и физических методов исследования природных минеральных веществ. Кроме того, результаты исследований по некоторым направлениям опубликованы в 1974 г. в журнале "Известия Академии наук".

Обзору по основным научным направлениям предшествует очерк истории Института, научная специализация которого, отраженная в его названии, была определена 20 лет назад. При составлении очерка использованы архивные данные и неопубликованные материалы — воспоминания старейших сотрудников Института. В очерке кратко изложены сведения по организации исследований и их основные результаты.

Преимущество научных направлений от Института геологических наук Академии наук СССР, при разделении которого образован ИГЕМ, естественно не позволяет разграничить результаты важнейших научных исследований, полученных до и в процессе деятельности Института в его нынешнем статусе.

Соединение крупных научных школ, разработка обоснованных учений и теорий в областях геологической науки, представленных в ИГЕМ, являются результатом многолетних коллективных исследований. Институт геологических наук АН СССР являлся крупной комплексной исследовательской организацией, ставшей базой для ИГЕМ, ГИН, ИМГРЭ

Института вулканологии АН СССР. Новые институты создавались учеными ИГН; этим в первую очередь и определялась соответствующая преемственность в научных исследованиях.

Выполненные исследования наряду с разработкой научных проблем всегда предусматривали и решение прикладных задач, вытекающих из запросов народного хозяйства. Наиболее существенным оказался вклад ученых Института в упрочнение сырьевой базы производства цветных металлов, железа, хрома, титана, марганца, алюминия, а также олова, вольфрама, молибдена, ртути и благородных металлов. Активно влияют работы Института на создание сырьевой базы неметаллических полезных ископаемых.

Тесное сочетание фундаментальных научных исследований с решением практических вопросов составляет основу дальнейших работ Института. Они направлены на разработку узловых проблем геологии и геохимии рудных месторождений, петрологии и минералогии, на решение тех грандиозных задач, которые поставлены перед геологической наукой XXV съездом Коммунистической партии Советского Союза.

Плановые тематические исследования Института на 1976—1980 гг. полностью отвечают основному направлению развития геологических исследований, указанному съездом, — расширению и углублению изучения земной коры и верхней мантии Земли в целях исследования процессов формирования и закономерностей размещения месторождений полезных ископаемых. Исследования Института сосредоточиваются на разработке фундаментальных научных проблем теории рудообразования, физико-химической теории метасоматизма и метаморфизма, учения о магматических формациях, теории типоморфизма минералов, учения о корях выветривания. Планами тематических работ предусматривается комплексная разработка важнейшей научной проблемы источников рудного вещества. Усиливается направленность на комплексное изучение крупных месторождений, важнейших рудных районов и провинций как основы для разработки фундаментальных теоретических проблем.

В X пятилетке видное место среди объектов исследования будут занимать районы Байкало-Амурской магистрали, перспективные рудные районы Северо-Востока СССР. Как и в предшествующие годы, крупные тематические работы будут проведены на территории важнейших горно-рудных комбинатов.

Углубленное изучение природных объектов и геологических процессов в настоящее время все в большей мере зависит от развития экспериментальных и аналитических исследований. Дальнейшее совершенствование методов анализа минеральных веществ, усиление лабораторно-экспериментальной базы, методической и технической оснащенности составляют одно из важнейших направлений дальнейшего развития исследований Института.

Дальнейшее развитие получают комплексные исследования минерального сырья и прежде всего важнейших видов металлических и неметаллических полезных ископаемых, направленные на повышение эффективности добычи, извлечения и использования ценных минеральных компонентов.

# ИНСТИТУТ ГЕОЛОГИИ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ, ПЕТРОГРАФИИ, МИНЕРАЛОГИИ И ГЕОХИМИИ АКАДЕМИИ НАУК СССР

Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии АН СССР образован в ноябре 1955 г. при разделении Института геологических наук АН СССР на два: ИГЕМ и ГИН (Геологический институт).

В качестве основных задач ИГЕМ Президиумом АН СССР были названы "выяснение закономерностей образования и распространения месторождений полезных ископаемых на основании геологических и экспериментальных данных, изучение магматических формаций в связи с их металлоносностью, всестороннее изучение состава и строения руд и минералов, а также всемерное развитие учения о рудных месторождениях, петрографии, минералогии и геохимии".

Постановка указанных задач перед специализированным комплексным институтом определялась всем предшествующим развитием соответствующих областей геологической науки в Академии наук СССР, нашедшим свое отражение в организации этих исследований.

## КРАТКИЙ ОЧЕРК ИСТОРИИ ОРГАНИЗАЦИИ ИГЕМ АН СССР

Основные геологические научные исследования в Академии наук в до-революционный период проводились в Минеральном кабинете, существовавшем с 1724 по 1830 г., и в Геологическом музее, который до 1898 г. назывался Минералогическим. В 1907 г. музей получил название Геологический и минералогический музей и состоял из двух соответствующих отделений. В 1930 г. на базе геологического отделения организованы Геологический, Петрографический и Палеонтологический институты, а минералогическое отделение реорганизовано в Геохимический и Минералогический институты. В 1932 г. последние слились в Институт геохимии, минералогии и кристаллографии им. М.В. Ломоносова (ЛИГЕМ), который, как и другие научные подразделения Академии наук, в 1934 г. был переведен из Ленинграда в Москву. Минералогический музей при организации ЛИГЕМ выделился в отдельную организацию.

ЛИГЕМ, Геологический институт и Петрографический (ПЕТРИН) в 1937 г. были объединены в Институт геологических наук (ИГН) АН СССР. Лаборатория кристаллографии ЛИГЕМ была выделена в самостоятельное учреждение, в последующем — Институт кристаллографии.

Вулканологические исследования, проводившиеся в ПЕТРИНе, были продолжены самостоятельной лабораторией, впоследствии преобразованной в Институт вулканологии. Из Института геологических наук в 1952 г. выделилась лаборатория минералогии и геохимии редких и рассеянных элементов, ставшая отдельным институтом, который возглавил К.А. Власов.

Институт геологических наук просуществовал 18 лет. Его разделение на два исследовательских института — ИГЕМ и ГИН было вызвано возросшим уровнем специализации различных отраслей геологической науки, углублением исследований в каждой из них.

Основу ИГЕМ составили отделы: рудный, минералогии, геохимии, общей петрографии, экспериментальной и технической петрографии, неметаллических полезных ископаемых, в свою очередь перешедшие в ИГН из ЛИГЕМА и ПЕТРИНа, либо сформированные на основе научных ячеек, существовавших в этих институтах. При общем 20-летнем периоде существования ИГЕМ большая часть составляющих его научных подразделений имеет более длительную историю. Этим объясняется непосредственная преемственность в исследованиях по основным научным направлениям ИГЕМ от работ выдающихся ученых, академиков В.И. Вернадского, Ф.Ю. Левинсон-Лессинга, А.Е. Ферсмана и их соратников и учеников, ведущих ученых ЛИГЕМ, ПЕТРИН, ИГН — Д.С. Белянкина, А.Г. Бетехтина, И.Ф. Григорьева, А.Н. Заварицкого, С.С. Смирнова, Д.И. Щербакова. С их именами связано зарождение основных научных подразделений, с большими или меньшими изменениями, сохранившимися в Институте или давшими начало новым научным ячейкам.

Отделы минералогии и геохимии были созданы на основе соответствующих институтов при образовании ЛИГЕМ. Первым руководителем отдела геохимии был А.Е. Ферсман. В составе отдела были Н.В. Белов, Н.И. Влодавец, В.В. Щербина, С.Г. Цейтлин, Е.Е. Костылева, В.И. Герасимовский, К.А. Власов, А.А. Сауков, Н.М. Прокопенко, Н.Х. Айдиньян, И.Д. Борнеман-Старынкевич, А.Н. Лабунцов и другие ученые. Геохимические работы тесно переплетались с минералогическими исследованиями. Минералогический отдел при его образовании возглавил С.М. Курбатов, а после переезда ЛИГЕМ в Москву — Н.А. Смольянинов. В отделе работали Э.М. Бонштедт-Куплетская, О.М. Шубникова, В.С. Мясников, С.Д. Попов, Ф.И. Рукавишникова, Ф.В. Чухров и другие.

В 1938 г. при образовании ИГН отделы геохимии и минералогии были объединены. Объединенный отдел возглавлялся Д.И. Щербаковым, а в период 1945—1948 гг. — П.И. Лебедевым.

В 1948 г. отделы были вновь разделены. Минералогический отдел возглавил Д.И. Щербаков, геохимический — А.А. Сауков. 1938 год является годом создания первого в нашей стране рудного отдела, объединившего исследователей эндогенных и экзогенных месторождений. Первым руководителем отдела был И.Ф. Григорьев. Позже отдел возглавляли С.С. Смирнов, А.Г. Бетехтин. В отделе работали Ф.И. Вольфсон, Г.А. Соколов, Н.В. Павлов, С.А. Кашин, Е.А. Радкевич, А.В. Пэк, В.П. Логинов, Б.П. Кротов, И.И. Гинзбург, О.Д. Левицкий, Т.Н. Шадлун и другие. В состав отдела входила организованная в 1937 г. А.Г. Бетехтиным Лаборатория минерографии.

Петрографический отдел и отдел физико-химического эксперимента сформировались в ПЕТРИНе, возглавлявшемся Ф.Ю. Левинсон-Лесингом. Петрографические исследования в Академии наук велись широко. В них участвовали А.Н. Заварицкий, Д.С. Коржинский, Б.М. Куплетский, Г.Д. Афанасьев, П.И. Лебедев, О.А. Воробьева, Е.А. Кузнецов, В.С. Коптев-Дворников, Н.И. Соустов и другие.

Отдел экспериментальной и технической петрографии, руководимый Д.С. Белянкиным, включал наряду с экспериментальными лабораториями, где работали А.И. Цветков, И.А. Островский, Я.И. Олышанский, и группой технической петрографии (Д.С. Белянкин, В.В. Лапин, Б.В. Иванов) группу нерудных ископаемых, созданную еще в КЕПСе<sup>1</sup>, а также лабораторию физико-механических испытаний горных пород.

Из этого отдела в 1949 г. выделился отдел неметаллических полезных ископаемых (В.П. Петров и др.), в состав которого входила и лаборатория и физико-механических свойств горных пород (Б.В. Залесский, Б.П. Беликов, Ю.А. Розанов).

Особое место в истории ИГН и ИГЕМ занимает период Великой Отечественной войны. Сотрудники Института принимали участие в боевых действиях в рядах Красной армии и народного ополчения. Кулик Л.А., Савельев И.И., Исаков Е.П., Крупенко И.С., Андреев Ф.В., Федоров В.Л., Тимофеев А.А., Здравомыслов В.К., Попков В.Ф., Лазарев И.В., Рукавишников Ф.И., Шумило И.М., Корчемкин Л.И. погибли в боях с немецкими фашистами.

Основные научные силы, в соответствии с решением Президиума АН СССР, были направлены на решение насущных задач геологической службы по развитию и укреплению сырьевой базы оборонной промышленности страны. Ученые Института приняли самое деятельное участие в работе комиссий по мобилизации ресурсов Урала, Западной Сибири и Казахстана. Детальному изучению подверглись марганцевые месторождения Урала, Казахстана, Западной Сибири (А.Г. Бетехтин, П.Ф. Андрущенко, А.Т. Сулов, В.П. Еремеев, А.Н. Чураков), уральские месторождения титана (С.А. Кашин, О.А. Воробьева, А.А. Филимонова), медные колчеданные (А.Н. Заварицкий, В.И. Гоньшакова, В.П. Логинов, А.В. Пэк, В.С. Коптев-Дворников, Т.Н. Шадлун, М.А. Фаворская, Е.Е. Захаров, Л.И. Лукин) и медные скарновые (Д.С. Коржинский, Л.Н. Овчинников, М.З. Кантор, В.Ф. Чернышев). Изучение железных руд Урала проводилось Г.А. Соколовым, Б.П. Кротовым, А.Л. Яншиным, М.И. Калгановым, В.С. Мясниковым. И.И. Гинзбург, А.А. Кап, И.А. Рукавишникова изучали никелевые месторождения. Большой комплекс работ выполнялся на редкометальных месторождениях Урала (Б.М. Куплетский, Э.М. Куплетская, О.А. Воробьева, Л.И. Лукин). Активно изучались бокситовые руды, огнеупорные глины, кварциты (Д.С. Белянкин, В.П. Петров, В.В. Лапин). Д.С. Белянкиным и В.В. Лапиным проводились также важные работы по изучению металлургических шлаков уральских

<sup>1</sup> КЕПС — Комиссия по изучению естественных производительных сил, работавшая под руководством А.Е. Ферсмана.

заводов. Изучение руд во многом обеспечивалось лабораториями ИГН — химической (А.А. Сауков и др.), спектральной (Н.В. Лизунов).

Научные сотрудники Института работали на медных, вольфрамовых, железорудных месторождениях Казахстана и Алтая (И.Ф. Григорьев, Ф.В. Чухров, Д.Г. Сапожников, К.А. Вакусевич, Л.П. Ермилова, М.Ф. Стрелкин, Л.И. Шабынин, А.И. Гинзбург, И.В. Дуброва и др.). Большие работы проводились по изучению месторождений Забайкалья, Дальнего Востока, Средней Азии. В Забайкалье С.С. Смирнов изучал железорудные и свинцово-цинковые месторождения, Ф.К. Шипулин, Л.М. Афанасьев — вольфрамовые. Оловянные месторождения исследовались О.Д. Левицким, С.С. Смирновым, Е.А. Радкевич, И.А. Островским, И.Г. Ченцовым, Д.О. Онтоевым, М.А. Фаворской. На Дальнем Востоке работали также Н.В. Павлов и К.В. Власов. В Средней Азии работы концентрировались в районах ртутных месторождений (В.И. Смирнов, В.А. Невский), свинцово-цинковых и вольфрамовых месторождениях (Ф.И. Вольфсон, Е.П. Солюшкин, Н.С. Горшков). На среднеазиатских месторождениях работали Е.Е. Костылева, К.М. Феодотьев. Большая группа ученых ИГН работала на Кавказе (П.И. Лебедев, Д.И. Щербаков, А.П. Лебедев, В.Ф. Морковкина, Н.М. Прокопенко, В.П. Панков).

Геологи-петрографы и специалисты по нерудным ископаемым участвовали в работах по инженерному обеспечению Красной армии, возглавлявшихся в АН СССР А.Е. Ферсманом (Б.В. Залесский, Ю.А. Розанов, И.П. Тимченко, Н.И. Соустов, А.А. Мазуровский, К.И. Толстихина, А.А. Леонтьева и др.).

Ученые Института отдавали все силы на решение практически важных вопросов по поискам полезных ископаемых, их разведке, добыче, переработке и использованию. Вместе с тем накапливался огромный фактический материал и осуществлялись научные исследования, с новой силой развернувшиеся в послевоенный период.

В послевоенные годы благодаря работам Г.Д. Афанасьева, Д.С. Белякина, А.Г. Бетехтина, К.А. Власова, Ф.И. Вольфсона, О.А. Воробьевой, И.И. Гинзбурга, Д.С. Коржинского, О.Д. Левицкого, Я.И. Ольшанского, В.П. Петрова, Е.А. Радкевич, А.А. Саукова, Д.Г. Сапожникова, Г.А. Соколова, Е.К. Устиева, Ф.К. Шипулина, Д.И. Щербакова и других ученых исследования в области геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии не только расширились, но и приобрели новое качественное выражение.

Сосредоточение исследований по этим направлениям в ИГЕМ АН СССР сопровождалось определенными организационными усовершенствованиями. Помимо существовавших в ИГН отделов общей петрографии, экспериментальной и технической петрографии, минералогии, геохимии, неметаллических полезных ископаемых были выделены отделы геологии экзогенных рудных месторождений, метаморфизма и метасоматизма. Рудный отдел преобразовался в отдел геологии эндогенных месторождений.

За 20-летний период существования ИГЕМ основные изменения в его структуре связаны с развитием лабораторно-экспериментальной базы. В Институте помимо химической лаборатории, оставшейся при

реорганизации ИГН, созданы самостоятельные лаборатории спектрального анализа, рентгеноструктурная, рентгеноспектральная, электронной микроскопии, электронографии, абсолютного возраста геологических формаций, разделения минералов, исследования физико-механических свойств пород. В соответствии с современным профилем работ отдел геохимии преобразован в лабораторию геохимии рудных месторождений, а отдел физико-химического эксперимента переименован в отдел физико-химической петрологии и минералогии.

#### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ РАЗВИТИЯ В ИГЕМ АН СССР

Характерной чертой работы Института является участие в нем специалистов разных научных профилей, что благоприятно для комплексной разработки главных научных проблем.

Основы науки о рудных месторождениях разрабатываются в тесной связи с исследованиями в смежных областях геологических наук, представленных в Институте, — петрографии, минералогии и геохимии. Должный уровень развития науки о рудных месторождениях обеспечивается участием в разработке крупных проблем рудообразования высококвалифицированных специалистов.

В Институте изучаются закономерности размещения рудных месторождений в областях с различной историей геологического развития, разработаны представления о рудоконцентрирующих структурах и закономерностях локализации крупных месторождений: создано новое направление в металлогенических исследованиях — металлогении рудных районов, сформулированы принципы локального прогнозирования оруденения. Разработаны методические основы анализа структур рудных полей и месторождений, способствующие повышению эффективности геологоразведочных работ в районах действующих горнорудных предприятий и на новых рудоносных площадях.

Фундаментальный характер носят минераграфические исследования. На их основе разработан метод парагенетического анализа ассоциаций рудообразующих минералов, сформулированы теоретические положения о стадийности и зональности развития оруденения и физико-химической сущности процессов рудообразования. Эти исследования наряду со структурными имеют важное значение для разработки критериев оценки перспектив рудоносности рудных полей и месторождений на разных стадиях их освоения, а также для совершенствования теоретических основ поисков скрытого оруденения.

Крупный вклад геологами-рудниками сделан в изучение эндогенных месторождений отдельных типов: магматических — хромитовых, медно-никелевых, гидротермальных — оловянных, вольфрамовых, молибденовых, свинцово-цинковых и других.

Работы в области геологии экзогенных рудных месторождений были направлены главным образом на разработку теории образования кор выветривания и связанных с ними ископаемых. Если в начальный период деятельности ИГЕМ основное внимание уделялось рудам железа

и никеля, то в последнее десятилетие в связи с запросами народного хозяйства главное внимание уделено проблеме бокситов. На основе исследований во всех известных бокситоносных районах страны разработана генетическая классификация бокситовых месторождений основных промышленных типов, изучены закономерности размещения как платформенных, так и геосинклинальных бокситовых месторождений. Детально изучены их типичные представители и сделаны практические рекомендации по направлению поисково-разведочных работ на бокситы.

Получены новые данные по никеленосным корам выветривания. В меньшем объеме, чем в период существования ИГН, но на более высоком уровне изучаются процессы образования марганцевых руд.

Исследования, посвященные условиям формирования и закономерностям размещения неметаллических полезных ископаемых, в Институте охватывают важнейшие виды неметаллического сырья, как эндогенного, так и экзогенного. Объектами исследований являются слюды, пьезокварц, строительные материалы, асбест, тальк, магнезит, огнеупорные глины, каолин. Полученные результаты во многом способствуют более эффективному проведению поисково-разведочных работ на неметаллические полезные ископаемые и их рациональному освоению. Следует отметить, что в работе по неметаллическим ископаемым большое внимание уделяется выявлению и использованию их новых видов. Весьма ценные результаты дало изучение перлита, фарфорового камня, брусита, мелкой слюды, абразивного граната. На основе работ сотрудников Института открыты новые месторождения этих минеральных ископаемых, происходит их промышленное освоение.

Разработка петрологических проблем в Институте идет по нескольким направлениям. Разработаны основы физико-химического анализа парагенезисов минералов, создана физико-химическая теория метасоматических процессов. В работах по метасоматизму и метаморфизму объектами изучения были различные геологические условия. Разработаны представления о кислотно-основном взаимодействии компонентов в растворах и магмах, предложена гипотеза метамагматизма. Экспериментальные и теоретические исследования режимов флюидов в процессе эндогенного минералообразования наряду с другими работами послужили основой профилирования специального Института экспериментальной минералогии (ИЭМ).

В ИГЕМ продолжают теоретические разработки в области физико-химической петрологии, изучение с помощью ее принципов различных типов месторождений. Развивается созданная в Институте теория скарнообразования, получены интересные результаты при изучении роли метасоматических процессов в формировании колчеданных, малоглубинных золоторудных и других месторождений.

Из результатов петрографических работ Института можно указать: разработку принципов формационного анализа магматических пород, глубокие исследования пород различных формационных групп — ультраосновных, основных, щелочных, гранитоидных. Разработаны представления о металлогенической специализации магматических форма-

ций, их значении как показателей особенностей тектоно-магматического развития крупных структур земной коры и их связях с глубинными процессами.

Петрографические исследования магматических пород в последние годы все теснее связываются с проблемами рудообразования и металлогенического прогнозирования. В Институте разработаны принципы составления карт магматических формаций для полициклических складчатых областей на примере Большого Кавказа, предложены критерии распознавания рудоносных гранитоидных интрузий, определены перспективные алмазоносные провинции. На основе петрографических работ рекомендовано использование в качестве минерального сырья нефелиновых сиенитов, анортозитов, трахитов.

Важные результаты получены при комплексных структурно-петрологических исследованиях ядра уникальной Кольской скважины, глубина которой превысила 7 км. Полученные данные существенно уточняют существующие представления об условиях проявления метаморфизма и имеют несомненную ценность для расшифровки глубинных геологических процессов. Изучение роли дислокационного метаморфизма в локализации оруденения в докембрийских породах и материалы глубоководного бурения вместе с изучением кернов сверхглубоких континентальных скважин составляют перспективное направление исследований связей магмо- и рудообразования.

Экспериментальные исследования в области физико-химической петрологии и минералогии в Институте в основном затрагивают проблемы магмы. Наряду с этим выполнены важные исследования некоторых сторон гидротермального рудообразования; успешно разрабатываются вопросы технической петрографии.

В Институте впервые разработана методика и осуществлено изучение магматических равновесий при контролируемом давлении воды и водорода, что имеет большое значение для познания окислительно-восстановительных реакций в глубинных условиях. Изучены фазовые равновесия в системах силикат — галогенид — вода и показана возможность отделения концентрированных солевых растворов непосредственно от кристаллизующихся магм. Доказана высокая рудогенерирующая способность кислых магматических расплавов в отношении цинка, железа, свинца, меди, олова и золота. Эти работы вносят существенный вклад в разработку теорий магмо- и рудообразования. Экспериментальные исследования магматических систем позволили сделать важные практические выводы об использовании металлургических шлаков.

В минералогии за последние 20 лет происходило резкое качественное изменение исследований благодаря непрерывному усилению методических возможностей познания структурных особенностей, состава и свойств минералов. Это создало предпосылки не только для их более детальной общей характеристики и открытия новых минеральных видов, но и для постановки целенаправленных исследований по важнейшим проблемам современной минералогии — типоморфизму минералов и их однородности.

Разработка вопросов типоморфизма имеет большое значение не только для развития учения о генезисе минералов и руд различных типов,

но и для поисков их новых месторождений, оценки рудопоявлений и россыпей. Исследования по проблеме однородности минералов оказывают влияние на состояние фундаментальных основ минералогии и позволяют впервые в истории этой науки сформулировать однозначные представления о конституции минеральных видов с должной оценкой проявления изоморфизма. Несомненно также значение данных об однородности минеральных индивидов и их агрегатов для технологии минерального сырья. В постановке и организации работ по проблемам типоморфизма и однородности Институту принадлежит приоритет.

В связи с разработкой основных минералогических проблем в ИГЕМе ведется большая работа по составлению многотомного капитального справочника "Минералы": в семи опубликованных книгах дано обобщение огромного материала о минералах, служащего основой их дальнейшего изучения и использования при решении разнообразных задач геологии и технологии.

Минералогические исследования, выполняемые в Институте, тесно связаны с решением проблем эндогенного и экзогенного рудообразования, геохимии рудных месторождений, познания источников рудного вещества.

Получили признание и работы Института по новому направлению — физике минералов. Сотрудниками Института открыто существование и установлено широкое распространение и разнообразие свободных радикалов в минералах, показана закономерная связь этого явления с геологическими условиями минералообразования.

В Институте разработаны основы ряда перспективных направлений геохимических исследований. Эти направления — историческая геохимия, геохимия рудных элементов в различных природных условиях — продолжают развиваться. Широко известны работы в области геохимии ртути, молибдена, теоретические вопросы геохимии эпигенетических процессов. В последние десятилетия в геохимических исследованиях, проводимых в Институте, все большее значение приобретают вопросы геохимии рудных месторождений, геохимии магматического и гидротермального процессов.

В теоретических геохимических исследованиях большое внимание уделяется научным основам геохимических методов поисков. Практически важные результаты получены при проведении комплексных геолого-геохимических исследований с применением оригинальных методов статистического анализа геохимических данных на крупных рудных объектах.

Успешное проведение теоретических исследований по основным научным направлениям и получение практически важных результатов обеспечены созданием в Институте мощной лабораторной базы, обеспечивающей практически полный цикл исследования природных минеральных веществ — от выделения мономинеральных фракций до анализа минералов на микронном уровне.

В лабораториях и лабораторных группах Института в настоящее время используются точные методики, позволяющие получать ценные данные о составе и структуре минеральных веществ и их отдельных компонентов.

Наряду с аналитической – определительской работой все лаборатории выполняют научно-методические и научные исследования.

Лаборатория физико-механических свойств горных пород одновременно участвует в решении крупных петрофизических задач, в выяснении физических условий рудообразования и изучении физических свойств строительного камня.

В лаборатории разделения минералов созданы и освоены комплексные схемы, позволяющие получать мономинеральные фракции более чем 120 порообразующих, аксессуарных и рудных минералов. По некоторым минералам, таким, как полевые шпаты, уже сейчас применяются методики, позволяющие получать монофракции с чистотой 98–100%.

Более десяти тысяч определений возраста пород калий-аргоновым методом выполнены в лаборатории абсолютного возраста. Ее сотрудниками освоен комплекс основных методов геохронологии, включающий калий-аргоновый, уран-свинцовый, рубидий-стронциевый а также недавно разработанный метод геологического датирования по отношению изотопов аргона 40 и 39. Лабораторией совместно с отделом петрографии внесен существенный вклад в разработку геохронологической шкалы. В последнее пятилетие лабораторией много сил вложено в разработку новых масс-спектрометрических установок высокого качества, в разработку изотопных стандартов.

Методы химического анализа в Институте традиционно остаются на высоком уровне. Химическая лаборатория выполняет определения 72 элементов. Здесь освоены методы микроанализа силикатных минералов. Разработаны и освоены методы эмиссионной пламенной и атомно-абсорбционной спектроскопии, синтезированы новые химические реагенты.

Спектральная лаборатория Института, длительное время являвшаяся в основном аналитической ячейкой, в последнее время все в большей мере завоевывает репутацию научно-методического центра спектрального анализа. В лаборатории разработаны и внедрены методы прямого спектрального многоэлементного анализа рудных и порообразующих минералов, природных вод и рассолов, а также серия прецизионных методов анализа на микрокомпоненты. Используются методы микроспектрального и локально-лазерного анализа минералов. Особое место в деятельности лаборатории заняли работы по созданию аналитических стандартов горных пород, имеющих важное значение для поднятия общего уровня аналитических работ в стране.

Лаборатория рентгеноспектрального анализа создана в Институте в 1969 г. В лаборатории проанализировано более 5000 образцов, установлен количественный состав более 15000 фаз (минералов). Освоены и усовершенствованы методические основы анализа, разработана серия расчетных программ, что значительно повысило производительность работы.

В рентгеноструктурной лаборатории проведены интересные работы по расшифровке структур сложных минералов, налажено систематическое исследование слоистых силикатов.

В решении вопросов типоморфизма минералов, изучения их неоднородности и проявлений изоморфизма весьма ощутима роль лабораторий электронной микроскопии и электронографии.

Электронографические работы дали особо весомый результат в разработке теории политипии минералов, полном определении структур некоторых слоистых силикатов, познании природы молибденитов, окислов железа.

В аналитический комплекс входят также ячейки анализа изотопов серы, инфракрасной спектроскопии, электронно-парамагнитного резонанса.

В соответствии с современными задачами наук о Земле, представленными в Институте, основными направлениями дальнейших исследований являются: 1) рудообразование и металлогения; 2) петрология и магматизм; 3) минералогия.

Среди теоретических проблем рудообразования и металлогении в качестве основных выдвигаются проблемы источников рудного вещества и закономерностей миграции и концентрации рудных элементов. Дальнейшее развитие теории эндогенного рудообразования предусматривает разработку комплекса научных проблем, охватывающих зависимости рудообразования от глубинного строения Земли, взаимосвязи структурных, гидродинамических и физико-механических условий рудообразования на различных глубинных уровнях, вещественного состава руд, стадийности и зональности месторождений, вопросов их генезиса. Основой таких исследований остается изучение важнейших рудных месторождений магматического и гидротермального генезисов. В развитии теории экзогенных рудообразующих процессов основное значение сохраняют исследования кор выветривания и связанных с ними месторождений. В качестве самостоятельной проблемы выдвигается разработка научных основ прогнозирования месторождений бокситов.

Разработанные в Институте перспективные идеи в металлогенических исследованиях позволяют по-новому подойти к познанию глобальных закономерностей размещения эндогенных месторождений, выявлению особенностей металлогении рудных районов в вулканических поясах. Возрастает важность работ по созданию методик количественного металлогенического прогнозирования с использованием достижений математических методов, информации, получаемой при космических съемках Земли.

Современные достижения геологии рудных месторождений и петрологии позволяют углублять исследования условий образования и закономерностей размещения неметаллических полезных ископаемых. В свою очередь эти исследования являются необходимым звеном в разработке теорий эндогенного и экзогенного рудообразования.

Накопленные обширные фактические данные позволяют решать вопросы эволюции рудообразования в истории развития Земли и тем самым совершенствовать научные основы металлогенического прогнозирования.

Разработка представлений о магматических формациях, определение естественных ассоциаций магматических пород определяют целесообразность их дальнейшего изучения как индикаторов глубинного

строения Земли и особенностей тектоно-магматического развития определенных регионов. Дальнейшее развитие получат углубленные исследования пород различных формаций, познание их природы и металлогенической роли.

Сущность перспективных работ по проблемам метаморфизма и метасоматизма выражается в изучении физико-химических закономерностей и взаимосвязей этих процессов с процессами рудообразования. Более видное место в этих исследованиях должны занять экспериментальные исследования. Отчетливы перспективы теоретического и экспериментального изучения магм, особенно обогащенных летучими компонентами. Вклад этих работ в решение проблем магматической петрологии и источников вещества эндогенных рудных месторождений может быть весьма значительным.

В качестве основной проблемы современной минералогии выдвигается усовершенствование теоретических основ типоморфизма и изоморфизма минералов. Эти исследования, охватывающие как эндогенные, так и экзогенные минералы, являются дальнейшим развитием генетической минералогии. Они позволят разработать минералогические индикаторы условий минерало- и рудообразования в различных геологических обстановках, а также усовершенствовать минералогические критерии оценки месторождений. Получат продолжение исследования особенностей минеральных ассоциаций и процессов минерало- и рудообразования в современных гидротермальных системах.

Исследования в области физики минералов выразятся в разработке теории и методов исследования основных особенностей электронного строения минералов.

Геохимические и геохронологические исследования в Институте в основном ориентируются на разработку теоретических проблем рудной геологии и петрологии. Повышение качественного уровня теоретических исследований вызывает необходимость дальнейшего укрепления лабораторно-экспериментальной базы Института.

Интенсификация исследований, повышение их качественного уровня, эффективная комплексность в решении сложных проблем являются основой дальнейшего развития фундаментальных наук, а также разработки научных основ прогнозирования, поисков и оценки минеральных месторождений.

# ГЕОЛОГИЯ И УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ЭНДОГЕННЫХ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

## ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в Советском Союзе и за рубежом происходит существенный пересмотр сложившихся представлений о генезисе эндогенных рудных месторождений и закономерностях их пространственного распространения. В противоположность ортодоксальной магматогенной теории, по которой главным источником рудообразующих веществ являются магмы, развиваются идеи о поступлении рудообразующих веществ из разных источников — из мантии, из очагов базальтоидной магмы, локализованной в нижних горизонтах земной коры, из пород коры, превращенных в палингенные гранитные магмы, из экзогенных вод глубокой циркуляции, приобретающих свойства гидротерм и способность экстрагировать металлы из горных пород, из метаморфогенных растворов. Внимание исследователей привлекают особенности состава и генезиса месторождений, образованных в результате разновременных геологических процессов. В металлогении, как и в тектонике, все большее признание получает представление о самостоятельном значении процессов тектоно-магматической активизации, которые сопровождаются интенсивным и разнообразным эндогенным оруденением. Идеи новой глобальной тектоники оказывают свое воздействие и на специалистов в области рудных месторождений. Предпринимаются настойчивые попытки усовершенствования методов крупномасштабного прогнозирования. Первые конкретные результаты дает применение математических методов и современной вычислительной техники в анализе закономерностей размещения, в оценке масштабов рудных месторождений. Электронное микрозондирование и другие тонкие методы исследования вещества позволяют определять формы нахождения в рудах второстепенных элементов и элементов-примесей, выявлять образование самостоятельных минералов или рассеяние их в определенных других минералах. Благодаря дальнейшему развитию методов парагенетического анализа руд и гидротермально измененных пород становится возможным познание тончайших деталей механизма рудообразования. Развивается формационное изучение рудных месторождений, намечающее новые пути в систематике и познании их генезиса.

В ИГЕМ АН СССР исследования в области теории эндогенного рудообразования проводятся в отделе эндогенных рудных месторождений

и в некоторых других научных подразделениях Института. Эти исследования можно сгруппировать следующим образом.

Генезис магматических хромитовых месторождений.

Минеральный состав руд и условия формирования медно-никелевых месторождений Норильского района.

Участие экзогенных хлоридных вод в эндогенном рудообразовании.

Стадийность и зональность гидротермальных месторождений.

Металлогения рудных районов.

Рудоносные структуры активизированных областей.

Структуры рудных полей и месторождений.

Систематика рудных формаций.

Совершенствование математических методов изучения рудных месторождений.

Ниже дана краткая характеристика результатов исследований по названным направлениям. Важные для развития теории эндогенного рудообразования исследования метасоматических процессов и вопросов связи оруденения с магматизмом освещены в других частях настоящего сборника.

## ГЕНЕЗИС МАГМАТИЧЕСКИХ ХРОМИТОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

2108

Бурный рост черной металлургии в СССР предъявил большой спрос на легирующие металлы, в частности на хром, и настоятельно потребовал значительного расширения сырьевой базы этого металла, выявления новых месторождений хромита. В связи с этим в 1961 г. после двадцатилетнего перерыва возобновляются работы по изучению хромитовых месторождений. Исследования по этой тематике последовательно охватили ультраосновные хромитоносные массивы Урала, Кавказа и Тувы. Основное внимание было сосредоточено на наиболее перспективном в отношении хромитоносности Кемпирсайском массиве, находящемся в уральской структуре в пределах Западного Казахстана. Результаты многолетних исследований изложены в монографии Н.В. Павлова, Г.Г. Кравченко, И.И. Чупрыниной "Хромиты Кемпирсайского плутона" (1968) и ряде статей. В дальнейшем объектами изучения явились массивы Южного, Среднего и Полярного Урала, Кавказа, Тувы и острова Кубы, а полученные материалы легли в основу ряда работ: Н.В. Павлов, И.И. Григорьева (1973<sub>1,2</sub>) и др. В процессе исследований получен обширный материал по форме и внутреннему строению хромитоносных массивов ультрабазитов, петрографическому и химическому составам пород, руд и слагающих их минералов, по связи хромитового оруденения с определенными петрографическими комплексами. Большое внимание уделено морфологии хромитовых тел, распределению текстур руд в их пределах, минералогии и вещественному составу, элементам прототектоники. Среди ультраосновных петрографических формаций геосинклинальных областей выделены две промышленно хромитоносные: габбро-норит-гарцбургитовая и перидоти-

товая, подразделяющаяся на ряд субформаций разной продуктивности. Наиболее сильно дифференцированные из них являются и более хроми-тоносными.

Закономерное размещение и взаимоотношения ультраосновных пород в массивах показывают, что их образование обусловлено последовательным поступлением дифференцированного материала ультрабазитов в камеру плутона. Установлена связь низкохромистых руд с фациями гарцбургитового состава, а высокохромистых — с дунит-гарцбургитовыми шширово-полосчатыми комплексами, размещающимися вблизи магмоподводящих каналов и глубоких горизонтов в массивах. В дунит-гарцбургитовом комплексе рудные тела залегают согласно с перемежающимися породами комплекса.

Установлено, что накоплению крупных концентраций хромитов в магматическом расплаве благоприятствует высокая его магнезиальность.

Форма рудных тел хромитовых месторождений определяется перемещением кристаллизующихся гетерогенных масс магматического расплава в камере интрузива, которое вызвано тектоническими напряжениями, подвижками и мобильностью вмещающих пород. Изучение структурных условий формирования хромитовых месторождений позволило установить шширокое развитие в них складчатых структур, будинированных тел ультрабазитов и хромитов, рудных и дунитовых брекчий, текстур растяжения, линейно-плоскостных текстур и других особенностей, свидетельствующих о неспокойных тектонических условиях кристаллизации хромитовых месторождений. Выявлены соотношения, указывающие на различную относительную скорость перемещения кристаллизовавшихся рудносиликатных масс, намечены критерии определения направления их движения. Выделены два структурно-морфологических типа рудных тел, намечены особенности их строения (первичные и перераспределенные рудные концентрации). Определена важная роль крутопадающих жилообразных тел хромитов как возможных индикаторов скрытых рудных залежей. Выявлена экраннующая роль границ различных по составу ультрабазитов, вдоль которых местами локализуются перераспределенные хромитовые массы.

Совокупность материалов, полученных при исследовании хроми-тоносных ультраосновных массивов, более углубленно обосновывает представления А.Н. Заварицкого, А.Г. Бетехтина, Г.А. Соколова и др. об интрузивной, а не экструзивной (выдавленных из мантии в закристаллизованном состоянии) природе ультраосновных массивов. Выявленные закономерности размещения и условия образования хромитовых месторождений в массивах ультрабазитов позволили наметить основные ведущие факторы и признаки локализации рудных концентраций, которые применимы для прогнозирования оруденения и постановки поисково-разведочных работ для обнаружения промышленных хромитовых руд.

Полученные данные по петрохимии и геохимии хрома могут иметь значение для познания состава и строения верхней мантии Земли и глубинной геологии.

Работы на Кемпирсайском массиве, проведенные в тесном сотрудничестве с Восточно-Уральской геологоразведочной экспедицией, оказались весьма эффективными. В период с 1965 по 1970 г. Донской ГРП при непосредственном участии и консультациях сотрудников ИГЕМ АН СССР была проведена ревизия рудоносных площадей массива с применением структурного бурения и составлением геологической карты палеозойского фундамента в масштабе 1:50000 для всего массива общей площадью около 1000 кв. км и в масштабе 1:25 000 для юго-восточной хромитоносной части массива. На этой основе была составлена прогнозно-металлогеническая карта на хромиты. Работы привели к открытию погребенных рудных тел и многократному увеличению запасов хромитовых руд этого горнорудного района.

Сравнительное изучение хромитоносности некоторых массивов Урала и Кубы позволило оценить перспективную рудоносность массива Маяри-Баракоеа и наметить районы и площади для поисков высокосортных хромистых руд. После проведения работ на Гейдаринском (Кавказ) и Войкар-Сыньинском (Полярный Урал) массивах соответственным территориальным геологическим организациям были переданы записки с рекомендациями по направлениям поисков хромитовых руд. Работы на Войкар-Сыньинском массиве привели к обнаружению промышленного оруденения.

На основе опыта изучения Кемпирсайского и ряда других массивов Урала и Кавказа разработано методическое руководство по поискам и разведке хромитовых месторождений, опубликованное в книге "Требования к геологоразведочным работам по этапам и стадиям" (1967). В связи с составлением прогнозно-металлогенических карт на хромиты по массивам Урала, Сибири, Казахстана и Дальнего Востока подготовлено руководство "К методике составления крупномасштабных прогнозно-металлогенических карт хромитоносных плутонов на примере Кемпирсайского массива" (1968), которое распространено среди территориальных управлений для пользования. В числе методических работ можно упомянуть разработку метода определения состава хромшпинелидов, основанного на корреляции величины ребра элементарной ячейки ( $a_0$ ) или величины отражательной способности ( $R$ ) и их химического состава, позволяющего быстро получать необходимые данные.

#### МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ РУД И УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НОРИЛЬСКОГО РАЙОНА

Исследование процессов формирования магматических сульфидных медно-никелевых месторождений норильского типа включает разработку следующих главных направлений: 1) установление закономерностей образования руд на основе детального изучения минералогии и парагенетического анализа ассоциаций рудных минералов; 2) изучение геохимии процессов рудообразования и анализ поведения и форм нахождения в рудах цветных, благородных и редких элементов.

Формирование руд норильских месторождений обусловлено процессами кристаллизационной и гравитационной дифференциации мантийных сульфидно-силикатных базальтоидных магм; эти процессы начинаются при подъеме расплавов в верхние горизонты коры и заканчиваются в гипабиссальных камерах локализации рудоносных интрузивов. В результате дифференциации возникают сульфидные расплавы, кристаллизация которых приводит к появлению различных типов медно-никелевых руд.

Наибольшим разнообразием минеральных парагенезисов и наиболее сложным строением обладают рудные тела, приуроченные к фланговым частям месторождений. Такая закономерность характерна для всех рудных горизонтов: вкрапленных руд в интрузивных массивах габбро-долеритов, сплошных руд, залегающих в основании интрузивов, вкрапленных и брекчиевидных руд в метаморфических и метасоматических породах экзоконтактового ореола интрузивов. В этих участках месторождений в рудных телах наблюдается зональное строение, обусловленное последовательной сменой минеральных разновидностей руд.

В зависимости от особенностей дифференциации сульфидных расплавов формируются различные типы зональных рудных тел: 1) тела с простой зональностью, обусловленной постепенной сменой минеральных ассоциаций с преобладающим пирротинном, ассоциациями с преобладающим халькопиритом; 2) тела со сложной зональностью, в которой наблюдается переход от пирротиновых руд к кубанитовым, а затем к талнахитовым (моихукитовым) через промежуточные пирротин- и троилит-кубанитовые разновидности руд.

Формирование зональности первого типа связано с кристаллизационной дифференциацией расплава с выделением из него пирротинового твердого раствора и последовательным обогащением остаточного расплава медью.

Сложная зональность возникает в результате расслоения расплава на две самостоятельно кристаллизующиеся жидкости с последующими реакциями между ними и продуктами их кристаллизации (Дистлер и др., 1975).

Основные структуры руд и наблюдаемые в рудах парагенезисы обусловлены процессами кристаллизации сульфидных расплавов, последующими субсолидусными превращениями и метаморфизмом руд.

Среди парагенетических ассоциаций минералов в рудах могут быть выделены парагенезисы раннемагматической кристаллизации, парагенезисы позднемагматической кристаллизации и парагенезисы гидротермального этапа. К раннемагматическим парагенезисам относятся ассоциации пирротин + халькопирит + пентландит + магнетит, талнахит (моихукит) + пентландит + магнетит. К позднемагматическим — ассоциации с кубанитом и большая группа редких минералов.

Широким диапазоном условий формирования медно-никелевых руд определяется чрезвычайное разнообразие их минерального состава. Общее число рудных минералов достигает 100. Детальная характеристика глав-

ных рудообразующих минералов: пирротина, петландита, минералов группы халькопирита (Филимонова и др., 1974) — позволяет выявить особенности их состава и распределения в минеральных разновидностях руд. В зависимости от типа парагенезиса наблюдается изменение железистости пирротина и пентландита, распределение никеля в сосуществующих минералах (Дистлер и др., 1975). Среди позднемагматических парагенезисов обнаружено большое число новых и редких минералов: годлевскит, шадлунит (Евстигнеева и др., 1973), точилинит, джерфишерит (Генкин и др., 1969) и другие минералы, а также большая группа платиновых минералов (Генкин, 1968).

Проведенное впервые систематическое изучение закономерностей распределения всех элементов группы платины, а также других компонентов руд (Дистлер и др., 1975) позволило выделить парагенетические ассоциации элементов и рассмотреть их поведение на разных этапах формирования руд.

По особенностям поведения и распределения в рудах платиноиды разделяются на две подгруппы: 1) платина и палладий; 2) родий-иридий, рутений и осмий.

Элементы первой подгруппы накапливаются в продуктах поздней кристаллизации обогащенного медью сульфидного расплава (халькопиритовые и талнахитовые руды), а элементы второй подгруппы — в раннемагматических ассоциациях (пирротиновые руды). В талнахитовых и халькопиритовых рудах происходит резкое снижение концентрации родия и иридия и несколько меньшее — рутения и осмия. Кубанитовые и другие переходные типы руд, развивающиеся путем замещения пирротиновых и халькопиритовых руд, наследуют черты первичного распределения платиновых металлов (Дистлер и др., 1975).

Изучение закономерностей распределения селена и теллура показало, что минимальное содержание как селена, так и теллура характерно для пирротиновых руд, максимальное — для халькопиритовых (талнахитовых) руд. Впервые в рудах месторождений Норильского района выявлено широкое развитие минералов теллура (Коваленкер и др., 1972).

Платиновые металлы в рудах норильских месторождений находятся в двух главных формах: рассеянной и минеральной. Общий ряд рассеяния элементов выражается последовательностью:  $Pt < Pd < Rh < Tr < Rn < Os$ . Количественные соотношения между этими формами и распределение платиновых металлов в рудообразующих сульфидах зависят от условий рудоотложения.

Изоморфное рассеяние металлов наиболее широко проявлено в пирротиновых рудах, главные рудообразующие минералы которых (пирротин + пентландит + халькопирит) составляют наиболее раннюю высокотемпературную парагенетическую ассоциацию. Главными минералами-концентраторами и носителями рассеянной формы платиноидов являются: 1) пентландит, несущий палладий и родий; 2) пирротин, несущий родий, иридий, рутений и осмий.

Для талнахитовых и халькопиритовых руд характерно широкое развитие платино-палладиевых минералов, обусловленное накоплением

платины и палладия на заключительных стадиях формирования руд (Генкин и др., 1973).

В рудах установлено более 30 минеральных видов и разновидностей минералов элементов группы платины. Из них 16 минералов относятся к числу впервые обнаруженных в природе (Генкин, 1968).

В процессах образования медно-никелевых руд поведение платиноидов обусловлено соосаждением родия, иридия, рутения и осмия и в меньшей степени платины и палладия рудообразующими сульфидами в ранних парагенезисах и отделением комплексных соединений платины и палладия, накапливающихся вместе с медью в остаточном флюиде. Уменьшение роли рассеянной формы в таллахитовых и кубанитовых рудах связано с понижением изоморфной емкости сульфидов, образующихся при более низких температурах.

#### УЧАСТИЕ ЭКЗОГЕННЫХ ХЛОРИДНЫХ ВОД В ЭНДОГЕННОМ РУДООБРАЗОВАНИИ

Вопрос об участии экзогенных хлоридных вод в эндогенном рудообразовании органически возник при изучении магнетитовых месторождений с повышенной хлорной минерализацией, проводившемся Д.И. Павловым под руководством Г.А. Соколова. Первые итоги исследований в указанном направлении были подведены в их совместном докладе на XXII сессии Международного геологического конгресса в г. Дели.

В дальнейшем тема развивалась в двух направлениях: региональном — с целью выяснения палеогидрогеологической обстановки формирования месторождений на фоне истории развития вмещающих их мегаструктур, и локальном — с целью получения критериев, позволяющих судить об участии в конкретных минерализациях концентрированных хлоридных растворов. В целом для обладающих хлорной минерализацией магнетитовых месторождений Алтае-Саянской складчатой области и Тургая в результате анализа минералого-геохимических, литологических, палеогидрогеологических, палеогеографических и других данных доказано участие в рудном процессе экзогенных рассольных вод, дренировавшихся тектоническими зонами ко времени развития в них рудоносного магматизма. Для Тургая экзогенная природа рассольных вод подтверждена с помощью изотопии серы (по определениям В.И. Виноградова).

Геологически участие экзогенных хлоридных вод в эндогенном магнетитовом рудообразовании возможно при пространственном совмещении проявлений рудоносного магматизма и участков разгрузки рассольных вод в тектонических структурах. Источником рассольных вод в конечном итоге оказываются морские бассейны, подвергавшиеся испарению.

Рудоконцентрирующая способность экзогенных рассолов и возможность формирования на их основе растворов, отвечающих по содержанию железа понятию рудоносных гидротерм, показана Д.И. Павловым с помощью наблюдений над застывшими в солях сибирскими

траппами (долеритами) и специально поставленных совместно с И.Д. Рябчиковым экспериментов. При этом установлено, что из долеритов, прореагировавших с хлоридно-натриевыми и хлоридно-магниевыми растворами, выносятся более 60% содержащегося в них железа, а его концентрации в растворе близки 1 вес.% (оба значения в пересчете на  $Fe_2O_3$ ).

В пределах конкретных рудных районов магнетитовые месторождения с проявленной хлорной минерализацией обладают значительно большими запасами, чем месторождения без нее. Эта зависимость позволила рассмотреть указанное развитие рудоносного магматизма в геологических структурах, обеспечивавших его пространственное совмещение с экзогенными хлоридными водами (тектонические зоны в обрамлении или во внутренних частях впадин, заполненных упаривающейся морской водой), в качестве одного из факторов, способствовавших формированию относительно крупных магнетитовых месторождений. В качестве другого фактора, действующего в том же направлении, весьма вероятно экстракция гидротермами, обогащенными экзогенными хлоридными водами, железа из расположенных ниже уровня рудообразования крупных масс фемических пород, о чем свидетельствует метасоматическое осветление последних (Павлов, 1974). В результате участие в составе рудообразующих растворов магнетитовых месторождений экзогенной хлоридной составляющей приводит к существенному увеличению масштабов оруденения.

Изучение магнетитовых месторождений позволило наметить контуры возможного участия экзогенных хлоридных вод рассольных концентраций в формировании рудообразующих растворов иных типов эндогенных месторождений, чем магнетитовые. Выяснено (Павлов, 1974), что экзогенные хлоридные воды закономерно проявляются на ранней, средней и поздней стадиях геосинклинального цикла геологического развития и на его платформенном этапе. При этом они оказываются значимым компонентом рудоносных растворов для всех трех выделенных В.И. Смирновым групп источников металлов в рудах: ювенильных, ассимиляционных и фильтрационных. В целом с экзогенными хлоридными водами (в том числе рассольных концентраций) связана определенная группа "хлорофильных" рудообразующих компонентов: железо, марганец, свинец, цинк, медь, серебро, мышьяк, сурьма, ртуть, возможно, золото и др.

Выяснение перечисленных связей потребовало обобщения материалов по закономерностям формирования и локализации в земной коре экзогенных вод рассольных концентраций, объяснение агрессивности которых не требует привлечения привноса в них ювенильных кислотных компонентов (что необходимо в случае метеорных вод). В работе, посвященной роли экзогенных рассольных вод в эндогенном рудообразовании (Павлов, 1975), специальное внимание уделено разграничению рассматриваемого типа подземных вод от других их типов. Подчеркивается, что прогретые экзогенные хлоридные воды — солевые растворы — помимо агрессивности обладают целым рядом свойств, имеющих первостепенное значение в процессах эндогенного минералообразова-

ния (каталитические свойства, способность к комплексообразованию, существенно иные, чем у разбавленных растворов).

Впервые гидротермальные процессы, в том числе обусловленные магматизмом, рассмотрены в связи с таким типично экзогенным процессом, как галогенез (в том числе и "незавершенный", т.е. не дошедший до садки солей как таковых, но способствовавший захоронению его существенно концентрированных жидких фаз).

### *Стадийность и зональность гидротермальных месторождений*

Вопросы прерывистого процесса формирования эндогенных, в частности гидротермальных, рудных месторождений и закономерности зонального распределения оруденения являются важными разделами общей проблемы рудообразования и всегда находились в центре внимания научной тематики ИГЕМ.

Масштаб исследований по данной теме значительно возрос особенно за последнее десятилетие в связи с общим развитием теории рудообразования, возрастающим запросом практики по оценке перспектив новых и известных рудных узлов, рудных полей, месторождений, особенно на флангах и на глубину, а также в связи с локальным прогнозом скрытого оруденения.

Исследования проводились в следующих направлениях: а) разработка достоверных доказательств прерывистости процесса рудообразования — признаков и критериев выделения стадий и этапов минерализации при формировании гидротермальных месторождений; б) обобщение имеющихся данных по зональности оруденения в отдельных группах гидротермальных месторождений с целью выявления закономерностей проявления и основных типов локальной зональности (выяснение важнейших геологических и физико-химических факторов возникновения зональности и их генетических типов); в) использование закономерностей проявления зональности для прогнозных целей.

Результаты первого этапа исследований ИГЕМ по рассматриваемой теме приведены в коллективной монографии "Зональность гидротермальных месторождений" (1974) под редакцией Г.А. Соколова, в которой освещены закономерности проявлений зональности в месторождениях олова, вольфрама, молибдена, золота, меди и некоторых редких металлов, а также рассмотрены общие вопросы стадийности минерализации и зональности оруденения. Кроме того, результаты проведенных исследований по этой теме освещены в других работах ряда исследователей Института (Дубровский, 1963; Кигаи, 1974) и в отдельных монографиях (Онтоев, 1974).

Обобщению многочисленных данных по проблеме зональности гидротермальных месторождений в связи с прогнозом скрытого оруденения было посвящено II Всесоюзное совещание по зональности, созданное по инициативе ИГЕМ и состоявшееся в декабре 1972 г. (см. Прогнозирование скрытого оруденения на основе зональности гидротермальных месторождений, 1975).

Важнейшие научные данные, полученные в результате разработки данной темы, сводятся к следующим.

1. Для анализа прерывистости процесса рудообразования уточнены старые и разработаны новые критерии выделения стадий минерализации при формировании гидротермальных месторождений (Кига́й, 1974; Онтоев, 1974). Эти критерии могут быть объединены в четыре группы: магматические (главным образом внутриминерализационные дайки изверженных пород), геолого-структурные, минералого-геохимические и физико-химические. В последней очень важное значение имеют циклические изменения параметров растворов от стадии к стадии: кислотности-щелочности, плотности растворов, состава газовой фазы и температуры, окислительно-восстановительного потенциала и др. Использование указанных групп критериев в их сложном сочетании позволяет достаточно надежно выделять стадии минерализации при формировании гидротермальных месторождений.

2. Установлена отчетливая эволюция во времени катионного состава рудоносных растворов при формировании многостадийных месторождений олова, вольфрама, молибдена и др., связанных с гранитоидным магматизмом. Вместе с тем анионный состав растворов разных стадий минерализации оказывается достаточно однотипным, обогащенным ионами фтора, хлора, гидросульфидной и сульфидной серой, углекислотой и бикарбонат-ионом с тенденцией возрастания активностей последних в поздних стадиях минерализации (Онтоев, 1974).

3. Освещены основные закономерности проявления локальной зональности ряда гидротермальных месторождений — оловорудных (В.Н. Дубровский и И.Н. Кига́й), вольфрамовых (Д. О. Онтоев), молибденовых (В.И. Рехарский), колчеданных (В.Н. Логинов), золоторудных (Н.В. Петровская, Д.А. Тимофеевский, Н.И. Бородаевский), скарновых (В.Ф. Чернышев, Ю.Г. Сафонов), некоторых редкометалльных (А.А. Тишкин) и других месторождений.

Выделены и охарактеризованы важнейшие пространственные типы локальной зональности в размещении минеральных комплексов, слагающих рудные тела и месторождения, а также в пределах рудных полей и рудных узлов. Подчеркнута важная роль горизонтальной, вертикальной и особенно объемной зональности при оценке перспектив фланговых и глубоких частей рудных месторождений и при поисках скрытого оруденения.

4. Выявлены благоприятные условия и важнейшие факторы возникновения зональности. Показаны различия в степени контрастности и характере проявления зональности в зависимости от глубинности формирования месторождений, удаленности от интрузивных тел и эрозионного среза. Наиболее четко и контрастно разнообразные типы зональности наблюдаются в месторождениях, сформированных в гипабиссальных фациях глубинности, в эндо- и экзоконтактных зонах интрузивов, в надинтрузивной зоне скрытых массивов и т.д. По условиям поступления постмагматических и иных растворов в область рудоотложения различают: а) одноактный непрерывный поток растворов, обуславливающий одностадийный процесс эндогенной минерализации;

б) многократный, прерывистый поток растворов и многостадийный процесс минерализации.

В соответствии с этим различают два генетических класса зональности: одностадийная и многостадийная.

Среди факторов возникновения одностадийной зональности выделены две группы — геологические и физико-химические (Онтоев, 1974). К геологическим факторам образования зональности относятся влияние литологического состава вмещающих пород, особенности развития рудовмещающих структур, влияние физико-механических свойств и проницаемости пород, пострудный метаморфизм и смешение ювенильных растворов с вадозовыми водами. Физико-химическими факторами возникновения одностадийной зональности являются температурный градиент, изменения кислотности-щелочности растворов, градиент концентрации компонентов в растворах, градиент окислительно-восстановительного потенциала, перепад давлений, устойчивость комплексных соединений и т.д. Влияние указанных факторов на возникновение зональности в целом неодинаково и в ряде случаев роль некоторых факторов в достаточной мере еще не изучена. Тем не менее с учетом отчетливого влияния основных факторов выделены и генетические типы одностадийной зональности, в частности литологическая, структурная, температурная, кислотно-основная, концентрационная и т.д.

5. Результаты исследований по изучению стадийности и зональности гидротермальных месторождений вносят определенный вклад в развитие теории рудообразования. Разработка достоверных критериев стадийности минерализации позволяет более строго обосновать пульсационную теорию (Кига́й, 1974). Установленные закономерности вертикальной зональности метасоматически измененных гранитов и оруденения в рудоносных массивах, а именно отсутствие зоны выщелачивания рудных элементов в вертикальной колонке измененных гранитов, показали несостоятельность гипотезы о метасоматической мобилизации рудных элементов из самих гранитов при образовании месторождений (Онтоев, 1974).

Детальный анализ минеральных парагенезисов околорудных метасоматитов и рудных тел, поведение в них рудных, щелочных и летучих компонентов позволили высказать гипотезу о переносе ряда тяжелых металлов (W, Mo, Sn и др.) в форме галоидно-гидросульфидных, оксигалоидно-гидротермальных и смешанных галоидно-гидросульфидно-бикарбонатных комплексов (Онтоев, 1974). Наконец, наблюдаемая зональная смена минеральных ассоциаций в рудных телах позволяет судить об изменениях тех или иных геологических и физико-химических условий рудоотложения, о роли коллоидов в рудном процессе (Кига́й, 1974) и др.

6. Данные исследований по локальной зональности месторождений могут быть использованы и используются при оценке перспектив рудоносных площадей, флангов и глубоких горизонтов месторождений и при поисках скрытого оруденения. (Прогнозирование скрытого оруденения на основе зональности гидротермальных месторождений, 1975).

## *Металлогения рудных районов*

Новое научное направление — изучение металлогении рудных районов возникло в ИГЕМ АН СССР в начале шестидесятых годов и в настоящее время все больше обособливается от региональной металлогении по принципам и методам исследования.

Главными задачами этого научного направления, исследования по которому ведутся лабораторией металлогении рудных районов, руководимой И.Н. Томсоном, являются разработка методов локального прогнозирования и изучение типовых районов.

Возможности создания новых принципов как металлогенического районирования, так и локальных прогнозов опираются на разработанные в последние годы представления о новых, ранее систематически не изучавшихся типах рудоконтролирующих структур. Изучение новых типов структур стало возможным благодаря внедрению комплексного методического подхода, включающего также морфоструктурный анализ.

Проведено разделение рудоконтролирующих факторов на факторы концентрации и факторы специализации. На примере как Западного, так и Восточного Забайкалья разработан новый тип структурной основы для схем металлогенической зональности областей тектономагматической активизации. В качестве последней предложено принять палеотектонические схемы рудоносных эпох. Последние в Забайкалье отвечают сводово-глыбовому этапу развития региона, охватывающему период от поздней юры до раннего мела включительно. Массовые геохронологические определения и изучение взаимоотношений между рудными формациями позволили выяснить, что формирование эндогенной минерализации происходило здесь в четыре последовательных этапа с направленной сменой от плутогенных высоко- и средне-температурных месторождений в конце юры до эпitherмальных близповерхностных в нижнем мелу.

Структурная перестройка, которая происходила на рубеже юры и мела, определила большую разницу в структурных условиях размещения разновозрастной минерализации. Причем металлогенические зоны позднейюрской эпохи имеют дугообразную и концентрическую форму и контролируются локальными сводовыми поднятиями того же периода, а раннемеловые обрамляют огромный мегасвод Восточного Забайкалья. При этом выяснено, что металлогенические зоны охватывают не всю территорию региона, а обычно периферические части сводовых поднятий (В.С. Кравцов).

Разработаны приемы выявления самих сводово-глыбовых структур, которые помимо составления палеотектонических схем опираются на привлечение морфоструктурных и геофизических данных. Обращено внимание на зональное размещение различных фаций магматических пород вокруг сводовых поднятий.

Специально рассмотрен вопрос о прогнозе металлогенических зон с новыми типами оруденения. Последние прогнозируются на основе анализа рядов рудных формаций, привлечения геологических аналогий

и геохимических данных, в частности по специализированным магматическим комплексам. Л.Г. Филимоновой проведен статистический анализ специализации вулканитов с помощью ЭВМ. Полученные данные позволили выявить пояса развития вулканитов, специализированных на определенных виды полезных ископаемых.

Впервые рассматривается проблема специфического контроля крупных рудных объектов, позиция которых определяется факторами концентрации оруденения. Важнейшие среди них — сквозные структуры рудоконцентрирующего типа. Разработаны признаки, позволяющие выделять как сами сквозные структуры, так и системы, имеющие рудоконцентрирующее значение. В числе этих признаков — группы геологических, морфоструктурных и геохимических аномалий. Для документации сквозных структур принято составление схем — накладок по отдельным индикаторным признакам.

Рудоконцентрирующая система выявляется при сопоставлении сквозных структур со схемами интенсивности оруденения (распределения плотностей запасов руд на площади). Установлено, что другими признаками этой системы могут быть сдвиги в изотопном составе свинца в сторону уранового производного, определенные типы региональных метасоматитов и т.д.

Разработаны приемы документации разломов фундамента и проведена статистическая оценка углов их пересечения как фактора, контролирующего оруденение. Развиваются представления о структурах очагового типа как эндогенных наложенных формах, связанных с локальным вертикальным воздействием разуплотняющихся масс очагов. Разработана систематика этих структур и выделены участки, благоприятные для локализации оруденения в их пределах.

Сопоставление схемы очаговых структур с очертаниями известных рудоносных площадей показывает обычно хорошее совпадение. Поэтому очаговые структуры были выбраны в качестве исходных объектов локального прогноза. Это оправдывается тем, что по своей природе эндогенные структуры, связанные с воздействием магматических очагов, и их возникновение является следствием дифференциации глубинного вещества.

При решении вопросов локального прогноза помимо очаговых структур рассматриваются и другие факторы концентрации оруденения, такие, как сквозные структуры, узлы пересечения разломов фундамента, наличие благоприятных вмещающих пород. Каждый из факторов оценивается отдельно по видам полезных ископаемых в баллах, отражающих степень вероятности встретить оруденение. На этой основе А.А. Беляевым математическими методами были сделаны количественные оценки прогнозных площадей.

Специальное развитие в лаборатории получили методы анализа форм современного рельефа, разрабатываемые Н.Т. Кочневой. Они были ориентированы на выявление структур орогенного типа: сводовых и купольных поднятий, а также линейных сквозных структур. Получен первый опыт по дешифрированию космических снимков, ориентированный на выявление этих же типов структур. Широкое привлечение

этих методов стало возможным благодаря установленной унаследованности орогенных форм, возникших в разные периоды геологического развития регионов.

Исследования по разработке методов локального прогнозирования были завершены составлением макетов прогнозных карт Восточного Забайкалья, которые иллюстрируют названный метод.

Специальные опытно-методические исследования в пределах Усть-Карского рудного района, проведенные В.П. Полоховым и И.В. Поповым, позволили разработать метод количественного прогнозирования оруденения при составлении прогнозных карт масштаба 1 : 50 000.

Выполненные исследования позволили предложить ряд конкретных прогнозных рекомендаций.

Результаты проведенных исследований были изложены в ряде публикаций, основные из которых принадлежат следующим авторам: И.Н. Томсон, М.А. Фаворская (1968); И.Н. Томсон и др. (1969), Е.Т. Шаталов, И.Н. Томсон, Р.М. Константинов, А.В. Орлова (1972); М.А. Фаворская, И.Н. Томсон, О.П. Полякова и др. (1974).

### *Рудоносные структуры активизированных областей*

Процессы тектоно-магматической активизации, которые в последнее время привлекают особое внимание геологов-рудников, мощно и широко проявлены, в частности в Восточной Азии. В мезозойское время они охватили обширные пространства Сибирской и Китайской платформ, байкальских, каледонских и герцинских складчатых областей. Сравнительное изучение активизированных платформ показало, что характер тектонических движений этапа активизации в значительной степени определяется возрастом и степенью консолидации фундамента (Казанский, 1972<sub>1</sub>). Последняя влияет и на строение платформенного чехла — его мощность, устойчивость фаций, дифференциацию на конседиментационные прогибы и поднятия. Так, на Алданском щите, где фундамент сложен архейскими ультраметаморфическими породами, окончательно консолидированными на границе нижнего и среднего протерозоя, платформенный этап продолжался свыше миллиарда лет и мезозойские тектонические движения проявились в виде пологих изгибов и ступенчатых перемещений кристаллического основания совместно с маломощным и выдержанным осадочным чехлом. В западной эпипротерозойской части Южно-Китайского массива платформенные отложения накапливались почти непрерывно от синия до триаса, достигают мощности 8—10 км и залегают в виде моноклиналей, коробчатых и сундучных складок. Наконец, в восточной эпикаледонской части Южно-Китайского массива наблюдаются наибольшая изменчивость платформенного чехла и наиболее интенсивные его дислокации — вплоть до линейных и дугообразных складок с крутыми углами наклона слоев, осложненных многочисленными разломами.

Как известно, складчатым областям свойственно поясовое размещение интрузивов и ассоциирующих с ними эндогенных месторожде-

ний, подчиняющихся простиранию геосинклинальных зон. На активизированных платформах внедрение молодых интрузий ознаменовано резким изменением тектонического плана и постмагматическое оруденение приобретает не линейное, а площадное распространение и накладывается на самые разнородные структурные элементы предшествующих этапов развития.

Эндогенное оруденение, связанное во времени с заключительными стадиями образования орогенного структурного этажа, выходит далеко за пределы зон наземного вулканизма и при благоприятных условиях локализуется и в платформенном чехле, и в породах фундамента. Именно здесь возникают месторождения, не имеющие полных аналогов в складчатых областях. Для образования постмагматических месторождений наиболее благоприятные условия создаются, по-видимому, в тех районах, где платформенный чехол имеет сравнительно небольшую мощность, не превышающую 4–5 км. Этим условиям отвечают Алданский щит и эпикаледонская часть Южно-Китайского массива. В районах с глубоко опущенным фундаментом и наиболее полными разрезами осадочного чехла, достигающего 8–10 км, мезозойский магматизм проявлен гораздо слабее, а месторождения представлены телетермальным типом.

Анализ геологической истории пограничных зон активизированных платформ позволяет подразделять эти зоны на две группы: длительного сквозного и кратковременного развития (Казанский, Терентьев, 1968). Первые отличаются унаследованностью структурного плана с докембрийского времени, вторые связаны с отдельными стадиями формирования смежных геосинклинальных зон. Длительно существующим краевым швам соответствуют полициклические рудные пояса с разнообразным эндогенным оруденением (олово, вольфрам, медь свинец, цинк, молибден, золото, сурьма и др.); перикратонные прогибы представляют большой интерес на телетермальное свинцово-цинковое оруденение.

Вследствие разнородности структурных элементов Восточной Азии, вовлеченных в тектоно-магматическую активизацию неодинакового возраста и степени консолидации фундамента, большой изменчивости разрезов платформенного чехла, различного геологического строения орогенного структурного этажа в разных районах устанавливаются разные сочетания региональных и локальных рудоносных структур, определяющих геологическую позицию и структурный тип эндогенных рудных полей мезозойского возраста. В основу их группировки положены два признака: приуроченность оруденения к тому или иному структурному этажу и наличие или отсутствие мезозойских интрузивов и экструзивов кислого – щелочного состава. Соответственно выделены три группы и шесть типов структур гидротермальных и контактово-метасоматических рудных полей.

Особенно интересны рудоносные разломы кристаллического фундамента с их "сверхдлительным" развитием и совмещенной вертикальной структурной зональностью. Наблюдения за внутренним строением этих разломов позволяют установить основные этапы их формиро-

вания и сопоставить их с условиями дислокационного метаморфизма.

Сверху вниз выделены пять глубинных уровней дислокационного метаморфизма, которым соответствуют: I — "сухие" зоны брекчирования и трещиноватости горных пород, II — дизъюнктивные нарушения с тектоническими глинками, III — зоны эпидот-хлоритовых катаклазов и милонитов, IV — зоны биотит-амфиболовых бластокатаклазитов и бластомилонитов, V — зоны изоклинальных складок, будинажа и гранитных инъекций.

Переход от нижних уровней к верхним означает не только изменение минеральных ассоциаций деформированных горных пород, но и последовательное развитие дизъюнктивов при все большей величине размыва кристаллического фундамента. С этих позиций минеральный состав тектонитов является критерием и глубины формирования, и относительного возраста дизъюнктивов.

Было показано, что рудоносные щелочные метасоматиты трех разных типов, залегающие в крупных разломах кристаллического фундамента, контролируются разными по глубинности структурными элементами (Казанский, 1972<sub>2</sub>). Так, высокотемпературные кварц-микроклиновые метасоматиты с редкоземельной минерализацией сопровождают зоны биотит-амфиболовых бластомилонитов, среднетемпературные ураноносные, альбититы сопряжены с эпидот-хлоритовыми милонитами и катаклазитами, а низкотемпературные золотоносные кварц-ортоклазовые метасоматиты локализуются в зонах дробления и трещиноватости. Поэтому было высказано предположение о существовании определенных связей между условиями дислокационного метаморфизма и эндогенного рудообразования. Новые наблюдения подтверждают это предположение и позволяют утверждать, что переход от более глубинных уровней дислокационного метаморфизма к менее глубинным сопровождается сменой высокотемпературных месторождений низкотемпературными. Соответственно эндогенные месторождения, залегающие в кристаллическом фундаменте, могут быть разделены на пять групп. Каждой группе присущи свои наборы полезных компонентов, типы околорудных изменений и рудовмещающих структур.

Так, для самого нижнего уровня характерны мусковитовые и керамические пегматиты, магнезиально-скарновые месторождения флогопита и магнетита, локализация которых определяется благоприятными горизонтами, складчатыми и особыми разрывными структурами, возникающими на передовом фронте гранитизации ультраметаморфических пород.

Крупные региональные зоны биотит-амфиболовых бластомилонитов контролируют размещение высокотемпературных калиевых метасоматитов с танталовой, ниобиевой, бериллиевой минерализацией, а также редкометалльных пегматитов.

На уровне эпидот-хлоритовых милонитов и катаклазитов ведущую роль в рудообразовании играют среднетемпературные метасоматические процессы. Для этого уровня типичны региональные зоны ураноносных

альбититов и золотоносных диафторитов вне видимой связи с магматизмом.

Наконец, два верхних уровня отражают ту обстановку близповерхностных деформаций, в которой формируются многочисленные гидротермальные месторождения свинца, цинка, золота, сурьмы, урана, висмута, кобальта, никеля, флюорита и др. Это область необычно разнообразных трещинных структур, низкотемпературных гидротермальных изменений и различных комбинаций между метасоматозом и заполнением рудным веществом открытых полостей.

### *Структуры рудных полей и месторождений*

Исследования проводятся сотрудниками лаборатории структур рудных полей и месторождений под руководством Л.И. Лукина. Они направлены на познание взаимосвязей между условиями формирования эндогенных рудных месторождений и геологической историей рудоносных территорий и основываются на детальном изучении преимущественно крупных, хорошо вскрытых месторождений. При этом структуры их рассматриваются в аспекте последовательного развития, выясняется тектоническая обстановка, свойственная отдельным стадиям рудообразования, учитывается также влияние на локализацию оруденения химических и физико-механических свойств вмещающих пород.

Такой комплексный подход позволяет определить роль различных факторов в формировании структур месторождений разных генетических типов.

Сравнительное изучение собственно магматических месторождений хромита, развитых в пределах территории с различной историей геологического развития, показало существенные отличия в их структуре (Г.Г. Кравченко). Месторождения платформенных областей формируются в условиях спокойной тектонической обстановки становления материнских интрузивов гипербазитов. Соответственно рудные тела имеют простую пластообразную форму и выдержанное залегание на значительных площадях.

Для месторождений хромитов в геосинклинальных областях характерны более сложные условия локализации оруденения, что обусловлено беспокойной тектонической обстановкой формирования рудовмещающих массивов ультрабазитов. Рудные тела имеют весьма сложную форму и условия залегания. Часто отмечаются признаки растяжения в ходе кристаллизации ("растаскивание"), своеобразные изгибы, складки, нередко также будинирование, разрывы и жилообразные выделения хромитов.

Все эти особенности формы рудных тел обусловлены интенсивным и многократным проявлением пластических и хрупких деформаций в процессе локализации оруденения.

Структурные условия формирования постмагматических месторождений в значительной мере определяются приуроченностью к тому

или иному структурному этажу и ярусу, как образованиям, отражающим отдельные крупные этапы геотектонического развития территории (Вольфсон и др., 1969; Структурные условия формирования эндогенных рудных месторождений, 1973). Благодаря разным условиям формирования структурные этажи и ярусы различаются литологическим составом, физико-механическими и химическими свойствами слагающих пород, степенью их метаморфизма, особенностями магматизма и тектоники.

Общая тенденция изменения структурных условий рудоотложения от нижних этажей к верхним проявляется в закономерной смене преимущественно пластических деформаций на хрупкие, складчатых дислокаций на разрывные, в повышении роли контрастности физико-механических свойств пород, а также в возрастающем значении процессов выполнения при рудообразовании по отношению к замещению.

Для нижних структурных этажей, сложенных обычно интенсивно дислоцированными, в той или иной степени метаморфизованными толщами, характерно проявление комбинированных складчато-трещинных структур. Оруденение развивается при существенной роли замещения благоприятных по составу пород и прослеживается без изменения на значительную глубину. Последнее особенно характерно для месторождений в кристаллическом фундаменте, где молодое оруденение наложено на хорошо проработанные тектонические зоны.

Для нижних структурных этажей характерно развитие высоко-среднетемпературных месторождений.

В верхних структурных этажах геосинклинальных областей и платформенных образованиях, как правило, слабо метаморфизованных, характерно преобладающее развитие трещинных структур; при этом существенную роль играют различия в физико-механических свойствах пород. Оруденение локализуется главным образом путем выполнения трещин и пор и не прослеживается на значительную глубину.

Для верхних этажей более характерны близповерхностные средние и низкотемпературные месторождения.

На формирование эндогенного оруденения существенное влияние оказывает также сочетание структурных этажей и ярусов в разрезах отдельных тектонических блоков (Структурные условия..., 1973; Чернышев, Корин, 1973). Для формирования крупных месторождений геосинклинальных областей благоприятны участки с относительно непроницаемыми отложениями верхнего структурного яруса (Малиновский, 1968).

Структурные особенности эндогенных месторождений существенно зависят от положения относительно фундамента (Казанский, 1968). С приближением к нему большее значение приобретают трещинные структуры.

В общем случае наиболее вероятно возникновение рудных полей в тектонических блоках, содержащих контрастные по литологическому составу и строению структурные этажи и ярусы.

Выяснено, что изменение структурных условий локализации оруденения оказывает существенное влияние на изменение основных

параметров рудообразования и соответственно в какой-то мере определяет ход этого процесса (Лукин и др., 1974).

Более высокотемпературные минеральные ассоциации возникают без существенного трещинообразования, при слабой открытости системы рудоотложения. Процесс минерализации протекает при затрудненном просачивании растворов, путем реакции с благоприятными породами, главным образом путем замещения. Таковы биметасоматические скарны, развивающиеся в условиях проявления пластических деформаций (Чернышев, 1961), а также грейзены под слабо нарушенной кровлей.

Менее высокотемпературные ассоциации формируются в условиях тектонически напряженной среды в непротяженных разобщенных трещинах разного происхождения, путем замещения и выполнения. Таковы инфильтрационные скарны и высокотемпературные кварцево-оловорудные, кварцево-вольфрамовые жилы и т.д.

Среднетемпературные минеральные ассоциации развиваются уже в условиях проявления объединенных разломов, путем выполнения, частично замещения. И наконец, низкотемпературные месторождения развиваются в связи с крупными сосредоточенными разломами, в оперяющих их трещинах.

Таким образом, с усложнением структур (и увеличением структурной открытости среды рудоотложения) развиваются все более низкотемпературные ассоциации.

В общем случае более высокотемпературные месторождения характерны для нижних структурных этажей. Однако они могут проявиться и в верхних этажах, если возникнут условия существенной структурной закрытости среды рудоотложения.

Детальные исследования на ряде постмагматических рудных месторождений и анализ материалов других геологов позволяют прийти к выводу, что верхние части средне- и низкотемпературных месторождений свинца, цинка, флюорита, золота и других металлов формируются обычно на глубине 400–800 м. Высокотемпературные свинцово-цинковые месторождения скарновой формации, а также некоторые вольфрамовые, оловорудные и молибденовые месторождения, связанные с грейзенами, развиваются на несколько большей глубине, порядка 1000–200 м (Чернышев, 1974).

Большинство гидротермальных месторождений заканчивается на глубине 1–1,5 км от земной поверхности. Лишь некоторые месторождения в нижнем структурном этаже прослеживаются до 2,5–3,5 км по вертикали.

Существенное развитие получили идеи структурной зональности, выдвинутые А.В. Королевым и В.М. Крейтером. Показано, что зональное развитие рудоконтролирующих структурных элементов закономерно для условий средней и особенно малой глубинности и является одним из определяющих факторов зонального проявления рудной минерализации.

Для месторождений средних глубин структурная зональность в общем виде выражается в смене с глубиной трещинных структур

зонами пластических деформаций. Стадийное, зональное проявление деформаций разного вида на средних глубинах наиболее полно изучено для скарново-рудных полей. Малоглубинные месторождения характеризуются зональным развитием разрывных рудоконтролирующих деформаций. Их проявление, как и для условий средних глубин, непосредственно связано с особенностями геологического развития рудоносных территорий.

Показано важное значение знаний о структурной зональности для направления геологоразведочных работ.

Помимо изучения структур месторождений уделяется внимание разработке новых и усовершенствованию старых методов исследования, а также расширению возможностей их применения.

Разработан метод относительной оценки Р-Т условий формирования рудоконтролирующих нарушений в мраморизованных известняках на скарновых месторождениях с помощью микроструктурного анализа (Чернышев, 1974). Пластическая деформация карбонатных пород достаточно полно может быть оценена общей деформированностью зерен кальцита и степенью последовательного развития двойников по плоскостям  $(10\bar{2}1)$  и  $(10\bar{1}1)$ , отнесенными к единице объема.

Выяснено, что пластическая деформация в этих нарушениях проявляется при относительно более высокой температуре и меньшем, всестороннем давлении, чем в блоках прилежащих пород. Соответственно зоны пластических деформаций, сопровождающих рудоконтролирующие нарушения, могут играть роль насосов, подсасывающих рудоносные растворы.

Предложен оригинальный метод расшифровки залегания пород на площадях сложного складчато-блокового строения (Е.П. Малиновский). Он основан на статистическом измерении элементов залегания и определении положения оси  $z$  структуры на отдельных участках. Этот метод позволяет выделить отдельные тектонические блоки, выявить особенности складчатого строения каждого из них, в частности установить наличие наложенных складок.

Для выявления ориентировки зерен хромшпинелидов в рудах усовершенствованы известные методы их травления. Термическое травление проводилось путем нагревания в окислительном пламени паяльной трубки поверхности образца, покрытой порошком пиросульфата калия. При электротравлении использовался постоянный ток (6v, 0,3–0,5A).

Наличие многочисленных материалов, характеризующих разнообразные рудоконтролирующие деформации, их связи с общим геологическим развитием рудоносных территорий, а также с проявлением рудной минерализации, выдвигает следующие основные задачи дальнейших исследований.

1. Систематизация данных, характеризующих развитие рудоносных структур в областях с различным геотектоническим режимом,

2. Выяснение физической и физико-химической сущности явлений, возникающих при развитии тектонических деформаций, и их роли в формировании эндогенного оруденения.

Эти задачи могут быть решены при дальнейшем углублении и усовершенствовании традиционных геолого-структурных исследований, при улучшении их методической оснащенности, при значительном увеличении экспериментальных работ с максимальным приближением их проведения к реальным геологическим условиям.

### *Систематика рудных формаций*

За последние годы в Институте получило развитие изучение эндогенных рудных формаций. Было сформулировано определение эндогенных рудных формаций как групп месторождений со сходным минеральным составом и близкими геологическими условиями образования и определены основные принципы изучения рудных формаций, среди которых главным является выделение рудных формаций путем изучения объективных эмпирически устанавливаемых особенностей (Константинов, 1973).

Исследование рудных формаций проводилось в тесной связи с изучением задач металлогении рудных районов, но затем определилось как самостоятельное направление сравнительного изучения месторождений, названное формационным анализом эндогенных рудных месторождений.

Был предложен специальный подход к сравнительному изучению месторождений и прогнозу вероятных типов оруденения, получивший название метода изучения рядов рудных формаций. Этим методом изучены оловорудные, золоторудные и полиметаллические формации Восточного Забайкалья и установлены некоторые геологические факторы, оказывающие существенное влияние на изменение их минерального состава.

В совокупности с изучением абсолютного возраста исследование рядов рудных формаций позволило выявить закономерности в последовательности образования месторождений различных формационных типов, наличие особого вида зональности оруденения в масштабах рудных полей, напоминающей "температурную" зональность, но на самом деле связанную с изменением положения источника оруденения во времени.

Разработанные принципы рудно-формационного анализа послужили основой для создания новых, обоснованных большим эмпирическим геологическим материалом, классификаций вольфрамовых, оловянных, свинцово-цинковых, золотых, флюоритовых месторождений. Этот подход позволил, в частности, установить, что среди гидротермальных месторождений олова есть конвергентные группы и что среди них необходимо выделять геологические типы "плутонический" и "вулканический".

Для месторождений вольфрама показана необходимость разделения на скарновую и грейзеново-жильную кварцевую группы. Внутри этих групп различаются четырнадцать вольфраморудных формаций в зависимости от ведущих металлов продуктивных ассоциаций и геотектонической обстановки формирования.

Для свинца и цинка предложена классификация с разделением всех месторождений на четыре группы в зависимости от вмещающих карбонатных, силикатных, вулканогенно-осадочных и метаморфогенных пород. Выделенные группы подразделяются на девять формаций в зависимости от соотношений главных рудных минералов, а рудные формации — на минеральные типы месторождений.

Разработана формационная классификация медно-колчеданных месторождений. Среди них в зависимости от минерального состава и геологических условий образования различаются семь формационных типов.

Было установлено, что вся группа эпитермальных сурьмяно-ртутных месторождений по существу представляет собой единую рудную формацию, в которой выделены ртутная, сурьмяно-ртутная и ртутно-сурьмяная субформации, а в этих последних — минеральные типы месторождений.

Для флюоритовых месторождений выявлено восемь формаций, среди которых главные: флюорит-слюдисто-берtrandитовая, флюорит-полиметаллическая и флюорит-кварцевая.

Для месторождений золото-сульфидно-кварцевой группы получила дополнительное подтверждение и обоснование формационная классификация, в которой главным геологическим фактором, влияющим на минеральный состав, признана глубина образования. Соответственно эти месторождения подразделяются на рудные формации больших, средних и малых глубин.

Принятый подход к изучению рудных формаций открыл также широкую дорогу для применения математических методов обработки геологических данных.

#### СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИЗУЧЕНИЯ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

В настоящее время перед металлогеническими прогнозами поставлена задача: перейти от прогнозов качественных к прогнозам количественным. Именно этим целям отвечают разрабатываемые математической группой отдела геологии эндогенных рудных месторождений Института логико-информационные методы, позволяющие эффективно обрабатывать геологические данные при решении прогнозно-металлогенических и других геологических задач, давать количественную оценку вероятных масштабов месторождений, прогнозную оценку глубины распространения оруденения.

Применение этих методов позволило приступить к статистическому обоснованию классификации рудных формаций с учетом всех особенностей минерального состава и геологических условий образования месторождений. Были найдены принципиально новые пути решения прогнозных металлогенических задач, основанные на изучении кибернетических моделей геологических объектов. В отличие от других математических методов распознавания разработанные методы

характеризуются следующими особенностями: 1) используется эвристическое расположение информации об эталонных объектах в виде ранжированного (вариационного) ряда, составленного в соответствии с монотонным изменением изучаемого свойства (масштабы, глубина формирования и т.д.); 2) производится растяжение признакового пространства и взвешивание значений параметров эталонов с помощью специальных функций (смещенный треугольник Паскаля); 3) поиски тестов и тесторов для получения информационных весов признаков и объектов в ряде случаев осуществляются с помощью графов без применения ЭВМ.

С помощью разработанных методов с высокой точностью (вероятность правильного распознавания 85–97%) решена серия прогнозных задач по определению масштабов оловорудных месторождений Приморья, золоторудных месторождений Кузнецкого Алатау и Восточных Саян, ртутных месторождений Северо-Востока СССР. Для оловорудных месторождений Приморья установлено хорошее соответствие найденных информационных весов с масштабами месторождений и дана количественная оценка роли геологических признаков при рудообразовании; для ртутных и золоторудных месторождений получены количественные характеристики степени благоприятности сумм геологических признаков в образовании крупных промышленных концентраций золота и ртути и установлено соответствие между "весами" месторождений и масштабами оруденения.

С помощью разработанных методов выявлены и количественно охарактеризованы геологические признаки, наиболее тесно связанные с глубиной становления золотого оруденения и определены вероятные глубины образования месторождений золото-сульфидно-кварцевой группы. Установлены факторы, определяющие соотношения олова и вольфрама в рудах месторождений касситерит-вольфрамит-кварцевой формации.

Были найдены пути перехода к количественной оценке региональных металлогенических прогнозов в цифровом выражении и определению вероятных масштабов прогнозируемых месторождений различных металлов по минимальному объему качественной информации. Вскрыты возможности выяснения и оценки влияния геологических факторов на результаты различных природных процессов без анализа сложного и во многом еще неясного механизма самих процессов.

Предложенные способы кибернетического моделирования способствуют выявлению новых закономерностей различных геологических процессах на основе количественных оценок взаимодействия управляющих процессами качественных факторов.

Разработанные методы прогноза вероятных масштабов оруденения по ограниченному набору признаков позволяют с минимальными затратами проводить разбраковку рудных объектов разного экономического значения и осуществлять выбор наиболее эффективных направлений для поисково-разведочных работ, в результате чего может быть достигнуто значительное повышение экономичности и надежности оценки рудных районов и месторождений.

Выявлены перспективные месторождения олова и ртути, рекомендации по ревизии которых направлены в Министерство геологии СССР и территориальные геологические управления. Часть из этих рекомендаций уже подтверждена геологической разведкой.

В порядке выяснения возможностей распространения областей применения кибернетических методов была разработана модификация тестового метода, позволившая выявить наиболее благоприятные условия для синтеза искусственно окрашенного кварца и прогнозировать эксперименты по выращиванию кварца нужных окрасок на промышленных установках.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Вольфсон Ф.И., Лукин Л.И., Чернышев В.Ф., Корин И.З., Малиновский Е.П., Сафонов Ю.Г. Структурные условия локализации гидротермального оруденения в различных структурных этажах. — В сб. "Проблемы геологии минеральных месторождений, петрологии и минералогии", т. I. "Наука", 1969.
- Генкин А.Д. Минералы платиновых металлов и их ассоциации в медно-никелевых рудах Норильского месторождения. "Наука", 1968.
- Генкин А.Д., Дистлер Е.З., Лапутина И.П., Филимонова А.А. К геохимии палладия в медно-никелевых рудах. — Геохимия, 1973, № 9.
- Генкин А.Д., Тронева Н.В., Журавлев Н.Н. Первая находка в рудах сульфида калия, железа и меди — джерфишерита. — Геол. рудн. месторожд., 1969, № 5.
- Дистлер В.В., Генкин А.Д., Филимонова А.А., Хитров В.Г., Лапутина И.П. Зональность медно-никелевых руд Талнахского и Октябрьского месторождений. — Геол. рудн. месторожд., 1975, № 2.
- Дубровский В.Н. Стадии минерализации и зональность касситеритово-сульфидного Хрустального месторождения (Дальний Восток). — В кн. "Проблемы постмагмат. рудообразования", т. I. Прага, 1963.
- Евстигнеева Т.Л., Генкин А.Д., Тронева Н.В., Филимонова А.А., Цепин А.И. Шадлунит — новый сульфид меди, железа, свинца, марганца и кадмия из медно-никелевых руд. — Записки Всес. мин. об-ва, 1973, вып. I.
- Зональность гидротермальных месторождений (под ред. Г.А. Солокова), т. I, II. "Наука", 1974.
- Казанский В.И. Структурные условия локализации постмагматического оруденения на активизированных платформах. — В кн. "Эндеогенные рудные месторождения". Межд. геол. конгр., XXIII сессия. Доклады советских геологов. Проблема 7. "Наука", 1968.
- Казанский В.И. Рудоносные тектонические структуры активизированных областей. "Недра", 1972.
- Казанский В.И. Дислокационный метаморфизм и эндогенное рудообразование в разломах кристаллического фундамента. Межд. геол. конгр., XXIV сессия. Доклады советских геологов. Минеральные месторождения. "Недра", 1972.
- Кизай И.Н. О роли коллоидов в гидротермальном рудообразовании. — В кн. "Проблемы эндогенного рудообразования". "Наука", 1974.
- Коваленкер В.А., Лапутина И.П., Генкин А.Д., Вьяльсов Л.Н., Евстигнеева Т.Л. Минералы теллура в сульфидных медно-никелевых рудах Талнахского и Октябрьского месторождений (Норильский район). — Изв. АН СССР, серия геологическая, 1972, № 11.
- Константинов Р.М. Основы формационного анализа гидротермальных рудных месторождений. "Наука", 1973.
- Константинов Р.М., Сиротинская С.В. Логико-информационные исследования эндогенных рудных формаций и вариационные ряды рудных месторождений. — В сб. "Проблемы эндогенного рудообразования". "Наука", 1974.
- Кравченко Г.Г. Роль тектоники при кристаллизации хромитовых руд Кемпирсайского плутона. "Наука", 1969.

- Лукин Л.И., Корин И.З., Кравченко Г.Г., Малиновский Е.П., Сафонов Ю.Г., Чернышев В.Ф. Структурные условия рудообразования как один из факторов, определяющих генетические особенности эндогенных рудных месторождений. – В сб. "Проблемы эндогенного рудообразования". "Наука", 1974.
- Онтоев Д.О. Стадийность минерализации и зональность месторождений Забайкалья. "Наука", 1974.
- Особенности структур гидротермальных рудных месторождений в различных структурных этажах и ярусах (под ред. Л.И. Лукина). "Наука", М., 1968.
- Павлов Д.И. Значение экзогенных хлоридных вод для формирования рудообразующих растворов эндогенных месторождений разных стадий геосинклинального цикла геологического развития. – В кн. "Проблемы эндогенного рудообразования". "Наука", 1974.
- Павлов Д.И. Экзогенные хлоридные воды и эндогенное рудообразование. "Недра", 1975.
- Павлов Н.В., Кравченко Г.Г., Цупрынина И.И. Хромиты Кемпирсайского плутона. "Наука", 1968.
- Павлов Н.В., Григорьева И.И. Закономерности формирования хромитовых месторождений. "Наука", 1973.
- Павлов Н.В., Григорьева И.И. Месторождения хрома. – В кн. "Рудные месторождения СССР", т. 1. "Недра", 1973.
- Павлов Н.В., Григорьева И.И., Муньос-Урбино М. Хромитоносность ультрабазитов Кубы. – В сб. "Геология полезных ископаемых Кубы". "Недра", 1973.
- Павлов Н.В., Шульгин М.Ф. Хром. "Требования к содержанию и результатам геологоразведочных работ по этапам и стадиям". Методические указания по проведению отдельных этапов геологоразведочных работ. "Недра", 1967.
- Повилайтис М.М. О принципах систематики магматических рудных месторождений (на примере месторождений вольфрама). – В сб. "Проблемы эндогенного рудообразования". "Наука", 1974.
- Прогнозирование скрытого оруденения на основе зональности гидротермальных месторождений. "Недра", 1975.
- Соколов Г.А., Павлов Д.И. Об источниках и роли хлора в эндогенном рудообразовании. – В кн. "Проблемы генезиса руд". Гостеолтехиздат, 1964.
- Структурные условия формирования эндогенных рудных месторождений (под ред. Л.И. Лукина). "Наука", М., 1973.
- Танцаева Г.А., Томсон И.Н. О выделении плутонического и вулканического типов оловянного оруденения. – Геол. рудн. месторожд., 1973, № 3.
- Томсон И.Н., Фаворская М.А. Рудоконцентрирующие структуры и методы локального прогнозирования. – Сов. геол., 1968, № 10.
- Томсон И.Н., Фаворская М.А., В.С. Кравцов и др. Связь магматизма и эндогенной минерализации с блоковой тектоникой. "Наука", 1969.
- Фаворская М.А., Томсон И.Н., Полякова О.П. и др. Глобальные закономерности размещения крупных рудных месторождений. "Наука", 1974.
- Филимонова А.А., Муравьева И.В., Евстигнеева Т.Л. Минералы группы халькопирита в медно-никелевых рудах Норильских месторождений. – Геол. рудн. месторожд., 1974, № 5.
- Чернышев В.Ф. Некоторые структурные особенности локализации известковых скарнов. – Геол. рудн. месторожд., 1961, № 3.
- Чернышев В.Ф. Исследование Р-Т условий формирования рудоконтролирующих нарушений скарновых месторождений с помощью микроструктурного анализа мраморизованных известняков. – Геол. рудн. месторожд., 1974, № 3.
- Шаталов Е.Т., Томсон И.Н., Константинов Р.М., Орлова А.В. Металлогенетический анализ. "Недра", 1972.
- Яблонский С.В., Демидова Н.Г., Константинов Р.М., Кудрявцев В.Б., Королева З.Е., Сиротинская С.В. Тестовый подход к количественной оценке геолого-структурных факторов масштаба оруденения (на примере ртутных месторождений). – Геол. рудн. месторожд., 1974, № 2.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКЗОГЕННЫХ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

## ВВЕДЕНИЕ

При организации Отдела экзогенных месторождений в его состав вошли: Лаборатория коры выветривания, возглавляемая доктором геол.-мин. наук И.И. Гинзбургом, исследовательские группы доктора геол.-мин. наук Б.П. Кротова, занимавшегося изучением осадочных железорудных месторождений и кор выветривания, и доктора геол.-мин. наук Д.Г. Сапожникова, проводившего изучение осадочных месторождений марганцевых и других руд, а также современных озерных отложений.

Основное направление исследований заключалось во всестороннем изучении кор выветривания и связанных с ними месторождений. Эти последние могут составлять часть коры и залегать в составе ее или образовываться за счет разрушения пород, слагающих ее, переноса и седиментации образованных при этом продуктов.

На первом этапе работ тематика Отдела была еще несколько фрагментарной, поскольку заканчивались различные исследования, начатые ранее еще в ИГН АН СССР.

В течение первого этапа сотрудники Отдела проводили интенсивные исследования, направленные на изучение кор выветривания, условий образования руд железа, марганца и бокситов, разработку геохимических методов поисков и изучение зоны окисления сульфидных месторождений.

Участие крупных специалистов обеспечило достаточно глубокое и всестороннее изучение условий разложения минералов при выветривании, формирования коры выветривания, образования остаточных рудных концентраций. Все это позволило провести реконструкцию палеоклиматов для уточнения влияния климатического фактора на ход различных гипергенных процессов и дало возможность исследовать некоторые процессы седиментации, а также условия образования осадочных и вулканогенно-осадочных рудных месторождений.

Успешному проведению работ способствовало наличие в ИГЕМ уже на начальном этапе его существования надлежащей лабораторной базы. Это позволило при выполнении работ основываться на точных количественных определениях, выполнявшихся в то время в различных лабораториях Института.

Значительную роль сыграли полевые исследования, в значительном объеме выполнявшиеся почти всеми сотрудниками Отдела. Они проводи-

лись на территории таких интересных в геологическом отношении регионов, как Урал и Казахстан, а также некоторых районов Русской платформы и Дальнего Востока.

В группе И.И. Гинзбурга продолжалось изучение древних кор выветривания и связанных с ними минеральных месторождений. Исследовалась минералогия и геохимия никеленосной коры выветривания Урала.

И.И. Гинзбург развивал представления, согласно которым выветривание минеральных образований есть результат сложного сочетания процессов окисления, гидратации и замещения, протекающих в зоне гипергенеза. Большое место в его исследованиях заняли вопросы образования различных минералов в коре выветривания. В отдельной статье И.И. Гинзбург (1963<sub>1</sub>) рассмотрел энергетику процессов образования минералов глинистых минералов и, в частности, значения энергии решеток алюмосиликатов в связи с формированием глинистых минералов коры выветривания. На основании обобщения собственного обширного материала и данных других исследований он разработал интересную классификацию древних кор выветривания (Гинзбург, 1963<sub>2</sub>).

В Отделе были начаты физико-химические экспериментальные исследования с целью познания природных гипергенных процессов. Изучались окисление сульфидов, разложение рудообразующих минералов, растворимость кварца, разложение некоторых алюмосиликатов органическими кислотами. И.И. Гинзбург высоко оценивал возможность использования экспериментов для правильного истолкования природных процессов. Результаты этих работ, свидетельствующие об интенсивном разложении минералов под влиянием различных реагентов при комнатной температуре и атмосферном давлении, были описаны им в работах И.И. Гинзбург, Р.С. Яшина (1962), И.И. Гинзбург и др. (1963).

Большое значение имели работы по геохимическим методам поисков руд меди, свинца и цинка, проведенные сотрудниками группы. Результаты исследований в этой области изложены в отдельной книге И.И. Гинзбурга (1957), опубликованной на русском и переведенной на немецкий и английский языки. В ней содержится описание ореолов рассеяния различных металлов и даны практические указания по геохимическому опробованию и оценке его результатов (И.В. Витовская, Ю.Ю. Бугельский, К.М. Муқанов). Проведено изучение зоны окисления сульфидных месторождений, необходимое для разработки теоретических основ геохимических методов поисков. Разрабатывались критерии поисков скрытых рудных тел на месторождениях цветных металлов с помощью гидрогеохимического метода (Бугельский, 1963).

Большие работы были проведены И.В. Витовской на месторождениях Акчагыл и Кызыл-Эспе в Центральном Казахстане, результаты их изложены в двух монографиях.

В монографии "Распределение микроэлементов в метаморфических породах и минералах Акчагыла и Кызыл-Эспе" (Витовская, 1960) выделены парагенетические группы элементов-примесей: Ti, Cr, Y, Ba, Sr, Mn, Sn, Ni, Co, Mo, Pb, Cu и Zn и установлены закономерности их распределения и типоморфные особенности в процессах метаморфизма маг-

матической стадии и на разных стадиях метаморфизма, а также формы их нахождения в породах и минералах. Установлены закономерности образования ореолов рассеяния Pb, Zn, Cu в процессе рудообразования в зависимости от состава вмещающих пород и выявлены силикатные минералы-индикаторы каждого из них.

В монографии "Минеральный состав и поведение микроэлементов в зоне гипергенеза Акчагыл и Кызыл-Эспе" (Витовская, 1962) рассмотрены формы нахождения рудных элементов в породах и минералах и их поведение в процессах выветривания. Установлена последовательность минеральных превращений в зоне окисления месторождений. Показано, что элементарный состав ряда окисленных минералов целиком отражает качественный состав первичных руд, а примерная количественная оценка элементарного состава всей зоны окисления может дать обоснованное представление о соотношениях рудных элементов в первичных рудах. Даны рекомендации для определения "ореольных" содержаний металлов в рыхлых (глинистых) отложениях, перекрывающих рудные полиметаллические месторождения.

Работы группы И.И. Гинзбурга, относящиеся к рассматриваемому периоду, внесли весомый вклад в представления об условиях образования и рудоносности кор выветривания, существовавшие в конце пятидесятых — начале шестидесятых годов. Они оказали значительное влияние на развитие геохимических методов поисков в СССР.

Большие работы проводила группа Б.П. Кротова. Сам он сосредоточил свое внимание на выяснении условий образования и закономерностей размещения осадочных и гипергенных рудных месторождений. В своих исследованиях Б.П. Кротов, так же как и И.И. Гинзбург, исходил из изучения различных объектов, находящихся преимущественно на территории Урала и прилежащих к нему частей Казахской складчатой страны.

В статьях Б.П. Кротова рассмотрены особенности генезиса и условия локализации различных гипергенных месторождений железа и алюминия на территории Уральской геосинклинальной области вообще (1959) и в пределах зеленокаменной полосы Урала в частности (1962). Согласно его представлениям, бокситы мелового возраста восточного склона Урала образовались в тех же районах, что и девонские бокситовые месторождения. Такое совмещение в пространстве палеозойских и мезозойских бокситов объясняется, по его мнению, тем, что последние образовались за счет переотложения материала, образующегося при разрушении бокситов девонского возраста.

Проводилось изучение железных руд Бакальского (Урал) и Лисаковского (Тургай) месторождений. Показано, что сидеритовые руды Бакала представляют собой осадочное образование (Яницкий, 1962). Им составлено также описание Лисаковского месторождения (Яницкий, 1960), оолитовые руды которого он рассматривал как отложения, сформированные в русле палеогеновой речной долины и сходные с Приаральскими железорудными образованиями.

В это же время разрабатывалась общая теория образования гипергенных месторождений железных руд и бокситов. В монографии, опубликованной по этой проблеме (Кротов, 1959), рассмотрены основные

условия, влияющие на образование гипергенных руд. К ним прежде всего относятся климат, господствовавший в течение эпохи рудообразования, структурно-тектонические особенности района рудообразования, наличие источника рудного материала и другие условия. Особенно большое значение придавал Б.П. Кротов палеоклимату региона, проследив с этой целью изменение положения экватора во времени в пределах северного полушария. Помимо этого, им была подмечена пространственная приуроченность к определенной территории рудных месторождений, залегающих как среди палеозойских пород складчатого основания восточного склона Урала, так и среди перекрывающих отложений осадочного чехла.

Одной из последних работ Б.П. Кротова является классификация гипергенных месторождений железа и алюминия Урала (Кротов, Алешин, 1963). В этой классификации, разработанной на генетической основе Б.П. Кротовым совместно с М.И. Алешиним, выделен ряд типов железорудных и бокситовых месторождений и дано их описание. Эта классификация не утратила и поныне своего значения.

Сотрудники группы Д.Г. Сапожникова проводили работы в основном по изучению марганцевых месторождений СССР (Сапожников, 1963).

В это же время были рассмотрены вопросы прогноза рудных месторождений осадочного происхождения. Применительно к условиям платформенных областей они приведены в монографии "К теории прогноза осадочных рудных месторождений" (Сапожников, 1961). Особенности размещения месторождений, лежащие в основе работ по прогнозу, описаны автором в связи с характером геоморфологии регионов, намеченных для проведения прогнозных работ и в зависимости от местоположения источников рудного вещества. В соответствии с этим установлена зональность в распределении осадочных рудных месторождений на платформах.

Помимо этого, сотрудниками группы проведено детальное изучение современных осадков оз. Иссык-Куль. Результаты этой работы опубликованы в монографии "Современные осадки оз. Иссык-Куль и его заливов" (Сапожников, Виселкина, 1960), где изложены материалы, характеризующие особенности размещения илов на дне этого водоема, приведены карты, показывающие особенности распределения основных минеральных компонентов, входящих в состав донных отложений, и освещены условия образования последних.

Проводилось изучение железных руд главным образом на месторождениях КМА (Калганов, 1960). Выполнялись работы, посвященные геологии и полезным ископаемым Тимана (Калюжный, 1959).

На втором этапе с середины шестидесятых годов в работах Отдела экзогенных рудных месторождений четко наметились три основных направления научных исследований:

а) изучение минералогии и геохимии кор выветривания ультраосновных пород и морфогенетических типов связанных с ними месторождений никеля для уточнения условий образования и разработки критериев прогноза гипергенных никелевых руд;

б) познание геологии и вещественного состава основных типов бокситов и характера их связи с корами выветривания с целью разработки

теории бокситообразования и научных основ прогноза бокситовых месторождений;

в) изучение основных типов марганцевых месторождений в геосинклинальных областях на территории СССР для выяснения процессов марганцевого рудообразования, прогноза перспективных площадей и поисков новых месторождений марганцевых руд.

## МИНЕРАЛОГИЯ И ГЕОХИМИЯ КОР ВЫВЕТРИВАНИЯ УЛЬТРАОСНОВНЫХ ПОРОД

В Отделе продолжались работы по изучению никеленосных кор выветривания, проводившиеся на Урале и затем на Кубе.

Большие работы проводились по изучению никеленосной коры выветривания Бурыктальского массива (Никитин, 1962). В работе К.К. Никитина приводится описание кор выветривания и их профилей, развитых на породах ультраосновного, основного и среднего составов. Впервые выделен "смешанный" тип коры выветривания на примере ультраосновных пород массива и приведены ее характерные признаки. Подчеркивается роль гидрохлоритов, приуроченных к зальбандам многочисленных даек, определивших характер основных рудоносных минералов.

При участии геологов Уральского геологического управления написана крупная работа "Никеленосные коры выветривания Урала" (1971), в которой приводятся история исследований древних никеленосных кор Урала и геологический очерк районов их развития. Многочисленные типы никеленосных кор сведены в общую морфогенетическую классификацию. Наиболее характерные типы и подтипы кор выветривания подробно описаны в специальной главе с использованием последних данных. Даются подробное описание главнейших минералов кор выветривания, изученных с применением новейших методов лабораторного исследования, а также описание гидрогеохимических особенностей никеленосных кор выветривания. Рассматриваются геохимические условия формирования профиля коры. Установлено, что миграция никеля в растворенном состоянии происходит преимущественно в органо-минеральной и коллоидной формах, лишь незначительная часть соединений этого элемента переносится в виде ионных растворов (Ю.Ю. Бугельский).

Помимо этого, проведены большие работы по изучению минеральных превращений и типоморфизма минералов в коре выветривания ультраосновных пород Урала. И.В. Витовской детально исследованы особенности минерального состава остаточных продуктов выветривания серпентинитов и рассмотрены геохимические условия их формирования.

С использованием комплекса современных методов изучения вещества выявлена неоднородность состава минеральных новообразований всех геохимических зон. Установлено, что главный породообразующий минерал каждой зоны (керолит, сапонит, нонтроит, гетит) содержит тонкодиспергированную примесь коллоидно-аморфной фазы железо-кремнивого состава, частично окристаллизованную в индивидуализированные

минералы. Так, впервые выяснена природа керолита в остаточных продуктах выветривания и рассчитана его структурная формула. Также впервые установлено, что главным пороодообразующим минералом зоны выщелоченных и нонтронитизированных серпентинитов является железосодержащий сапонит весьма изменчивого химического состава и выявлены его типоморфные особенности в разрезе коры выветривания серпентинитов. Даны количественные характеристики минерального состава различных зон.

Установлены природа и типоморфизм минеральных новообразований остаточной коры выветривания серпентинитов в различных геохимических зонах. Дана количественная оценка геохимического поведения компонентов, в том числе и никеля, по зонам. Выяснена никеленосность различных геохимических зон в разных типах коры выветривания.

Проведены исследования структурно-текстурных особенностей продуктов выветривания серпентинитов на макро- и микроуровне и даны количественные характеристики физических свойств пород (объемный вес, пористость, размеры пор), влияющих на характер просачивания поверхностных вод через продукты выветривания различных зон и преобладающий тип массопереноса.

Полученные результаты позволили подойти к обоснованию механизма минеральных превращений при формировании остаточных продуктов выветривания серпентинитов в каждой зоне и связать особенности минералообразования в зонах с режимом циркуляции подземных вод. В частности установлено, что формирование зоны охр и нонтронитов происходит выше, а монтмориллонитизированных и керолитизированных серпентинитов — ниже уровня грунтовых вод.

Значительный интерес представляет работа по изучению геологии, геохимии и гидрогеохимии кор выветривания, в первую очередь никеленосных, проведенная Ю.Ю. Бугельским в Республике Куба. Им установлены закономерности формирования рудоносных кор выветривания в условиях влажного тропического климата. Систематизация большого фактического материала позволила составить развернутую морфогенетическую классификацию и карту кор выветривания Кубы. Главные морфогенетические типы кор детально изучены с применением современных методов исследования. Наибольший интерес среди них представляют коры выветривания ультрабазитов, расположенные в условиях платообразных поднятий и их холмистых предгорий, к которым приурочены все главные никелевые месторождения. В зависимости от состава исходных пород и геоморфологических условий химические элементы обладают различной степенью подвижности, которая отражается на мощности и зональности формирующихся кор выветривания. Наиболее мощные коры выветривания и приуроченные к ним крупные месторождения силикатно-никелевых руд сформированы в гидрогеологических зонах интенсивного и среднеинтенсивного водообмена, а гидрогеохимический фактор играет решающую роль в формировании кор.

Установленные для Кубы закономерности формирования кор выветривания применимы для других регионов тропического пояса, а также для древних кор выветривания Урала.

Интересное обобщение материала по никеленосным корам выветривания выполнено К.К. Никитиным в соавторстве с А.А. Глазковским (1970). Авторы приводят морфогенетическую классификацию кор выветривания, развитых на ультрабазах, и дают определение основных понятий и терминов, используемых при описании профилей выветривания. Особое место уделено методам и приемам, применяемым при изучении и картировании кор выветривания и прогнозе месторождений силикатного никеля, связанных с ними. Описываются методы лабораторного исследования пород, слагающих кору выветривания ультраосновных пород.

#### ГЕОЛОГИЯ И ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ ЛАТЕРИТНЫХ КОР ВЫВЕТРИВАНИЯ БОКСИТОВ

Целью исследований явилась разработка теории бокситообразования и научных основ прогноза бокситовых месторождений.

На всех более или менее значительных месторождениях СССР и некоторых зарубежных объектах проведены исследования, давшие ценный материал для характеристики бокситов СССР, для установления их главных особенностей, выяснения условий образования и закономерностей размещения бокситовых месторождений нашей страны. Эти работы выполнялись большим коллективом сотрудников по тематическому плану ИГЕМ.

Результаты этих работ изложены в нескольких монографиях, посвященных бокситам и корам выветривания различных месторождений.

Выполнено общее геологическое описание латеритной коры выветривания Воронежской антеклизы, включая КМА, выделены возрастные типы кор и освещена история их формирования. Детально описан вещественный состав кор выветривания, развитых на породах различного состава. Выделены минералогические и генетические типы бокситов. Основной тип бокситов представляет собой верхнюю зону латеритной коры выветривания, развитой на кварц-серицит-хлоритовых сланцах и некоторых других породах. Показано, что бокситы после своего формирования подверглись воздействию вторичных гипергенно-метасоматических и инфильтрационных процессов. В работах А.П. Никитиной (1957, 1968) изложены также критерии для поисков бокситов в пределах Воронежской антеклизы.

Подробно описаны латеритные коры выветривания, развитые на терригенных породах, щелочных ультрабазах, кимберлитах, долеритах, а также связанные с этими корами осадочные бокситы. Выделен редкий морфогенетический тип коры выветривания, развитой на склоне Чадобецкой куполовидной структуры. Описаны осадочные бокситы Чадобца и доказана их связь с латеритными корами выветривания. А.Д. Слукиным (1973) даны рекомендации для поисков латеритных бокситов. В последующем автором обнаружены тела остаточных латеритных бокситов, сохранившиеся на Центральном месторождении Чадобецкого поднятия.

На примере бокситов различных типов показана связь их с областями развития площадного элювия на Южном Урале. Установлена приуроченность остаточных бокситопоявлений к линейным корам выветривания (В.М. Новиков). Рассмотрены условия локализации остаточных и осадочных бокситов. Образование месторождений и рудопоявлений бокситов остаточного и полигенного латеритно-осадочного типов, помимо других факторов, определялось локальными условиями: связью с участками развития пород основного состава, а также спецификой палеогеоморфологических и гидрогеологических особенностей района. В.М. Новиков рассмотрел также закономерности размещения бокситовых месторождений и рудопоявлений южной оконечности Урала и дал практические рекомендации на поиски высококачественных латеритных бокситов.

Подробно изучены бокситы Аркалыкского месторождения в Центральном Казахстане. В.В. Жуковым исследованы геологические условия, минералогия, структурно-текстурные и петрографические особенности бокситов. Проведен физико-химический анализ формирования латеритных профилей выветривания. Основой для этого послужили современные представления о механизмах минералообразования в корях выветривания и о взаимодействии с породой просачивающегося через нее раствора. Разработана приближенная количественная теория химической денудации латеритов. Проведен физико-химический (термодинамический) анализ минеральных ассоциаций: гиббсит-корунд, гематит-магнетит, на основе которого разработана схема образования железисто-глиноземных конкреций (бобовин), широко распространенных в мезокайнозойских бокситах СССР.

Изучены также вторичные процессы в бокситах Аркалыка (В.В. Жуков).

Б.А. Богатыревым изучались нижнемезозойские (триас-юрские) бокситы и коры выветривания юго-западных отрогов Гиссарского хребта и бассейна р. Зеравшан. На территории юга Средней Азии выделено два типа профилей выветривания: а) установленный впервые на Кайраке гидрослюдяно-каолинито-диаспоровый (латеритный) — на породах основного и среднего состава и б) гидрослюдяно-каолинитовый (каолинитовый) — на высококремнистых породах.

Выделены генетические типы бокситов и составлена их классификация. Впервые на объектах региона показано сильное влияние на качество бокситов вторичных процессов — шамозитизации, сидеритизации и каолинизации. Среди выделенных типов месторождений относительно перспективными являются: бокситы карстового, аллювиального и озерно-болотного происхождения.

Ж.В. Домбровской изучены особенности и условия формирования палеогеновой коры выветривания в Центральном Прибайкалье. Установлено, что она обладает здесь каолинитовым профилем, однако имеются основания для обнаружения латеритных кор. На гипербазитах установлена кора выветривания сунгулитового профиля. Автором дано представление о полезных ископаемых, связанных с корами, развитыми на породах различных типов. Рассмотрение палеоклиматических и палеогеографических условий, существовавших в течение палеогена, позво-

лило сделать вывод о наличии в регионе условий для образования латеритных кор выветривания и бокситов (Домбровская, 1973).

В процессе работ на Южном и Среднем Тимане подробно изучены бокситы Тимшерско-Пузлинского района (Южный Тиман), где основной разновидностью являются бокситы озерно-болотного типа. Для Среднего Тимана выдвинуто обоснованное положение об отнесении бокситов этого региона в основном к карстовому типу. Намечены закономерности размещения бокситов и предложены критерии для их прогноза (В.Н. Демина).

Изучены бокситы Северо-Онежского месторождения. Доказана связь бокситов с корой выветривания амфиболитов. Подтверждено наличие латеритных кор выветривания, развитых на различных породах восточного склона Балтийского щита и являющихся также возможным источником минерального материала при формировании бокситов. Изучены геологические условия, минералогия и текстурные особенности бокситов, высказаны представления о их генезисе и соображения о возможности постановки поисковых работ (Ф.А. Киреев).

Продолжались экспериментальные исследования, поставленные под руководством Д.Г. Сапожникова для уточнения природных процессов, возникающих при формировании кор выветривания и бокситов.

Результаты этих работ изложены в сборнике "Экспериментальные исследования по разложению минералов органическими кислотами". В нем приводится разнообразный экспериментальный материал по разложению некоторых силикатных минералов под влиянием различных природных органических кислот. Изучено действие низкомолекулярных органических кислот, встречающихся в почвах, а также гумусовых кислот на ряд минералов: нефелин, биотит, мусковит, роговую обманку, клинохлор, лабрадор и каолинит. Разложение минералов изучалось с учетом времени воздействия органических кислот, их концентрации и степени измельчения минералов. Исследования проводились с целью выяснения роли органических почвенных кислот на процессы выветривания в зоне гипергенеза (Д.Г. Сапожников, И.И. Гинзбург, Е.И. Соколова, В.В. Беляцкий, Л.А. Матвеева, Т.С. Нужденовская, З.С. Рождественская). Экспериментально изучены процессы выноса алюминия в зоне гипергенеза. В книге, посвященной этому вопросу (Матвеева, Соколова, Рождественская, 1975), выяснены закономерности разрушения минералов водой и природными органическими кислотами из почв, механизм разрыва алюмокремнекислородных связей, катализирующая роль в этом процессе ионов водорода и комплексующих лигандов (почвенных органических кислот), которые способствуют переводу в раствор Al, Fe и Si. Установлен ряд устойчивости минералов к разрушению: каолинит — мусковит — клинохлор — альбит — биотит — лабрадор — нефелин.

Выявлены закономерности изменения растворимости Al в зависимости от pH и природы органического лиганда и определены пределы pH максимального осаждения Al и Fe. Органо-минеральные соединения Al и Fe могут быть одной из главных форм переноса этих металлов в условиях земной поверхности, участвовать во вторичных процессах, возникающих в бокситах и корах выветривания.

Сотрудники бокситовой группы выполнили крупные работы по обобщению материала, полученного в результате проводимых ими исследований.

Первым таким обобщением явилось написание в соавторстве с геологами Мингео СССР монографии "Платформенные бокситы СССР" (1971), вышедшей под редакцией Д.Г. Сапожникова. В ней дана характеристика бокситовых провинций, находящихся на территории СССР, выделены бокситоносные платформенные формации и дана их характеристика, приводится систематическое описание месторождений, развитых в пределах провинций.

На основании обширного материала, изложенного в монографии, дается обобщенная характеристика бокситовых месторождений, описываются морфологические и другие особенности рудных тел, выделяются минеральные и структурно-текстурные типы руд. Доказывается наличие связи бокситов с корами выветривания, проявляющейся повсеместно на Русской и Сибирской платформах и в других регионах. Приводятся экспериментальные и другие данные, указывающие на ограниченную геохимическую подвижность алюминия в зоне гипергенеза, который, однако, может образовывать растворимые в воде комплексные соединения с органическими кислотами почв. Образование бокситов рассматривается как результат сложного многостадийного процесса, протекающего при оптимальном сочетании многочисленных благоприятных факторов. После образования бокситовая руда зачастую подвергается последующим процессам инфильтрации и ресилификации, снижающим ее качество.

В дальнейшем сотрудниками Отдела был обобщен материал по месторождениям бокситов, приуроченных как к платформенным, так и к геосинклинальным областям, равно как и к регионам развития завершенной складчатости. В монографии "Генетическая классификация и типы бокситовых месторождений СССР" (1973) описаны основные теоретические положения, на которых базируется классификация, приводятся критерии, используемые при выделении групп и типов бокситовых месторождений. Основное содержание книги составляет описание типов на примере наиболее значительных месторождений бокситовых руд. Дается характеристика основных параметров рудных тел, описаны структурно-текстурные особенности, минеральный состав и геохимия бокситов, выявленные в результате использования современных методов исследования вещества. Приведено обобщение данных, относящихся к основным типам бокситовых месторождений. Выявлена и описана специфическая полигенная, характерная для них. Показана необходимость дифференцированного подхода к прогнозу бокситовых месторождений различных типов. Монография представляет собой наиболее полное обобщение материала по бокситовым месторождениям СССР, выполненное с использованием материала новейших исследований. Теоретические выводы, изложенные в ней, получены в результате изучения бокситов с применением современных методов и основываются на глубоких палеогеографических, формационных и других исследованиях. Книга написана коллективом авторов:

Д.Г. Сапожниковым, А.П. Никитиной, А.Д. Слукиным, Б.А. Богатыревым, В.Н. Деминой, Ж.В. Домбровской, В.М. Новиковым, Ф.А. Киреевым, В.В. Жуковым, З.И. Алексеевой, Л.Н. Захаровой и В.И. Мыскиным.

Начиная с 1973 г. этот коллектив сотрудников провел большую работу по выяснению закономерностей размещения бокситовых месторождений. Приняты методы исследования, заключающиеся во всестороннем изучении геологии, вещественного состава, условий локализации и других особенностей наиболее значительных бокситовых месторождений СССР. Новым является применение метода актуализма, основанного на широком сопоставлении ископаемых объектов с постплиоценовыми и современными бокситовыми месторождениями Гавайских и Соломоновых островов в Тихом океане. Кроме того, проводилось сравнительное изучение бокситовых месторождений нашей страны и классических геосинклинальных месторождений Средиземноморского бокситового пояса и латеритных бокситов Гвинейской республики.

Главной частью исследований являлось выяснение палеоклиматических условий, стратиграфической, структурно-тектонической приуроченности латеритных и осадочных бокситов, а также закономерной связи их с элементами палеорельефа, областями развития благоприятных по составу материнских пород, синхронными и более древними карстовыми депрессиями различных типов и т.д.

В результате проведенной работы высказаны представления о закономерной приуроченности бокситовых месторождений платформенных областей к щитам, антеклизам и другим структурам антиклинального характера. При этом латеритные бокситы первоначально покрывают большие площади на сводовых частях этих структур, тогда как осадочные бокситы располагаются ниже — в области погружения щитов и на крыльях антеклиз.

В бокситообразовании в областях завершенной складчатости и в прилегающих к ним частях платформ основную роль играют возвышенности на поверхности палеорельефа, обладающие умеренной высотой. На их вершинах развиваются кора выветривания и остаточные бокситы, а на склонах и близ подножья формируются залежи осадочных бокситов.

Приведенный материал дает основание считать, что исследования, выполненные на втором этапе работы Отдела, внесли крупный вклад в познание кор выветривания вообще, а также никеленосных и латеритных кор в особенности. Эти исследования включают традиционное для Отдела глубокое и всестороннее изучение минералогии, геохимии и гидрогеохимии материнских пород и продуктов их изменения в зоне гипергенеза и в коре выветривания. При этом используются современные методы изучения вещества. Работы проводятся на основании развиваемых в Отделе прогрессивных представлений, о типах кор выветривания, их профилей и зональности последних.

Детальное изучение состава коры выветривания основывается на подробной характеристике природных объектов и дополняется работами по описанию геологии коры выветривания, в частности связи кор с элементами тектонической структуры отдельных регионов, платформенных и других областей.

Осуществляемый таким образом большой размах комплексных исследований, проводимых на теоретической базе, принятой в Отделе, значительно превосходит подобные работы, выполняемые в других организациях СССР и за рубежом. Это позволило детально описать никеленосные коры выветривания и месторождения гипергенного никеля Урала, Западного Казахстана, Кубы и на этой основе осветить главные закономерности формирования кор выветривания тропических областей.

Методика исследований, разработанная в Отделе, позволила его сотрудникам обнаружить латеритные коры выветривания и бокситы на Чадобецком поднятии в Сибири, на Кайракском месторождении в горах Байсунтау в Средней Азии. Она дала возможность доказать латеритный характер кор выветривания и бокситов в районе КМА на Воронежской антеклизе. Повсюду в этих и других районах даны исчерпывающие описания латеритных кор и бокситов, этих весьма важных для практики и интересных в научном отношении образований. Заслуги сотрудников Отдела становятся здесь особенно значительными, если учесть, что многими геологами до самого последнего времени бралась под сомнение сама возможность обнаружения в нашей стране латеритных бокситов.

Весьма существенным оказался вклад сотрудников Отдела — А.П. Никитиной, И.В. Витовской и К.К. Никитина (1971), внесенный ими в разработку общей теории образования коры выветривания. На основании использования обширного материала своих исследований и литературных данных этими авторами выделены три основных типа профилей выветривания: а) полный, который состоит из четырех зон коры выветривания и образуется при постепенном глубоком разложении вещества коренных пород, б) сокращенный, в случае которого выветривание происходит настолько быстро, что отдельные зоны выпадают, и непосредственно на неизменной материнской породе залегают наиболее сильно разложенные образования, например латериты, в) неполный, образующийся при малоблагоприятных условиях выветривания, причем разложение материнских пород не доходит до конца и в профиле коры не образуется зона наиболее интенсивно измененных пород.

Наличие различных типов профилей выветривания существенно дополняет учение о коре выветривания, разработанное И.И. Гинзбургом и его сотрудниками. Оно позволяет конкретизировать условия образования различных кор выветривания, осуществить типизацию кор и широко использовать геологами при их описании.

В тесной связи с исследованиями кор выветривания находятся работы по бокситовой тематике, поскольку бокситы весьма часто обнаруживают приуроченность к корам, слагая определенную зону в составе их или формируясь за счет переотложения и накопления продуктов разрушения кор выветривания. Приведенный выше обзор работ сотрудников Отдела свидетельствует о широком охвате исследованиями бокситовых месторождений СССР. На основе этих и других результатов работ, изложенных в многочисленных статьях, выполнено широкое обобщение по бокситовой тематике, которое сводится к выяснению научных основ, определяющих закономерности размещения бокситов СССР.

Проведенные всесторонние исследования показали, что локализация месторождений определяется совокупностью условий образования бокситов, условий, приобретающих характер основных рудоконтролирующих факторов. К числу их относятся следующие виды контроля: климатический, структурно-тектонический, палеогеоморфологический, фациальный, стратиграфический. Чрезвычайно большое значение имеют также: характер материнских пород, за счет которых происходит рудный материал, слагающий бокситы, а также связь с корой выветривания, породы которой зачастую поставляют этот материал; связь бокситов с другими экзогенными полезными ископаемыми и т.д.

Перечисленные и другие рудоконтролирующие факторы выявлены отчасти в результате учета литературных данных, а в основном в итоге обобщения огромного материала, собранного сотрудниками Отдела на территории СССР, а также во время посещения зарубежных объектов в Гвинее, Индии, Франции, Югославии и Венгрии. Большой материал был получен при изучении особенностей локализации бокситовых месторождений в пределах Средиземноморской геосинклинальной зоны, взятой в целом.

Установлено, что закономерности размещения бокситов определяются оптимальным сочетанием значительного числа рудоконтролирующих факторов. Для бокситовых месторождений главные факторы, так же как оптимальный климат и др., являются общими. Остальные — имеют частное значение.

Так, для карстовых бокситовых месторождений геосинклинальных областей (месторождений приморского типа) основными рудоконтролирующими факторами являются связи с мощными толщами пород карбонатной формации по соседству с областями развития синхронных эффузивных образований. Для латеритных бокситов стадийного формирования основным рудоконтролирующим фактором является наличие коры выветривания латеритного типа, развитой на породах основного (габбро, долериты и пр.) или щелочного (нефелиновые сиениты, трахиты) составов. Разумеется, что одних этих рудоконтролирующих факторов недостаточно для выявления закономерностей размещения бокситовых месторождений. Эти закономерности устанавливаются последовательным привлечением в сферу исследования других рудоконтролирующих факторов, что позволяет наметить все более и более конкретные закономерности.

На основе сделанных обобщений теоретического характера, касающихся генезиса месторождений различных типов и выявленных закономерностей, выдвинут ряд практических предложений, которые уже используются при планировании геологоразведочных работ на бокситы.

#### ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ МАРГАНЦЕВОГО РУДООБРАЗОВАНИЯ

На начальном этапе основными объектами исследования являлись марганцевые месторождения Атасуйского рудного района в Центральном Казахстане. Кроме того, в целях сравнения были привлечены месторож-

дения Магнитогорского синклиория на Урале, а также накопления современных рудных конкреций в озерах Карельского перешейка.

В монографии "Караджалское железо-марганцевое месторождение в Центральном Казахстане" (Сапожников, 1963) описаны основные условия залегания руд на этом объекте, подробно освещена литология вмещающих образований, намечена связь оруденения с элементами тектонической структуры района. Подтверждены представления о вулканогенно-осадочном происхождении руд, которые, по мнению автора, были сформированы на завершающем этапе герцинского вулканизма в регионе.

Детально описаны железо-марганцевые руды месторождения Караджал (Калинин, 1965). Изучены структурно-текстурные особенности и минералогия руд железа и марганца, развитых на этом месторождении, выявлена зональность рудных накоплений, выражающаяся в последовательной смене минерального состава по мере удаления от мест поступления рудных растворов. Ближе всего к ним располагаются яшмы, далее окисные железные руды, окисные железо-марганцевые руды, окисные марганцевые руды и, наконец, карбонатные руды марганца.

В дальнейшем систематическое изучение марганцевых месторождений основных генетических типов проводилось также и в других районах Урало-Тяньшаньской геосинклинальной области. К ним относятся: осадочное месторождение Тахта-Карача, вулканогенно-осадочные девонские марганцевые месторождения Южного Урала и Шоинтас (Центральный Казахстан), гидротермальные — Сапальское (Урал), Джездинское (Центральный Казахстан) месторождения. Для каждого из этих объектов дана краткая характеристика геологического строения, описаны условия залегания и закономерности размещения рудных тел. В.В. Калининым выделены типы руд и детально описаны их текстурные и структурные особенности. Значительное место отведено подробной характеристике минерального состава руд.

Особенностью первичных руд осадочного генезиса является их монофациальный состав, в результате чего они представлены только одной фацией — карбонатных рудных образований. Руды вулканогенно-осадочных месторождений Южного Урала относятся к двум фациям — окисной и карбонатной первичных образований, которые позднее подверглись процессам метаморфизма и гипергенеза. Руды гидротермальных месторождений существенно отличаются от отмеченных выше типов и имеют значительные различия между собой. На этих месторождениях выделено несколько парагенетических ассоциаций и последовательных этапов минералообразования.

В результате проведенных исследований высказаны соображения об источнике марганца, железа и кремния и о физико-химических условиях накопления рудных веществ и последующих преобразований, происходящих на разных этапах формирования руд. Установлены основные признаки, позволяющие отнести описываемые месторождения к определенному генетическому типу.

Д.Г. Сапожников рассмотрел условия локализации и закономерности размещения месторождений марганца Урало-Сибирской эпигерцинской платформы, им описаны основные особенности локализации марганце-

вых месторождений в пределах этого крупного региона. Рассмотрены вопросы связи месторождений с элементами тектонической структуры и приуроченности их к различным фациям осадочных образований. Автору удалось наметить определенную эволюцию марганцево-рудного процесса на фоне общего развития земной коры: превращения геосинклинали в ороген и затем в складчатую область. На первом геосинклинальном этапе месторождения марганца имеют главным образом вулканогенно-осадочное происхождение. Тогда как на последнем в пределах сформированных складчатых областей образуются месторождения осадочного и реже инфильтрационного происхождения.

Д.Г. Сапожниковым предложена новая оригинальная гипотеза образования осадочных марганцевых месторождений палеогенового возраста юга СССР и Болгарии за счет отложения марганца из богатых сероводородом вод олигоценового морского бассейна. Основанием для такого предположения послужил недавно обнаруженный факт высокого содержания марганца в воде сероводородной зоны современного Черного моря.

П.Ф. Андрущенко и А.Т. Суслов произвели детальное описание Сваранцского и Карамарошанского месторождений и нескольких проявлений марганцевых руд из района развития юрских, меловых и палеогеновых образований Малого Кавказа. Авторы выделяют основные типы месторождений и дают для каждого из них описание геологии и характеристику рудных тел. Приводятся подробный минеральный состав, структурно-текстурные особенности и геохимия марганцевых руд этих объектов и доказывается гидротермальное происхождение их.

В целом работами Отдела охвачены марганцевые месторождения и проявления Закавказья (исключая Чиатурское), Урала, Казахской складчатой страны и Средней Азии. Проведено глубокое изучение структурно-текстурных особенностей и минералогии марганцевых руд, выделены генетические типы месторождений и рассмотрена эволюция процессов марганцевого рудообразования в истории геологического развития регионов.

Такого рода всестороннее исследование марганцевых месторождений восточных районов страны имеет чрезвычайно большое научное и практическое значение и безусловно будет способствовать оценке перспектив их марганценосности.

В Отделе в течение ряда лет изучались железо-марганцевые конкреции со дна Тихого и Индийского океанов из собственных сборов, выполненных во время океанических экспедиционных работ (П.Ф. Андрущенко). Выполнена детальная работа по изучению минерального состава конкреций, причем использованы новейшие методы исследования вещества. Подробно изучены структурные и текстурные особенности конкреций. Образование конкреций, по мнению П.Ф. Андрущенко, происходило в результате взаимодействия различных факторов.

Помимо изучения условий марганцевого рудообразования Отдел продолжал разрабатывать методику прогноза осадочных рудных месторождений. В опубликованной монографии (Сапожников, 1972) описаны принципы прогноза не только седиментационных, но и диагенетических и эпигенетических месторождений, а также остаточных рудных

накоплений в корах выветривания. Рассмотрены главнейшие геологические факторы, которые в совокупности создавали обстановку, благоприятную для рудонакопления и контролируют размещение месторождений. Излагаются элементы методики и критерии, используемые при прогнозе территорий, перспективных для поисков бокситов, марганцевых руд, медистых песчаников и некоторых других месторождений. В частности, показано, что локализация экзогенных месторождений никеля, марганца и бокситов зависит в основном от первичных условий образования, влияние которых начинает сказываться еще в процессе формирования рудных залежей. Они определяют связь месторождений с палеоклиматическими зонами, элементами дорудных тектонических структур, с дорудным рельефом и т.д. Наряду с этим существенное влияние на особенности размещения месторождений оказывают вторичные факторы, играющие роль после формирования месторождения. Они имеют общее и примерно одинаковое значение для объектов всех трех групп. К этим факторам относятся пострудные тектонические движения и структуры, особенности палеорельефа, процессы размыва и переотложения рудных компонентов и т.д. Благоприятное сочетание всех этих как первичных, так и вторичных факторов обуславливает, согласно представлениям автора, возможность возникновения и условия сохранности руд. Оно же определяет и закономерности размещения рудных месторождений различных типов.

Работы, выполненные Отделом, можно оценить как существенный вклад в разработку теории формирования кор выветривания и связанных с ними экзогенных месторождений. Уточнены условия образования никеленосных и латеритных кор выветривания, выявлены основные рудоконтролирующие факторы и закономерности размещения бокситовых месторождений. Усовершенствованы общие положения теории образования кор выветривания.

Проведенные исследования позволили выделить перспективные направления дальнейших работ Отдела. К ним прежде всего относятся: всестороннее изучение процессов образования рудоносных кор выветривания, их геологии, минералогии и геохимии; выяснение условий формирования и критериев сохранности месторождений бокситов; сравнительное изучение марганцевых месторождений различных типов и выяснение эволюции марганцеворудного процесса в геологической истории Земли.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Андрущенко П.Ф.* Состав и строение метаморфизованных железо-марганцевых конкреций, жильных новообразований гидроокислов марганца и вмещающих их пеллагических осадков в южной котловине Тихого океана. — Изв. АН СССР, серия геол., 1975, № 1.
- Андрущенко П.Ф., Скорнякова Н.С.* Состав, строение и особенности образования железо-марганцевых конкреций Тихого океана. — В кн. "Марганцевые месторождения СССР". М., 1967.
- Андрущенко П.Ф., Халилова Т.А.* Минеральный состав и руды Эльворского железо-марганцевого месторождения. — Изв. АН Азерб ССР, 1957, № 3.
- Безруков П.Л., Андрущенко П.Ф.* Железо-марганцевые конкреции Индийского океана. — Изв. АН СССР, серия геол., 1972, № 7.

- Бугельский Ю.Ю.* Гипергенная миграция рудных компонентов в различных климатических районах. — В кн. "Кора выветривания". Вып. 4, "Наука", 1962.
- Бугельский Ю.Ю.* О возможности поисков скрытых рудных тел гидрогеохимическим методом в районах с различными климатическими условиями. — В кн. "Вопросы изучения и методы поисков скрытого оруденения". "Наука", 1963.
- Витовская И.В.* Распределение микроэлементов в метаморфических породах и минералах Акчагыла и Кызыл-Эспе (Ц. Казахстан). М., Изд-во АН СССР, 1960, вып. 49.
- Витовская И.В.* Минеральный состав и поведение микроэлементов в зоне гипергенеза Акчагыла и Кызыл-Эспе. М., Изд-во АН СССР, 1962, вып. 75.
- Генетическая классификация и типы бокситовых месторождений СССР. "Наука", 1973.
- Гинзбург И.И.* Опыт разработки теоретических основ геохимических методов поисков руд цветных и редких металлов. Госгеолтехиздат, 1957.
- Гинзбург И.И.* Типы древних кор выветривания, формы их проявления и классификация. — В сб. "Кора выветривания". Вып. 6, Изд-во АН СССР, 1963.
- Гинзбург И.И., Муканов К.М.* Основные принципы составления геохимических карт рудных районов при металлогенических исследованиях. — В кн. "Металлогенические и прогнозные карты". Алма-Ата, 1959.
- Гинзбург И.И., Яшина Р.С.* Экспериментальные исследования в области выветривания. — Труды ИГЕМ, Изд-во АН СССР, 1962, вып. 74.
- Гинзбург И.И., Яшина Р.С., Матвеева Л.А.* Разложение непрозрачных минералов органическими кислотами. — В сб. "Химия земной коры". Изд-во АН СССР, 1963, т. 1.
- Домбровская Ж.В.* Палеогеновая кора выветривания Центрального Прибайкалья. "Наука", 1973.
- Калганов М.И.* Атлас текстур и структур железистых кварцитов и богатых железных руд Курской магнитной аномалии и некоторых других месторождений. Изд-во АН СССР, 1955.
- Калганов М.И.* О генетических типах железных руд бассейна Курской магнитной аномалии. — В кн. "Работы горногеологической станции на Курской магнитной аномалии". М., 1960.
- Калинин В.В.* Железо-марганцевые руды месторождения Караджал. "Наука", 1965.
- Калюжный В.А.* Метаморфические древние толщи и металлогенические черты Тимана. — Изв. АН СССР, серия геол., 1959, № 6.
- Калюжный В.А.* О происхождении нефти в Тимано-Печерской нефтегазоносной провинции. — В кн. "Происхождение нефти и газа". М., 1960<sub>1</sub>.
- Калюжный В.А.* Погребенная кора выветривания диабазов и туффигов в эффузивно-осадочном горизонте  $D_3^2$  на Южном Тимане и ее значение в накоплении железных и бокситовых руд. — В кн. "Кора выветривания". Вып. 3, М., 1960<sub>2</sub>.
- Калюжный В.А.* Докембрийские ильменитоносные петрографические провинции парапород и значение их в формировании крупных россыпей титана. — Геол. рудн. месторожд., 1972, № 4.
- Кротов Б.П.* Закономерности размещения гипергенных месторождений железа и алюминия в пределах Уральской геосинклинальной области. — Геол. рудн. месторожд., 1959, № 4.
- Кротов Б.П.* Закономерности образования и размещения гипергенных месторождений железа и алюминия. — В кн. "Авторефераты работ сотрудников ИГЕМ за 1958–1959 гг.", М., 1960.
- Кротов Б.П.* Об условиях образования и размещения девонских бокситов зеленокаменной полосы Урала. — Геол. рудн. месторожд., 1962, № 3.
- Кротов Б.П., Алешин М.И.* Классификация гипергенных месторождений железа и алюминия Урала. — Геол. рудн. месторожд., 1963, № 4.
- Матвеева Л.А., Соколова Е.И., Рождественская З.С.* Экспериментальное изучение выноса алюминия в зоне гипергенеза. "Наука", 1975.
- Муканов К.М., Ромашин С.С.* Первичные геохимические ореолы на Акбастау-Кусмурунском рудном поле. — Геол. рудн. месторожд., 1964, № 5.

- Никитина А.П.* Каолинизация и бемитизация в коре выветривания хлоритовых сланцев Яковлевского месторождения КМА. — В кн. "Исследование и использование глин". Львов, 1957.
- Никитина А.П.* Древняя кора выветривания кристаллического фундамента Воронежской антеклизы и ее бокситоносность. "Наука", 1968.
- Никитина А.П., Витовская И.В., Никитин К.К.* Минерало-геохимические закономерности формирования профилей и полезных ископаемых кор выветривания и некоторые вопросы методики их изучения. "Наука", 1971.
- Никитин К.К.* Древняя кора выветривания Бурыктальского массива ультраосновных пород. Изд-во АН СССР, 1962, вып. 69.
- Никитин К.К., Глазковский А.А.* Никеленосные коры выветривания ультрабазитов и методы их изучения. "Недра", 1970.
- Платформенные бокситы СССР. "Наука", 1971.
- Руковишникова И.А.* О некоторых магнезиально-никелевых водных силикатах Нижне-Тагильского серпентинитового массива. — В кн. "Кора выветривания". Вып. 2, Изд-во АН СССР, 1956.
- Руковишникова И.А.* Некоторые данные по выветриванию серпентинов. — В кн. "Материалы по геологии минералов и использованию глин в СССР". М., 1958.
- Руковишникова И.А., Яковлевская Т.А., Покровская А.И.* Коронадит и криптомелан из Майского полиметаллического месторождения в Центральном Казахстане. — В кн. "Кора выветривания". Вып. 3, Изд-во АН СССР, 1960.
- Сапожников Д.Г.* К теории прогноза осадочных рудных месторождений. Изд-во АН СССР, 1961.
- Сапожников Д.Г.* Караджальское железо-марганцевое месторождение. — Труды ИГЕМ, Изд-во АН СССР, 1963, вып. 89.
- Сапожников Д.Г.* Основы прогноза осадочных рудных месторождений. "Недра", 1972.
- Сапожников Д.Г., Виселкина М.А.* Современные осадки оз. Иссык-Куль и его заливов. Труды ИГЕМ, Изд-во АН СССР, 1960, вып. 36.
- Сеннова В.Ф., Калужный В.А.* Новые данные о возрасте зеленцовской и нюмыгской толщ С<sub>1</sub> и перспективы поисков бокситов и других месторождений в Тимано-Печорской области. — Докл. АН СССР, 1967, № 2.
- Суслов А.Т., Андрущенко П.Ф.* Новые данные о минеральном составе и строении руд марганцевых месторождений Присяянского марганцеворудного района. — В кн. "Марганцевые месторождения СССР". М., 1967.
- Слукин А.Д.* Коры выветривания и бокситы Чадобецкого поднятия. "Наука", 1973.
- Яницкий А.Л., Сергеев О.П.* Байкальские железорудные месторождения и их генезис. — Труды ИГЕМ АН СССР. Изд-во АН СССР, 1962, вып. 73.
- Яницкий А.Л.* Олигоценовые оолитовые железные руды Северного Тургая и их генезис. — Труды ИГЕМ АН СССР. Изд-во АН СССР, 1960, вып. 37.
- Экспериментальные исследования по разложению минералов органическими кислотами. "Наука", 1968.

# ГЕОЛОГИЯ И УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

## ВВЕДЕНИЕ

Изучение состава, свойств, генезиса и закономерностей размещения важнейших неметаллических полезных ископаемых с целью совершенствования научных основ их прогноза и поисков является основной задачей отдела неметаллических полезных ископаемых ИГЕМ АН СССР.

Основное внимание уделяется изучению наиболее важных и дефицитных видов неметаллических полезных ископаемых всех перспективных районов нашей страны.

Отдел неметаллических ископаемых выполняет большую научно-организационную работу в производственных и исследовательских организациях по планированию поисков, освоения и изучения неметаллических полезных ископаемых. Сотрудники отдела входят в состав научно-технических, экспертно-технических и научных советов ряда промышленных министерств и научно-исследовательских организаций. Значительное место в деятельности Отдела занимают организация и проведение специальных Всесоюзных региональных совещаний. Совещания, подготавливаемые совместно с промышленными министерствами, посвящаются наиболее актуальным проблемам неметаллического сырья.

Важным разделом работы Отдела являются исследования, связанные с выявлением и освоением новых видов полезных ископаемых. При участии сотрудников Отдела введены в практическое использование месторождения таких ископаемых, как перлит, фарфоровый камень, брусит.

Инициативная деятельность Отдела по изучению новых видов неметаллического сырья одобрена Президиумом АН СССР, отметившим в своем постановлении от 9 сентября 1971 г., что исследования в области неметаллических полезных ископаемых и, в частности, новых их видов являются одним из важнейших направлений современной геологии. Президиум АН СССР признал необходимым усиление работ по изучению нового применения и новых видов неметаллического сырья как в научных учреждениях Академии наук СССР, так и в Академиях наук союзных республик. Это постановление, принятое на основе работ Отдела неметаллических полезных ископаемых ИГЕМ, предопределило и направление дальнейших исследований.

По характеру деятельности (научной, научно-производственной и научно-организационной), широте проблем Отдел занимает ведущее

положение в изучении неметаллических полезных ископаемых нашей страны.

Актуальность исследований в области неметаллического сырья определяется исключительно высокой экономической значимостью неметаллических полезных ископаемых, стоимость которых в ежегодной добыче из недр высокоразвитых стран сейчас примерно вдвое превышает стоимость добываемых металлических руд на той же территории. Например, в США в 1971 г. добыто неметаллических полезных ископаемых на сумму 6068 млн. долларов, а руд различных металлов — на 3406 млн. долларов.

Большая народнохозяйственная ценность неметаллических ископаемых в целом и отдельных их видов обуславливает высокую практическую значимость исследовательских работ в этой области, поскольку внедрение их дает быстрый и большой народнохозяйственный эффект.

При резкой разнородности обширнейшей группы неметаллического сырья эффективный вклад коллектива Отдела в развитие учения о неметаллических полезных ископаемых был возможен при сосредоточении усилий преимущественно на нескольких направлениях. Такими главнейшими общими аспектами исследований стали две группы геологических процессов, с которыми связано образование наибольшего числа и наиболее важных неметаллических полезных ископаемых, а именно — эндогенный петро- и минералогенез и процессы формирования древних кор выветривания и перетложения продуктов их размыва.

Вопросы образования эндогенных неметаллических полезных ископаемых неизбежно переплетаются и вписываются в общие петрологические проблемы магматизма и метаморфизма. При разработке общих петрогенетических вопросов наряду с изучением природных объектов в Отделе широко осуществлялись экспериментальные исследования. В значительной мере экспериментальные работы проведены в содружестве со специалистами Института физики Земли с использованием новейшей аппаратуры, позволяющей моделировать условия всего интервала метаморфизма и магматизма вплоть до  $P$ - $T$  условий верхней мантии. Результаты петрологических экспериментов отражены более чем в двух десятках статей. В наиболее общем виде эти оригинальные исследования с обобщением всей суммы экспериментальных и петрологических данных нашла выражение в работе "Магма и генезис магматических пород" (Петров, 1972). В этой книге главные типы родоначальных магм интерпретируются как закономерные эвтектоидные формы жидкой фазы определенных горизонтов литосферы. Работа посвящена вопросам генезиса магматогенных, контактно-метаморфических и гидротермальных полезных ископаемых, особенно применительно к познанию природы и роли рудообразующих растворов, места и времени их отделения.

Теоретической основой исследований экзогенных полезных ископаемых является учение о древней коре выветривания, общие аспекты которого с учетом существующих взглядов изложены в монографии

В.П. Петрова (1967). Основой представлений о древней коре выветривания, развиваемых коллективом, служит оригинальная геологическая концепция о крупнейших пространственно-временных эпохах длительного тектонического покоя, пенепленизации и мощного выветривания. Это положение — плодотворная основа прогнозирования поисков неметаллических полезных ископаемых, связанных с древней корой выветривания.

#### НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ, СВЯЗАННЫЕ С ЭНДОГЕННЫМИ ПРОЦЕССАМИ

##### *Вулканические стекла*

Теоретической основой исследований вулканических стекол являются эксперименты по условиям отвердевания лавы, гидратации вулканического стекла и процессов его раскристаллизации. К этой группе относятся перлит, пемза, шлак.

Перлит. Наш Институт является инициатором организации перлитовой промышленности вообще. Напомним, что история перлитовой промышленности началась с исследований, проведенных в предшественнике ИГЕМ — Петрографическом институте.

Инициатором организации перлитовой промышленности в СССР также был ИГЕМ. В 1955 г. сотрудником отдела неметаллов В.П. Петровым была подана в Госплан записка о необходимости использования перлита в народном хозяйстве. Эта записка послужила началом работ как по использованию перлита, так и по поискам его месторождений. Последняя задача, оказавшаяся весьма трудной, в значительной мере выполнялась отделом неметаллов ИГЕМ. ИГЕМ и сейчас является ведущей организацией по вопросам изучения геологии, петрографии и оценке месторождений вулканических стекол. В процессе исследований выяснились исключительно плохая петрографическая изученность продуктов кислого эффузивного магматизма и отсутствие сведений о локализации вулканического стекла. Работы сотрудников Отдела В.П. Петрова и В.В. Наседкина были начаты с широкого изучения проявлений кислого вулканизма в Закарпатье, Закавказье, а затем продолжены в Восточной Сибири, на Камчатке, а также в Болгарии и Венгрии. Были выявлены особенности строения отдельных вулканических аппаратов и место продуктивного вулканического стекла в структуре таких образований, как стратовулканы, экструзивные купола и т.д. Показана приуроченность вулканических стекол к определенным участкам вулканических тел. Большие трудности были при изучении вещественного состава стекол и природы воды, входящей в его состав. Для этого пришлось применить детальное электронно-микроскопическое исследование, а также обширный эксперимент при высоких и сверхвысоких давлениях.

Для выявления физико-химических условий образования кислых магм и проявления вулканизма проведены экспериментальные исследования системы гранит-вода в диапазоне от 1 до 30 кбар и темпера-

тур от 500 до 1200°. Для исследования взяты системы с различным содержанием воды. Работы проводились совместно с Институтом физики Земли АН СССР.

Всем комплексом проведенных работ установлено, что наиболее крупные месторождения водосодержащих вулканических стекол связаны с вулканическими процессами посторогенного этапа развития отдельных участков земной коры. Зарождение кислых магм может быть связано с анатексисом и дифференциацией базальтовой и щелочно-базальтовой магм. Для последнего случая выделяется две ветви: базальт—дацит—липарит и щелочной базальт—трахит—панталлерит.

Месторождения вулканического стекла могут быть связаны с эффузивным, экструзивным и эксплозивным процессами. Наиболее крупные месторождения относятся к эффузивному типу. Стекла образуются из переохлажденных расплавов. Структура стекла определяется режимом охлаждения.

Проникновение воды в стекла может происходить в широком диапазоне температур и давлений: от атмосферных до 600—700° и 10—1000 атм.

На основе проведенных исследований была выявлена связь промышленных свойств водосодержащих стекол с условиями их образования. Эти работы проводились совместно с технологическими и строительно-технологическими институтами (ВНИИСтром в Москве, НИИСМ в Киеве).

Полученные результаты немедленно сообщались заинтересованным организациям и публиковались в широкой печати.

Работы велись в тесном сотрудничестве с различными учреждениями, изучающими использование перлита.

Пемза, шлак. В последние годы Отдел неметаллов Института усиленно пропагандирует использование природных пемз и шлаков, которые для ряда районов являются весьма интересными и перспективными и сейчас незаслуженно забыты.

Генезис природных шлаков и пемзы во многом неясен, неясны и условия их локализации. Наряду с геолого-минералогическими исследованиями этих своеобразных пород в Отделе выполняются экспериментальные работы по генезису пористых основных стекол. Проблема пемзы и шлаков оказалась теснейшим образом связанной с одной из важнейших проблем современной вулканологии — проблемой игнибригов, а также с вопросами механизма излияния основных лав и проблемой их дегазации. Изучаются шлаковые конуса и механизм пеплообразования.

### *Магнезиальные силикаты*

**Асбестовые минералы.** Главные работы относились к хризотил-асбестовым месторождениям. В них была показана приуроченность хризотил-асбестовых месторождений к гранит-серпентинитовым контактам и образованию хризотиловых жил в регрессивную стадию контактного процесса. В этих условиях происходит только перекристаллизация серпентинового вещества без какого-либо его привноса, но с большой

ролью геометрического отбора. В процессе исследования выявилась важная роль ранней тектонической трещиноватости материнских ультрабазитовых массивов, которая во многом контролирует распределение асбестовых скоплений различных типов, существенное значение имели также трещины, возникавшие в регрессивную стадию процесса серпентинизации и асбестообразования.

Другим важным результатом исследования является установление связи свойств асбеста, в первую очередь его железистости, с исходной железистостью материнских пород. Это дало возможность прогнозировать пути поисков маложелезистых асбестов, дефицитных в нашей стране.

Результаты теоретических работ и сделанные на их основе выводы успешно апробированы в процессе разведки одного из крупнейших месторождений хризотил-асбеста в Саянах, выявленного при участии сотрудника Отдела В.П. Еремеева.

Проведены большие работы по изучению амфибол-асбестовой минерализации. Для территории СССР установлено два основных промышленных типа асбеста: антофиллит-асбест и щелочно-амфиболовый асбест. Показано, что антофиллит-асбест связан с глубинным воздействием гранитных пегматитов или гранитов на ультрабазиты с образованием отчетливой метасоматической зональности. Форма антофиллит-асбестовых тел и их масштабы сильно зависят от глубинности контактного процесса. В условиях умеренной глубинности образуются маломощные асбестовые зоны, а при оптимальной глубинности ультрабазит местами может почти нацело заместиться асбестом.

Для второго типа (щелочно-амфиболовые асбесты) показана связь амфибол-асбестовой минерализации с диагенезом или начальным метаморфизмом первичных осадочных толщ с резко повышенным содержанием щелочей и, может быть, солей.

Большое внимание в процессе изучения асбестовых месторождений уделялось выявлению условий образования асбестовых волокон. С помощью рентгенографических и электронно-микроскопических исследований было показано, что амфиболовые асбесты принадлежат к так называемым "асбестам вращения".

Выявленные поисковые признаки использовались в разведке асбестовых месторождений и во многом содействовали открытию новых месторождений (Ю.К. Андреев).

**Тальк.** Исследованиями отдела охвачены все тальконосные провинции и важнейшие месторождения талька в СССР, связанные с гипербазитами и магнезиально-карбонатными толщами. Разработанная в отделе концепция генезиса тальковых руд в результате контактово-реакционного метасоматоза при региональном метаморфизме в интервале условий от амфиболитовой фации до ступени аспидных сланцев наряду с другими оригинальными положениями была положена в основу составленной в отделе прогнозной карты тальконосности СССР (П.П. Смолин). В пределах выделенных на этой карте перспективных регионов открыты Алгуйское месторождение талька, а также Предбайкальская тальконосная провинция.

Отделом неметаллов изучены и предложены к использованию месторождения маложелезистого талька: Киргитейское в Красноярском крае (П.П. Смолин) и одно месторождение в районе Каратау Казахстана (А.П. Гапеев).

В последний период, в связи с достигнутым при участии отдела улучшением состояния сырьевой базы, проводилось преимущественно изучение минералогических особенностей талька. Совместно со специалистами лаборатории электронографии ИГЕМ расшифрованы отдельные детали кристаллической структуры минерала (от 1Т до полубеспорядочных псевдомоноклинных разностей), доказана предположенная ранее смешанослойная природа талька, установлены соотношения этих структурных особенностей с составом и свойствами.

Полученные в отделе материалы по минералогии талька разных месторождений Союза лежат в основе разрабатывающихся сейчас методов обогащения и применения тальковых продуктов.

**Брусит** — кристаллическая гидроокись магния — наиболее высокомагнезиальное полезное ископаемое, впервые в СССР изученное и рекомендованное к промышленному использованию отделом в 1956 г.

В противовес выдвигающимся представлениям о формировании месторождений брусита в результате мегнезиального метасоматоза доказано, что брусит возникал за счет древних магнезитов при наложенном изохимическом термическом метаморфизме в условиях малой глубинности (монтичеллит-мелилитовая фация) в контактных ореолах (преимущественно в подвесках кровли) посторогенных субвулканических и гипабиссальных небольших тел гранитоидов. Впервые показано первоначальное образование на прогрессивном этапе метаморфизма магнезитов уникальных крупных тел мономинеральных периклазов и проявление стадии магнезиогидрогеля при гидратации периклаза и переходе его в брусит при пониженной температуре. Установлена закономерная приуроченность особо чистых бруситов (первичных магнезитов) к верхним частям крупных унаследованных ритмов магнезиально-карбонатной толщи.

Использование при поисковых работах выявленных факторов локализации брусита привело к открытию новых его месторождений на Хингане.

Это наряду с реализацией некоторых прикладных рекомендаций Отдела позволило сотрудникам отдела неметаллов ИГЕМ (П.П. Смолину) поставить вопрос о сооружении специализированного комбината по выпуску особо чистых и дефицитных магнезиальных продуктов на Дальнем Востоке.

**Флогопит.** С докембрийскими гранито-гнейсовыми комплексами, формировавшимися на больших глубинах, связаны месторождения флогопита — важнейшего электротехнического неметаллического сырья. Исследованиями отдела охвачены все флогопитоносные провинции СССР (Южная Якутия, Южное Прибайкалье, Юго-Западный Памир) и важнейшие месторождения КНДР (М.А. Лицарев). В противоположность выдвигающимся точкам зрения о генезисе флогопитовых месторождений (связь с фронтом базификации; отнесение диопсидовых и

шпинелево-диопсидовых пород, вмещающих промышленный флогопит, к осадочно-метаморфическим образованиям), в отделе обосновано представление о контактово-реакционном их формировании (биметасоматическом и контактово-инфильтрационном). Месторождения относятся к формации магнезиальных скарнов, локализующихся или в непосредственных контактах алюмосиликатных пород с доломитами, или вблизи подобных контактов среди алюмосиликатных и магнезиально-карбонатных пород. Показано, что флогопитоносные магнезиальные скарны развиваются как по алюмосиликатным, так и по магнезиально-карбонатным породам и являются образованиями магматической и послемагматической стадий процесса. Вместе с тем флогопит рассматривается как послемагматическое образование регрессивной стадии процесса в условиях воздействия щелочных (существенно калиевых) растворов на преобразуемые породы. Детально изучено строение и минеральный состав флогопитоносных скарнов, выявлены различные типы метасоматической зональности и показано закономерное положение флогопита в разрезе метасоматических зон. Большое внимание уделено выявлению условий образования и локализации особо ценного маложелезистого флогопита. Установлено, что содержание железа во флогопите зависит не столько от его количества в непосредственно скарнируемой породе, сколько от концентрации железа в воздействующих растворах, а следовательно, от содержания этого компонента во всех породах месторождения, участвовавших в контактово-реакционном взаимодействии. Показано, что основные предпосылки нахождения маложелезистого флогопита определяются широким распространением на месторождениях лейкократовых разностей алюмосиликатных пород, причем наиболее благоприятными участками локализации маложелезистого флогопита являются флогопитоносные залежи, образовавшиеся в непосредственных контактах лейкократовых алюмосиликатных пород с доломитами.

Важная работа проведена сотрудниками отдела по изучению и сопоставлению состава и свойств промышленных флогопитов всех флогопитоносных провинций и крупнейших месторождений СССР (М.А. Лицарев, Е.Д. Белянкина). Выявлено, что химический состав флогопитов и их свойства (в том числе и технические) зависят от условий образования месторождений. Так, для флогопитов алданских, слюдянских и памирских месторождений, связанных с докембрийскими гранито-гнейсовыми комплексами и формировавшихся в условиях больших глубин (алданская фация), характерны сравнительно пониженные содержания железа, титана, марганца, воды и повышенные — магния, фтора; они имеют наиболее низкие удельные веса, высокую прозрачность, наибольшую твердость и повышенные диэлектрические свойства. Флогопиты Ковдорского и Гулинского месторождений, связанных с многофазными ультраосновными — щелочными интрузиями центрального типа и формировавшихся в условиях меньших глубин (монтчеллитовая фация), содержат в отличие от предыдущих больше железа, титана, марганца, воды и меньше — магния и особенно фтора; они имеют сравнительно пониженные диэлектрические свойства.

Интересные и важные результаты получены в итоге совместных работ с лабораторией абсолютного возраста ИГЕМ по разрешению проблемы возраста геологических образований Юго-Западного Памира (М.А. Лицарев). Установлен ниже-среднепротерозойский возраст (1800–1900 млн. лет) флогопитовых месторождений этого региона, являвшийся до последнего времени дискуссионным; выявлены причины расхождения данных K–Ar и Rb–Sr методов определения возраста флогопита (различная потеря радиогенных изотопов аргона и стронция кристаллами флогопита при прогреве). Показано, что региональное "омоложение" радиологического возраста докембрийских геологических образований Юго-Западного Памира до неогеновых значений (10–20 млн. лет) связано с процессами становления широко распространенных в этом регионе гранитоидов Памиро-Шугнанского комплекса, относимых по полученным радиологическим данным к неогеновым образованиям, хотя большинство исследователей без достаточных оснований считают эти граниты верхнемеловыми.

Флогопит-вермикулитовые залежи, связанные с ультраосновными щелочными интрузиями, открытые впервые в мире на Ковдорском месторождении, коренным образом изменили весь характер слюдяной промышленности, сильно удешевили слюдяную продукцию и подтвердили перспективность дальнейших поисковых работ на слюды этого генетического типа.

Вместе с тем находка промышленной слюды на Ковдорском месторождении поставила перед исследователями ряд чисто теоретических задач, в решении которых приняли участие и сотрудники отдела.

Первой такой задачей была необходимость выявления условий образования вермикулита, для которого первоначально предполагалось гидротермальное происхождение. Работами отдела впервые однозначно установлена гипергенная природа вермикулитовых месторождений и обоснована возможность нахождения под вермикулитовыми залежами промышленных скоплений флогопита. В соответствии с этим прогнозом вскрыто на глубине Ковдорское месторождение флогопита.

Сейчас на основе аналогичных рекомендаций ведутся работы на других подобных массивах.

Работы отдела по минералогии и генезису вермикулита, зональности строения слюдяных залежей, стадийности и особенностям выветривания самих магнезиально-железистых слюд лежат в основе прогнозирования, разведки и оценки вермикулитовых месторождений.

Детальное изучение состава и свойств и установление технологического различия магниевых и натровых вермикулитов позволяет более точно и экономически рентабельнее оценивать месторождения этого ценного полезного ископаемого.

Природа слюд в составе щелочно-ультраосновных интрузий до сих пор не вполне ясна. Видимо, здесь происходила широкая метасоматическая переработка пород в контакте щелочных и ультраосновных компонентов единой интрузии.

За участие в открытии Ковдорского флогопит-вермикулитового месторождения сотрудники отдела П.П. Токмаков и В.П. Петров отмечены премией.

В настоящее время исследование флогопитовых месторождений отдел продолжает в тесном содружестве с Ковдорским, Алданским и Слюдянским рудоуправлениями.

#### ПРОЧИЕ ЭНДОГЕННЫЕ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ

**Мусковит.** Традиционным для отдела неметаллов является изучение слюдоносных пегматитовых жил. Эти исследования были определены правительственным заданием в 1949 г. Впоследствии, после организации Института Гипрометаллоруд, эти работы в отделе неметаллов сильно сократились.

На основе полевого изучения слюдоносных пегматитовых жил показано, что эти жилы следует рассматривать как "пегматиты скрещивания", чем в значительной степени обуславливается приуроченность промышленных слюдоносных жил к богатым глиноземом вмещающим породам, что рассматривается как поисковый признак.

На основе экспериментов и теоретических разработок было показано, что взгляды А.Е. Ферсмана на природу пегматитовых жил могут быть распространены и на промышленные слюдоносные жилы.

**Графит.** Работы по графиту в отделе неметаллических полезных ископаемых были начаты относительно недавно и проводились только на основе изучения особо высококачественных и весьма дефицитных графитов Ботогольского месторождения, наиболее интересного с петрографической точки зрения объекта, где издавна предполагался магматический генезис графита.

В результате проведенной работы (Р.В. Лобзова) было показано, что ботогольский графит не является первичным магматическим, а заимствован нефелин-сиенитовой магмой из вмещающих пород. Впоследствии графит был перекристаллизован и переотложен в магматических условиях.

**Драгоценные и поделочные камни.** Работы последних лет показали, что в области изучения драгоценного и поделочного камня существует большое число нерешенных вопросов.

Исследования в области драгоценных камней проводятся в Институте довольно широко и дают большие результаты. В.И. Финько в течение ряда лет велись большие работы по изучению структурных особенностей и условий образования агатов. Им было открыто несколько месторождений этого полезного ископаемого. Изучение связей хризопраза с корами выветривания выполняется В.С. Знаменским и С.С. Чекиным. Интересные результаты были получены М.А. Лицаревым при изучении двух лазуритовых месторождений на Памире и по р. Слюдянке. Эти работы продолжаются. В.В. Наседкиным исследуются также разновидности благородного обсидиана.

**Горно-химическое сырье.** Изучение горно-химического сырья в отделе имеет подчиненное значение, поскольку этим видом сырья занимается Институт горно-химического сырья.

Отделом выполнены некоторые перспективные работы по изучению новых и особо дефицитных видов горно-химического сырья. В частности, проведен учет всех возможных типов месторождений апатита и дан обзор всех месторождений апатита, намечены пути выявления новых месторождений этого важнейшего сырья. В настоящее время многие месторождения апатита, о которых говорилось в обзоре, изучаются и подготавливаются к разработке.

Изучены месторождения вулканогенной серы Курильских островов и дан обзор месторождений этого типа. Выдвинута гипотеза кальдерного образования крупных вулканогенных месторождений серы (В.С. Знаменский).

**Облицовочный камень.** Это традиционный объект исследования отдела неметаллических полезных ископаемых ИГЕМ. В отделе разработаны методы изучения камня и его оценки, заслужившие широкое признание.

В настоящее время облицовочный камень является весьма дефицитным видом сырья.

Отделом совместно с лабораторией физико-механических свойств горных пород (Б.В. Залесский, Б.П. Беликов) созданы теоретические основы испытания камня и предложены способы оценки камня. Изучены условия формирования камня с определенными физико-механическими свойствами. С участием работников отдела промышленными организациями были рассмотрены возможные ресурсы облицовочного камня нашей страны и были намечены пути дальнейшего развития геологических работ в этом направлении.

Сотрудники отдела провели исследования мраморных месторождений Кубы (В.П. Петров, М.А. Лицарев, В.И. Финько, Б.П. Беликов). Кубинским специалистам передан методический опыт исследования месторождений мрамора, указаны некоторые новые перспективные точки, в которых может быть организована добыча мрамора.

Опыт изучения облицовочных камней обобщен в специальной монографии.

#### НОВЫЕ ВИДЫ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКОГО СЫРЬЯ

**Наполнители.** Изучение наполнителей различных химпродуктов (пластмасс, инсектоfungицидов и др.) проводится отделом в течение почти 20 лет.

Интенсивное развитие химической промышленности предъявляет новые требования к природным наполнителям.

Отдел неметаллов является ведущей организацией по составлению требований к природным минеральным наполнителям и широко консультирует производственные организации по минералогии природных веществ, используемых как наполнитель.

Исследовательские задачи в отношении минералов и горных пород, используемых как наполнитель, сводятся к выявлению особенностей

их состава, структуры и к поискам сырья с наиболее благоприятными технологическими свойствами. Например, исследования тальковых руд, проводившиеся П.П. Смолиным, показали, что при образовании талька за счет ультрабазитов железо входит в структуру талька, а в доломитовых породах — алгуйских и киргитейских тальках — железо содержится в самостоятельных минералах. В результате сделан вывод о возможности очищения талька из доломитов от железа механической или химической обработкой.

Близкий характер имеют исследования каолинов, используемых как наполнитель бумаги, проводившиеся С.С. Чекиным. Им показано, что использованию каолинов препятствует железо, входящее в состав слюд и гидрослюд, присутствующих в виде примесей в каолинах, тогда как железо, образующее самостоятельные минералы, даже нарастающие на чешуйки каолинита или проникающие в них, менее вредны; они могут быть удалены химической обработкой или отмучиванием.

**Новые виды керамического сырья.** Отдел выступил инициатором изучения новых видов керамического сырья и полевого шпата непегматитового происхождения. Еще в пятидесятых годах были намечены пути, по которым должен был идти поиск новых видов керамического сырья. В качестве первоочередных задач выдвигались поиски заменителя наиболее дефицитного материала — пегматитового полевого шпата, с которым в стекольную и фарфоровую шихту вводится калий, являющийся плавнем.

Наиболее простым предложением явилась рекомендация механического обогащения гранита с извлечением калиево-полевошпатового концентрата. Однако огромная коллективная работа, проведенная с участием специалистов отдела неметаллов ИГЕМ, показала, что в природе отсутствуют граниты, в которых полевой шпат был бы лишен ультрамелких включений плагиоклаза, резко снижающих качество полевого шпата. Сейчас в СССР существуют предприятия, выпускающие флотационный концентрат полевого шпата, но этот полевой шпат, к сожалению, довольно низкого качества и используется только в некоторых неотчетливых производствах.

Вторым возможным направлением были специальные работы по выявлению горных пород, имеющих благоприятный состав и могущих быть использованными в составе керамических и стекольных шихт. Детальный анализ имеющейся петрографической литературы и региональных работ позволил наметить районы, где возможно нахождение подобных пород, и провести там целенаправленные исследования. В результате была доказана промышленная ценность Гусевского и Сергеевского месторождений фарфорового камня в Приморье. Сейчас эти месторождения эксплуатируются с очень большим экономическим эффектом и дают сырье для лучшего фарфора Союза.

Внедрение фарфорового камня, щелочных риолитов и других новых видов сырья может улучшить качество продукции тонкокерамической промышленности на уже действующих предприятиях. В ряде районов страны, где месторождения традиционных видов сырья от-

сутствуют и нет геологических предпосылок для их нахождения, возможно создание тонкокерамической промышленности на местном сырье.

Последним путем поисков нового керамического сырья, пока не реализованным, является использование нижних горизонтов коры выветривания ("содовых" каолинов), где оказываются неразрушенными калиевые полевые шпаты, которые, видимо, представляют наилучшее полевошпатовое сырье и, как предполагается в будущем, "содовые" каолины будут главным источником керамического полевого шпата.

Намеченные выше направления исследований актуальны и сейчас. Отдел неметаллических полезных ископаемых продолжает работы в этом направлении, широко делаясь опытом и консультируя исследовательские работы других ведомств, работающих в этом направлении.

**Мелкочешуйчатая слюда.** Отдел является инициатором изучения весьма важного сейчас неметаллического полезного ископаемого — мелкочешуйчатого мусковита. По прогнозу отдела в области регрессивного метаморфизма эклогитовых толщ в Кокчетавском районе разведано крупнейшее Кулетское месторождение этого сырья в Северном Казахстане (П.П. Токмаков, С.С. Чекин). Разведка этого месторождения продолжается. Экономический эффект от внедрения мелкозернистого мусковита в народном хозяйстве может быть весьма значительным.

**Прочие новые виды неметаллического сырья.** Помимо новых видов полезных ископаемых, практическое значение которых уже окончательно выявилось, Отдел ведет изучение ряда новых возможных видов неметаллических ископаемых.

Из числа многочисленных проблем, разрабатываемых с участием сотрудников Отдела, следует указать на весьма актуальную проблему использования волластонита в качестве заменителя асбеста и сырья, дающего совершенно необычные керамические материалы для электротехнических целей и для строительных деталей.

Очень большое значение в последние годы приобретает проблема использования природных цеолитов, которые сейчас, видимо, следует рассматривать как дешевый заменитель синтетических цеолитов. Естественные цеолиты, видимо, будут использоваться для очистки нефтяных газов и других целей.

Как принципиально новая выдвигается проблема поисков природной соды.

Крайне интересно нахождение в ряде мест минерала давсонита, который также может служить источником глинозема и содовых продуктов. Давсонитовые месторождения выявлены в Белоруссии и продолжают изучаться при консультации сотрудников Отдела.

Необходимо дальнейшее изучение условий распределения содовых минералов и давсонита в природе и составление прогноза по их поискам на территории Советского Союза.

**Каолиновые месторождения.** Изучение каолина является традиционным объектом исследований Отдела неметаллических полезных ископаемых.

В отчетный период изучались геология и минералогия месторождений каолина и каолиновых кор выветривания Союза, особенно в Казахстане, Восточной Сибири, на Украине, Дальнем Востоке и Урале. Особое внимание уделялось недавно открытому Алексеевскому месторождению Казахстана.

Продолжалось изучение каолинового профиля выветривания и его зонального строения, которое, как выяснилось, усложняется при переходе от кислых к более основным по составу породам (от микроклиновых гранитов к плагиогранитам и диоритам). Изучение каолиновых профилей выветривания на различных по составу породах приводит к выводу, что минеральный состав каолинов строго зависит от минерального состава материнских пород. Эта зависимость особенно четко выражена в селективном замещении материнских минералов гипергенными новообразованиями.

Промышленные месторождения первичного каолина почти всюду в мире образовались путем выветривания пород гранитного ряда. Однако по своим технологическим свойствам каолины разных месторождений могут довольно резко различаться. Это обусловлено как изменчивостью морфологии и других свойств самих каолиновых кристаллов, так и наличием почти неизбежной примеси других новообразованных минералов — галлуазита, монтмориллонита, серицита. Эти минералы-примеси обычно рассматриваются либо как промежуточные образования, возникающие при каолинизации полевых шпатов, либо как образования, генетически не связанные с процессами каолинизации. Кроме того, весьма вероятно представление о том, что при выветривании полевых шпатов в качестве промежуточного продукта образуются минералы свободного водного глинозема.

Минеральный состав каолиновых залежей во многом зависит от особенностей минерального состава материнских пород. Поэтому, при изучении каолиновых профилей выветривания необходимо по возможности полнее выявлять и учитывать эти зависимости, на основании которых можно предсказать технологические свойства каолинов разных типов.

Изучение начальных продуктов выветривания главных алюмосиликатных минералов проводится в Отделе неметаллов совместно с Лабораторией электронной микроскопии с помощью электронно-микроскопического метода вакуумного декорирования (В.И. Финько, С.С. Чекин, Н.Д. Самотоин). Удалось показать, что в каолиновой коре выветривания гранитов микроклин и мусковит замещаются непосредственно каолинитом, а олигоклаз — галлуазитом без образования каких-либо промежуточных минералов. В коре выветривания более основных пород андезин и лабрадор первоначально замещаются монтмориллонитом. Это свидетельствует об определяющем влиянии на состав и структуру новообразований узколокальных особенностей химизма среды выветри-

вания, возникающих вследствие различий в химическом составе материнских минералов.

Судя по более раннему появлению галлуазита, этот минерал по сравнению с каолинитом образуется в менее кислой обстановке. Вхождение в состав галлуазита межслоевой воды может быть обусловлено влиянием положительно гидратирующихся катионов  $\text{Na}^+$  и  $\text{Ca}^{++}$ , упрочняющих слой воды, тогда как в случае каолинита отрицательно гидратирующийся катион  $\text{K}^+$  препятствует образованию устойчивого межслоевого водного каркаса.

Характерны особенности взаимоотношения новообразованных минералов с материнскими; наблюдается закономерная ориентировка новых минералов на старых и послыйный рост новообразованных слоистых силикатов, замещение материнского минерала вдоль тончайших трещин, соизмеримых по размерам с размерами каолинитового слоя, и селективное замещение микровключений, а также образование псевдоморфоз по какому-либо первоначальному минералу, состоящих из агрегатов определенного новообразованного минерала.

Структуры первичных минералов при замещении полностью разрушаются, их компоненты переходят в раствор и уже из части растворенных компонентов на месте формируются элементарные слои тех глинистых минералов, которые устойчивы в новых физико-химических условиях. Однако на ориентировку глинистых минералов оказывает сильное влияние структура первичного минерала, что видно в явлениях эпитаксиального роста.

Теоретические представления о природе древних кор выветривания, в разработке которых приняли участие сотрудники Отдела неметаллов, обуславливают важнейший поисковый признак на все полезные ископаемые древних кор выветривания — их стратиграфическая приуроченность к континентальным перерывам осадконакопления, обязательно сопровождающимся эпохами мощного выветривания.

В пределах СССР наиболее часто сохраняются мощные коры выветривания, образовавшиеся в начале мезозоя, реже встречаются коры выветривания палеозойского возраста, а в южных частях Союза, в тропиках и субтропиках, обычны мощные коры выветривания олигоценового или миоценового возрастов. Иначе говоря, коры выветривания наиболее вероятно искать на поверхности палеозойских пород в тех местах, где они перекрываются породами мезозоя и кайнозоя. Мощные палеозойские коры выветривания встречаются на нижнепалеозойских, протерозойских и архейских породах, перекрываемых девонскими, каменноугольными и более молодыми осадками. В тропиках коры выветривания наиболее вероятно искать на нижнетретичных и более древних породах. При этом во всех случаях наиболее вероятно нахождение кор выветривания на древних поверхностях выравнивания.

Тальк. Исследованиями Отдела выявлен и изучен новый тип тальковых руд — порошокватые талькиты коры выветривания. В настоящее время порошокватые талькиты Киргитейского и Алгуйского месторождений, разведанные по рекомендациям и при участии Отдела, составляют главную часть балансовых запасов талька в СССР.

С ними связаны ближайшие перспективы дальнейшего развития тальковой промышленности. Исследованиями Отдела показана исключительно благоприятная роль мощного выветривания, приводящего к естественному обогащению и облагораживанию первичных эндогенных тальковых руд. В коре выветривания происходит практически полное выщелачивание вредной примеси карбонатов, талькиты приобретают свойства повышенной абсорбционной способности и чрезвычайно интенсивно дезинтегрируются. Это позволяет непосредственно использовать их без предварительного помола и создает предпосылки к применению высокоэффективных гидравлических, возможно, и пневматических способов добычи.

**Бокситы.** В древних корях выветривания и в продуктах переотложения материала кор выветривания с каолинитом ассоциируют залежи боксита — важнейшего алюминиевого и огнеупорного сырья. Совместное изучение боксита и каолина, проведенное в Отделе неметаллов ИГЕМ, показало, что кроме накопления в верхах коры выветривания, где находится большинство промышленных бокситовых руд, бокситовые минералы образуются во многих случаях в низах коры выветривания, замещая галлуазит и монтмориллонит, и сами выше переходят в каолиновый материал. Это позволило Отделу рекомендовать поиски и разведку не только бокситов, залегающих в верхах толщи выветривания, но и бокситов, образующихся в низах коры выветривания или скопляющихся в продуктах перемыва кор выветривания.

Как на известное доказательство справедливости этих предположений можно указать на находки бокситовых корочек, залегающих непосредственно на габбро-диабазе острова Пинос и на габбро в провинции Ориенте на о. Куба, а также на диабазах в провинции Нижний Заир в Республике Заир. Все эти находки были результатом целенаправленности поисков именно в низах тропической коры выветривания (М.А. Лицарев, В.И. Финько, В.П. Петров).

Находки бокситовых корочек сами по себе не имеют непосредственного практического значения, но они позволяют понять природу многих брекчиевидных бокситовых накоплений в делювиальных толщах, образующихся при перемыве толщ выветривания и залегающих на коре выветривания. Такие бокситовые брекчии эксплуатируются в Китае на о. Хайнань и в Сараваке на о. Борнео.

Изучение переотложенных каолин-бокситовых толщ показало существование фациальных переходов между бокситовым и каолиновым материалом, что также может служить поисковыми признаками на боксит и высокоглиноземистые огнеупорные глины.

**Бентонитовые глины.** Изучаются только те бентонитовые глины, которые образовались как продукт изменения вулканического стекла и которые представляют собой наиболее высококачественное сырье (С.С. Чекин).

Изучение бентонитовых глин ведется в тесном контакте с Институтом МГ СССР НИИГЕОЛНЕРУД (г. Казань) и КИМС (г. Тбилиси).

В последние годы совместно с Министерством геологии СССР проведен ряд Всесоюзных совещаний по бентонитовым глинам. Труды этих

совещаний, опубликованные под редакцией Отдела, являются основой для дальнейших геологических поисковых работ на это важнейшее сырье.

**Вермикулит.** В областях наложения древней коры выветривания на слюдяные месторождения Ковдорского типа (см. выше), а также другие богатые слюдой породы типа гнейса или слюдита развиваются чрезвычайно интересные продукты выветривания слюд, обладающие способностью вступать при нагревании. Такие продукты являются ценнейшим нерудным полезным ископаемым, широко эксплуатирующимся в нашей стране и за рубежом. Эти гидратированные слюды (или, как их принято называть, вермикулиты) во вступенном виде являются важнейшим теплоизоляционным материалом, широко используемым в народном хозяйстве.

Изучением этих материалов в нашем Институте, проводимым П.П. Токмаковым, вскрыто своеобразное смешанослойное строение этих минералов; выявлено технологическое различие натровых и магниевых вермикулитов. Это в свою очередь позволяет точнее оценивать месторождения этого ценнейшего полезного ископаемого и прогнозировать поиски как вермикулита, так и флогопита, залегающего под вермикулитовой залежью.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Андреев Ю.К. Щелочно-амфиболовая минерализация в некоторых эмсевиловых массивах Урала. – Труды ИГЕМ АН СССР, 1959, вып. 39.
- Апатиты. "Наука", 1968.
- Асбест как минерал и полезное ископаемое. – Труды ИГЕМ АН СССР, 1959, вып. 32.
- Белянкина Е.Д., Гурьева Э.Я., Игнатова М.Д., Петров В.П., Толстихина К.И. Генезис и типизация промышленного мусковита. – Труды ИГЕМ АН СССР, 1958, вып. 12.
- Водные вулканические стекла и поствулканические минералы. "Наука", 1967.
- Вспученные строительные и теплоизоляционные материалы. – Итоги науки, серия неметал. пол. ископ., т. 3, ВИНТИ, 1973.
- Гапеев А.П. Новая тальконосная провинция хребта Малый Каратау. "Наука", 1965.
- Генезис месторождений самородной серы и перспективы их поисков. "Наука", 1974.
- Геохимия и минералогия серы. "Наука", 1972.
- Драгоценный и поделочный камень как полезное ископаемое. "Наука", 1973.
- Дриц В.А., Звягин Б.Б., Токмаков П.П. Гюмбелит – диоктаэдрическая слюда  $2M_2$ . – Докл. АН СССР, серия геол., 1966, 170, № 6.
- Закономерности размещения полезных ископаемых, т. VI. Закономерности размещения магнезиально-силикатных полезных ископаемых и формаций магнезиальных пород. "Наука", 1962.
- Закономерности формирования и размещения месторождений вулканического стекла. "Наука", 1969.
- Исследование в области петрографии и минералогии нерудных ископаемых. – Труды ИГЕМ АН СССР, 1957, вып. 17.
- Каолиновые месторождения и их генезис. Доклады сов. геологов к 23 сессии МГК. Симпозиум № 1. "Наука", 1968.
- Каолины. "Наука", 1974.
- Лицарев М.А. Генезис флогопитовых месторождений Алдана. – Труды ИГЕМ АН СССР, 1961, вып. 67.
- Лобзова Р.В. Графит и щелочные породы района Ботогольского массива. "Наука", 1975.

- Магидович В.И. Полевошпатовое сырье: его генетические типы и принципы оценки. "Наука", 1964.
- Материалы к изучению горного хрусталя. — Труды ИГЕМ АН СССР, 1960, вып. 40.
- Меренков Б.Я. Генезис хризотил-асбеста. — Труды ИГЕМ АН СССР, 1959, вып. 22.
- Месторождения амфиболовых асбестов и их генезис. "Наука", 1971.
- Месторождения монтмориллонитовых (бентонитовых) глин. — Итоги науки, серия неметал. полезные ископаемые, т. 1, 1967.
- Минералогия и петрография месторождений нерудных ископаемых. — Труды ИГЕМ, 1957, вып. 10.
- Наседкин В.В. Водосодержащие вулканические стекла кислого состава, их генезис и изменение. Изд-во АН СССР, 1963.
- Наседкин В.В. Заполнители для легких бетонов (вулканогенные породы). Методич. указания по производству геолог. разв. работ по неметал. полезн. ископаемым. "Недра", 1974.
- Наседкин В.В. Петрогенезис кислых вулканитов. "Наука", 1975.
- Неметаллические полезные ископаемые гипербазитов. "Наука", 1973.
- Новые виды неметаллических полезных ископаемых. "Наука", 1975.
- Облицовочные камни. "Наука", 1974.
- О составе и свойствах мегнезиально-железистых слюд и продуктов их изменения. Сб. депонирован в Ин-те информации № 3381-71. Деп. от 26/VIII-1971.
- Перлит и вермикулит. Госгеолтехиздат, 1962.
- Петров В.П. Новые неметаллические полезные ископаемые. — Разведка недр, 1955, № 3.
- Петров В.П. Основы учения о древних корах выветривания. "Недра", 1967.
- Петров В.П. Магма и генезис магматических горных пород. "Недра", 1972.
- Петров В.П., Финько В.И., Беликов Б.П., Коутин Д., Гарсия А. Мраморы Кубы. — В сб. "Геолог. полезн. ископ. Кубы". "Наука", 1973.
- Петрография и минералогия месторождений асбеста. — Труды ИГЕМ АН СССР, 1960, вып. 47.
- Петрография и минералогия месторождений перлита, керамического сырья и слюды. — Труды ИГЕМ АН СССР, 1961, вып. 48.
- Природные каменные облицовочные материалы. — Итоги науки, серия неметал. пол. ископ., 1975, т. 4.
- Природные минеральные наполнители (их ресурсы и использование в промышленности). — Труды ИГЕМ АН СССР, 1963, вып. 95.
- Продукты вулканизма как полезные ископаемые. "Наука", 1975.
- Смолин П.П. Контактные процессы послееюрских интрузий Алдана. — Труды ИГЕМ АН СССР, 1960, вып. 38.
- Смолин П.П. О природе взаимозависимостей состава, свойств, генетических типов руд и промышленных характеристик талька. — В кн. "Проблемы геологии минер. местор. петрогр. и минер." "Наука", 1969, т. 1.
- Смолин П.П. Условия формирования месторождений магнезита, талька и брусита в эволюции магнезиально-карбонатных толщ. — В кн. "Доклады сов. геол. к 25 сессии МГК. Петрология". "Наука", 1976.
- Сырьевая база кремнистых пород СССР. "Наука", 1974.
- Тальк как минерал и полезное ископаемое. — Труды ИГЕМ АН СССР, 1969, вып. 63.
- Токмаков П.П., Замуруева М.Г. О генезисе Бульдымского месторождения вермикулита. — В кн. "Магматизм, метаморфизм, металлогения Урала", 1963, т. 1.
- Финько В.И. Геолого-петрографическая характеристика и генезис огнеупорных глин Зейско-Буреинской депрессии. — Труды ИГЕМ АН СССР, 1960, вып. 26.
- Финько В.И., Петров В.П., Коутин Д.Н. Обзор неметаллических полезных ископаемых Кубы. — В сб. "Геол. полезн. ископ. Кубы". "Наука", 1973.
- Чекин С.С. Нижнемезозойская кора выветривания Иркутского амфитеатра. "Наука", 1973.

## ПРОБЛЕМЫ МЕТАСОМАТИЗМА И МЕТАМОРФИЗМА

Отдел метасоматизма и метаморфизма ИГЕМ был организован под руководством академика Д.С. Коржинского в 1956 г. Основной задачей является изучение природных метасоматических и метаморфических, а также сопряженных с ними эндогенных рудных и магматических формаций, с выделением физико-химических закономерностей и построением теоретических физико-химических моделей процессов их образования.

На основе петрологических исследований Д.С. Коржинским были сформулированы некоторые новые для того времени идеи, среди которых можно отметить следующие: 1) моделирование процессов минералообразования при помощи термодинамических "систем с вполне подвижными компонентами"; 2) принцип кислотно-основного взаимодействия компонентов в водных растворах и расплавах окислов; 3) теория метасоматической зональности; 4) гипотеза трансмагматических потоков флюидов и магматического замещения.

При исследованиях минеральных месторождений и метаморфических образований эти идеи получили дальнейшее развитие и появились новые направления физико-химической петрологии. Сюда можно отнести, например, исследования соответствия составов сосуществующих минералов ("фазовое соответствие") в работах Л.Л. Перчука, приведшие к разработке многих новых геотермометров, и исследование состава и режима флюидов на основе количественных термодинамических расчетов, экспериментов и полевых наблюдений Н.Н. Перцева. Ряд новых идей в области физико-химической петрологии был изложен в работах чл.-корр. АН СССР В.А. Жарикова.

### АНАЛИЗ ПАРАГЕНЕЗИСОВ МИНЕРАЛОВ

Начало анализу закономерностей парагенезисов (ассоциаций) минералов было положено трудами В.М. Гольдшмидта и П. Эскола. Существенным моментом в дальнейшем развитии анализа парагенезисов минералов явилось введение понятия о термодинамических системах с вполне подвижными компонентами и о применении к ним правила фаз Гиббса (Коржинский, 1936) и о термодинамических потенциалах таких систем (Коржинский, 1949). Эти новые понятия позволили распространить физико-химический анализ на открытые системы, например метасо-

матические, в которых равновесные состояния зависят для менее подвижных компонентов от их содержания в рассматриваемой системе ("инертные компоненты"), а для более подвижных компонентов равновесные состояния зависят от интенсивных параметров — активности, парциального давления или химического потенциала их во внешней среде ("вполне подвижные компоненты"). Так, например, при метаморфизме карбонатных пород образование карбонатов или силикатов зависит, с одной стороны, от масс кальция, магния, кремнезема и проч., а с другой, — от парциального давления  $\text{CO}_2$  при метаморфизме (а не от исходного содержания углекислоты в породе). Интересно, что эти представления возникли из опыта изучения парагенезиса минералов в горных породах, т.е. исходя из эмпирических закономерностей, и лишь затем получили термодинамическую формулировку.

В 1957 г. вышло систематическое изложение методов анализа парагенезисов минералов с использованием теории систем с вполне подвижными компонентами (Коржинский, 1957). Эта книга была за рубежом опубликована также на английском, французском и японском языках. Эти методы затем получили широкое применение в работах советских и отчасти зарубежных авторов. Вместе с тем весьма интересно то, что дискуссии по правомочности термодинамических систем с вполне подвижными компонентами и применению их в геологии продолжаются с 1936 г. вплоть до настоящего времени. Одной из главных трудностей является представление о дифференциальной подвижности компонентов в природных метасоматических процессах, согласно которому равновесное состояние породы может в пределе достигаться при инертности одних компонентов и полной подвижности других. Такая система легко осуществима в лаборатории как мембранное равновесие, когда система отделена от внешней среды полупроницаемой мембраной, проницаемой для одних компонентов и непроницаемой для других. Но как может осуществляться дифференциальная подвижность компонентов в земной коре, в которой полупроницаемые мембраны отсутствуют? На этот вопрос отвечает теория метасоматической зональности (Коржинский, 1969), согласно которой при метасоматизме в силу медленности перемещения вещества сравнительно со скоростью реакций часто достигается "мозаичное" или "локальное" равновесие, при котором в каждой зоне равновесие зависит от масс одних компонентов и концентраций в поровых растворах других, более подвижных. Понятие о локальном равновесии в сложной, в целом неравновесной системе, в которой совершаются реакции с изменением состава минералов, конечно, представляет некоторые трудности для понимания, но это оказалось необходимым и плодотворным в различных разделах физической химии. В отношении более подвижных компонентов, как  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$ , никто не возражает против того, что их парциальное давление, а не содержание в данном объеме породы является фактором минерального равновесия при метаморфизме. Но при более интенсивном воздействии флюидов на горные породы и другие компоненты могут перейти во "вполне подвижное" состояние, когда фактором

равновесия в рассматриваемой зоне становится не их исходное содержание в породе, а их активность в воздействующем растворе. Обычно скорее всего это достигается для щелочных металлов, серы и проч.

Наличие в минеральной системе подвижных компонентов может быть установлено применением к минеральным ассоциациям правила фаз Гиббса, поскольку число одновременно устойчивых минералов определяется числом инертных компонентов и не зависит от числа вполне подвижных. Путем систематического анализа горных пород может быть установлена относительная подвижность компонентов при формировании и изменении пород и зависимость парагенезисов от активности подвижных компонентов в воздействующих флюидах или растворах.

Во второе издание монографии по анализу парагенезисов (Коржинский, 1973<sub>1</sub>) внесен ряд дополнений и, в частности, включена глава, в которой развивается теория экстремальных состояний. Наиболее простым примером экстремального состояния является пара сосуществующих минералов с одинаковым соотношением содержаний каких-либо двух компонентов, например магния и железа. При таком составе активности всех других компонентов имеют максимальное или минимальное значение сравнительно с их значениями при других составах этих двух минералов. Экстремальные составы имеют значение прежде всего потому, что они зависят от температуры и давления и потому важны для геотермометрии и геобарометрии. Вместе с тем изучение экстремальных составов минералов дает новое освещение проблемы единичных количеств минералов, т.е. минеральных молекул. Дело в том, что минералы переменного состава нередко до некоторой степени приближаются к совершенным смесям слагающих их минералов (например, смесь форстерита и фаялита в оливинах). Но такое приближение действительно только для определенного выбора единичных количеств минералов. Изучение экстремальных составов дает возможность найти такие единичные количества минералов, при которых их активности в смеси наиболее приближаются к их концентрациям, т.е. при которых их смесь наиболее близка к совершенной. Но эти вопросы еще только выдвинуты и здесь еще много неясного.

В последние годы анализ парагенезисов минералов в метаморфических, метасоматических и магматических породах получил широкое распространение, причем развились новые направления этого анализа.

Прежде всего следует остановиться на анализе соотношения составов сосуществующих минералов в зависимости от температуры и давления. Ведущее значение здесь имеют исследования Л.Л. Перчука (Перчук, 1970), обозначившего это направление как проблему "фазового соответствия". Л.Л. Перчук изучил большое количество пар сосуществующих минералов переменного состава и дал для них диаграммы соответствия состава для различных температур, установив таким образом ряд новых геотермометров. Эти геотермометры получили широкое применение как в нашей стране, так отчасти и за рубежом. Но, кроме того, Л.Л. Перчук сформулировал и некоторые общие зако-

номерности перераспределения компонентов между сосуществующими минералами при изменении температуры в зависимости от основности компонентов и симметрии кристаллов. Так, с возрастанием температуры обменные равновесия смещаются в сторону образования соли более сильного основания с более слабой кислотой в ассоциации с солью более слабого основания с более сильной кислотой. Более электроположительный металл при повышении температуры перераспределяется из минералов низших категорий симметрии в высшие.

Первоначально анализ парагенезисов минералов имел преимущественно качественный характер, с изучением преимущественно топологии парагенетических соотношений минералов. Позднее, с появлением данных по термодинамическим константам многих минералов, широкое распространение получили количественные термодинамические расчеты минеральных равновесий. Данные расчетов подкрепляются и дополняются различными геотермометрами и геобарометрами, особенно данными по изучению флюидных включений в минералах. Эти новые исследования дают количественные данные не только о температурах и давлениях минеральных превращений, но и о составе флюидов, парциальном давлении воды, углекислоты, кислорода и некоторых других компонентов флюида. Таковы, например, исследования Н.Н. Перцева о режиме воды и углекислоты при метаморфических процессах в земной коре (Перцев, 1974). На основании такого рода исследований и установленных им геотермометров Л.Л. Перчук пришел к заключению, что при процессах гранитизации граниты кристаллизуются при тех же примерно температурах, что и окружающие их мигматиты и гнейсы, но при более высоком парциальном давлении воды, т.е. гранитизация вызывается повышением парциального давления воды.

## ТЕОРИЯ МЕТАСОМАТИЧЕСКОЙ ЗОНАЛЬНОСТИ

Метасоматические образования часто обнаруживают правильную зональность. Так, например, около рудоносных кварцевых жил боковые породы гранитоидного состава часто бывают изменены с новообразованием в них альбита, хлорита и карбоната. С приближением к кварцевой жиле карбонат исчезает, затем альбит замещается кварцем с серицитом, еще ближе к жиле хлорит исчезает и остается двуминеральная кварц-серицитовая порода. При этом границы между зонами разного минерального состава часто бывают резкими. Эта резкость границ ранее объяснялась сменой, пульсацией растворов: сначала действовали растворы, вызывавшие альбитизацию пород, потом вдоль жильной трещины стали протекать другие растворы, которые вызвали растворение карбоната, а затем новые растворы разлагали альбит на серицит и кварц.

Новое объяснение метасоматической зональности было дано в ряде статей Д.С. Коржинского, публиковавшихся начиная с 1946 г. В этих статьях развивалась физико-химическая теория метасоматической зональности. В обобщенном и дополненном виде эта теория была

изложена в монографии 1969 г. (в 1970 г. эта книга была опубликована за рубежом на английском и японском языках).

В основу теории положено допущение, что просачивание (инфильтрация) растворов или диффузия в нем компонентов происходят медленно сравнительно со скоростью реакций между поровым раствором и минералами породы, так что несмотря на неравновесность системы в целом, в каждом элементарном ее участке существовало "локальное" или "мозаичное" равновесие. Хотя представление о локальном равновесии в неравновесных системах на первый взгляд кажется противоречивым, но его правомочность и плодотворность давно уже признаны в различных разделах физической химии.

На основе допущения локального равновесия выведены системы дифференциальных уравнений для инфильтрационного и отдельно для диффузионного метасоматизма. Существенным моментом является доказательство на основе этих уравнений того, что разрастание метасоматических колонок как при инфильтрационном, так и при диффузионном процессе происходит без изменения минерального состава разрастающихся зон и без изменения отношений их ширины. Реакции раствора с породой с изменением качественного минерального состава породы приурочены к резким границам между зонами — "фронтам замещения". Эти реакции приводят к постепенному уменьшению числа минералов в породе, вплоть до образования мономинеральной тыловой зоны.

Рассмотрены критерии различия инфильтрационных метасоматических колонок от диффузионных. Так, химическое осаждение рудных компонентов на фронте замещения возможно лишь при инфильтрационных, но не диффузионных процессах. Существенным отличием является также то, что на протяжении каждой зоны диффузионной колонки минералы могут иметь переменный состав, тогда как на протяжении зоны инфильтрационной колонки те же минералы обычно обладают постоянным составом.

Теория метасоматической зональности сходна с теорией хроматографии, но имеются весьма существенные отличия. Так, метасоматоз большей частью совершается при постоянном объеме, когда независимым термодинамическим параметром является объем, а давление на минералы зависит от концентрации раствора и в разных зонах может быть различным и превосходящим давление на раствор. В этих условиях осаждаются минералы, обладающие в данной зоне наибольшим "кристаллизационным давлением", тогда как минералы, обладающие меньшим кристаллизационным давлением, должны растворяться.

Развита теория вертикальной зональности минерализации при послемагматических процессах с учетом температурного градиента. В основе ее лежит представление, что затухающий поток трансмагматических флюидов при кристаллизации магмы обогащается кислотными компонентами, входившими в состав магмы, но не входящими в состав минералов. Так возникает "волна" кислотности, типичная для послемагматических процессов. В силу "кислотного фильтрационного эффекта" эта волна кислотных компонентов поднимается в общем

потоке растворов, просачивающихся через поры горных пород и вдоль закрытых трещин, быстрее, чем основные компоненты раствора. Поэтому прохождение такой "опережающей волны кислотности" вызывает сначала кислотное выщелачивание толщ пород, а затем более концентрированное осаждение рудных и других основных компонентов как выщелоченных волной кислотности, так и магматогенных, в отношении которых растворы с уходом волны кислотных компонентов становятся пересыщенными. При этом активность кислотных компонентов в волне кислотности изменяется с температурой. Первоначально охлаждение высокотемпературного флюида из-за его уплотнения и конденсации кислотных компонентов приводит к повышению их активности, которая достигает максимума при умеренных температурах, а затем при дальнейшем охлаждении понижается. На основе этих представлений построена математическая модель вертикальной зональности послемагматического процесса, хорошо объясняющая основные его особенности. Действительно, характерной особенностью послемагматических процессов является смена первоначального кислотного выщелачивания последующим осаждением рудных и основных жильных (например, карбонаты) минералов с преобладанием кислотного выщелачивания внизу, обычно в приконтактных частях гранитоидов, и осаждением сверху.

В книге (Коржинский, 1969) были рассмотрены модели только предельных случаев метасоматизма, которые должны происходить при соблюдении условий локального равновесия и при отдельности диффузионных и инфильтрационных процессов. В реальных процессах имеют значения и многочисленные другие факторы, такие, как различная скорость реакции между поровым раствором и различными минералами, совмещение диффузии и инфильтрации, величина зерна (влияние поверхностного натяжения кристаллов), структура и размещение пор, градиенты давления и температуры и прочие. Рассмотреть совокупное взаимодействие всех этих факторов представляется невозможным. Важно выбрать факторы, имеющие решающее значение, с учетом которых можно построить физико-химические модели основных типов метасоматизма, к которым достаточно приближаются природные метасоматические образования.

#### КИСЛОТНО-ОСНОВНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КОМПОНЕНТОВ В РАСТВОРАХ И МАГМАХ

Принцип кислотно-основного взаимодействия компонентов в водных растворах и силикатных магмах разрабатывался Д.С. Коржинским начиная с 1956 г. Он заключается в том, что повышение щелочности-основности раствора или силикатного расплава в силу растворения в нем какого-либо одного основания приводит к повышению валовых коэффициентов активности в нем всех других основных компонентов, и тем большему, чем больше степень их ионизации, т.е. чем сильнее это основание. Об активности окислов металлов можно судить по электроотри-

цательности или энергии ионизации этих металлов. Валовые коэффициенты активности кислотных компонентов при этом соответственно понижаются, а при повышении кислотности раствора или расплава повышаются. При этом был дан термодинамический вывод соответствующих формул. Под валовым понимается коэффициент активности, отнесенный к суммарной (аналитической) концентрации данного компонента как в ионизированной, так и в неионизированной форме.

Кисотно-основное взаимодействие компонентов было положено Д.С. Коржинским в основу теории послемагматического процесса с "опережающей волной кислотности" (см. раздел о метасоматической зональности). Л.Л. Перчуком (1964) было установлено, что повышение температуры смещает изoeлектрическую точку амфотерных окислов и снижает степень ионизации оснований и кислот, особенно более сильных. В.А. Жариковым (1967) вычислены "условные потенциалы ионизации" минералов, характеризующие их относительную основность. Потенциалы вычислены здесь на основе допущения, что основность минералов всецело определяется основностью или кислотностью слагающих их окислов. Это, конечно, упрощение, так как основность минерала (в смысле основности равновесного с ним раствора) зависит и от других факторов, например от растворимости этого минерала. Поэтому эти потенциалы и обозначены В.А. Жариковым как условные.

Значение теории кислотно-основного взаимодействия заключается в том, что она объясняет общую направленность постмагматических и гидротермальных процессов. При кристаллизации магмы с понижением температуры кислотность остаточных флюидов постепенно повышается в силу конденсации летучих кислотных компонентов и общего уплотнения флюида. Это приводит к прогрессирующему кислотному выщелачиванию вмещающих и самих магматических пород и их окварцеванию, причем выщелачивание компонентов происходит в порядке понижающейся основности — начиная с таких сильных оснований, как кальций, магний, и кончая глиноземом (грейзены, вторичные кварциты). По достижении максимальной кислотности дальнейшее охлаждение приводит к понижению кислотности растворов, что вызывает осаждение выщелоченных и магматогенных компонентов в порядке возрастающей их основности — осаждаются слюды, полевые шпаты, затем рудные минералы, карбонаты и другие. Осаждение этих основных минералов часто происходит в трещинах среди выщелоченных пород.

В то время как в водных растворах показателем основности-кислотности служит концентрация водородного иона, в силикатных расплавах показателем основности может служить концентрация кислотного аниона  $O^{--}$ . Как и в водных растворах, повышение основности расплава в силу растворения в нем основного компонента повышает валовые коэффициенты активности всех оснований и понижает их для кислотных компонентов. Повышение активности основных компонентов вызывает повышение температуры кристаллизации минералов, сдвигает эвтектические точки и котектические линии, расширяя поля кристаллизации более основных минералов за счет менее основ-

ных, а при повышении кислотности расплава в силу растворения в нем кислотных компонентов вызывает понижение.

Имеющийся экспериментальный материал по диаграммам плавкости сухих систем прекрасно подтверждает эти положения и позволяет установить относительную основность разных компонентов. Этот порядок соответствует таковому, даваемому рядом энергии ионизации (электроположительности) металлов. Окислы одновалентных (щелочных) металлов оказываются более основными, чем двухвалентных, а последние более основными, чем трехвалентных, и т.д. В каждой группе валентности основность металлов понижается вместе с атомным весом.

## МАГМАТИЧЕСКОЕ ЗАМЕЩЕНИЕ И МЕТАМАГМАТИЗМ

В последние годы Д.С. Коржинский (1972, 1973<sub>1</sub>) продолжает развивать гипотезу трансмагматических потоков флюидов, магматического замещения и метамагматизма, впервые сформулированную им еще в 1952 г. В основе ее лежит представление о дифференциальной подвижности компонентов при формировании магматических пород с особо высокой подвижностью при этом воды, щелочных металлов и летучих кислот, которые могут перемещаться через магму в виде восходящих "трансмагматических" потоков флюидов. Эти флюиды перемещаются главным образом, вероятно, в виде потоков пузырей, которые при течении магмы могут объединяться в пленки и струи, что ускоряет их продвижение. Щелочность возникающей магмы, а следовательно, в существенной мере и их эвтектический состав, определяется щелочностью этих флюидов, имеющих глубинное подкоровое происхождение. Поток этих флюидов, вступая из магмы в боковые породы, вызывает их "магматическое замещение", т.е. расплавление и замещение магмой с одновременным изменением состава, что сближает процессы гранитизации с метасоматическими.

В настоящее время господствуют представления, что гранитизация является "анатексисом", т.е. избирательным расплавлением пород, вызванным их погружением и разогреванием, в условиях закрытой системы, без общего изменения состава. При этом выплавление эвтектического расплава ("мобилизат", по Менерту) должно сопровождаться сегрегацией не вошедших в эвтектику тугоплавких фемических компонентов ("реститы"). Однако такие реститы пользуются ничтожным распространением и большей частью при гранитизации совершенно отсутствуют и в целом гранитизация сопровождается существенной дебазификацией более основных пород, что может быть объяснено только воздействием трансмагматических флюидов. Но как объяснить, что трансмагматические флюиды, поднимающиеся с больших подкоровых глубин, имеющих весьма основной состав, способны дебазифицировать породы земной коры при их гранитизации? Здесь выдвигается гипотеза, что при подъеме через магму и постепенном охлаждении трансмагматических флюидов происходит их конденсация, уплотнение, что приводит к повышению их кислотности, т.е. кислотной агрессивности,

способности растворять основания, подобно тому, как это в еще более резкой форме происходит при постмагматических процессах.

Постепенно повышающаяся кислотность трансмагматических растворов делает возможной дебазификацию основных пород при их гранитизации с уносом излишних (сверхэвтектических) компонентов кверху, где они рассеиваются среди метаморфизируемых толщ. Но вместе с тем может происходить постепенная дебазификация и самой магмы, особенно в зонах более интенсивного просачивания трансмагматических флюидов. Такой процесс дебазификации магмы может быть назван "метамагматической дебазификацией". Особенно достоверным примером метамагматических пород являются аплиты и некоторые пегматиты, в которых иногда совершенно отсутствуют фемические и даже рудные минералы, что не соответствует представлению об эвтектической кристаллизации.

Можно предполагать, что метамагматическая дебазификация имеет более широкое распространение. Так, при слабом проявлении гранитизации первоначально возникают более основные разности гранитов и гранодиоритов (особенно в мигматитах), которые с усилением гранитизации сменяются аляскитовыми гранитами. Это можно объяснить тем, что по мере воздействия более интенсивных потоков трансмагматических флюидов магма все более дебазифицируется ими. С точки зрения анатексиса такие соотношения трудно объяснимы. Ведь по мере разогревания толщ пород первоначально должны выплавляться наиболее кремнекислотные эвтектические магмы, тогда как только по мере дальнейшего разогревания могут образоваться более основные магмы, т.е. последовательность образования магм должна была бы быть обратна наблюдаемой.

Часто наблюдаемое концентрическое строение интрузивных гранитоидных массивов с понижением основности от контактов к центру массива в большинстве случаев, вероятно, обусловлено многофазностью внедрения. Однако не исключена возможность образования такой зональности за счет метамагматической дебазификации внедрившейся гранитоидной магмы потоком трансмагматических флюидов, более интенсивным в средних частях массива.

Другим случаем метамагматизма является ошелачивание магм под воздействием вступивших в них трансмагматических флюидов. В качестве наиболее показательного примера можно привести лампрофировые породы. Они отличаются от жильных пород нормального ряда повышенной активностью щелочных металлов (ассоциация ортоклаза с клинопироксеном) и первоочередной кристаллизацией фемических минералов. Их возникновение можно объяснить ошелачиванием магмы нормального ряда с привнесением флюидами щелочных металлов. Повышение щелочности магмы повышало активность более основных фемических компонентов, что и вызывало первоочередную их кристаллизацию.

Трансмагматические потоки флюидов проявляются не только в гранитоидных магмах, но и в более основных габбро-базальтовых. Так, сульфуризация некоторых долеритовых магм с отщеплением от нее

сульфидного расплава скорее всего связана с воздействием на долеритовую магму трансмагматического флюида, кислотность которого и, в частности, активность содержащегося в нем сероводорода возрастает по мере охлаждения. Обнаруживаются также явления замещения вмещающих пород основной магмой. В контактах Талнахского габбро-долеритового массива эти явления изучены И.А. Зотовым (1976).

В настоящее время теория трансмагматических флюидов разрабатывается многими советскими учеными, в особенности академиком Ю.А. Кузнецовым, проф. А.А. Маракушевым, проф. Л.Л. Перчуком и др. Но, конечно, многое в этой проблеме остается еще невыясненным.

#### ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ЭФФЕКТА

Д.С. Коржинским (1957) была выдвинута гипотеза кислотно-основной дифференциации гидротермальных растворов. Важнейшим и принципиально новым в этой гипотезе было представление о кислотно-основном фильтрационном эффекте. В этом представлении получила дальнейшее развитие идея фильтрационного эффекта, высказанная Д.С. Коржинским еще ранее (1947), как явление перемещения компонентов в просачивающемся растворе с различной скоростью, отличной от скорости фильтрации растворителя. Кислотно-основной эффект выражается в том, что кислотные компоненты раствора, просачиваясь быстрее оснований, создают в потоке растворов опережающую волну кислотных компонентов.

В 1960 г. были начаты обширные экспериментальные исследования фильтрационного эффекта. Исследования (Жариков и др., 1961; Жариков, Алёхин, 1971, 1972) фильтрации растворов хлоридов и сульфатов различных металлов через фильтры из тонкого кварцевого порошка и через срезы горных пород показали несомненное существование кислотно-основного фильтрационного эффекта, фильтрационный эффект фиксируется изменением концентрации кислотных и основных компонентов в фильтрате. Концентрация кислотных компонентов (анионов растворенных солей) в первых порциях фильтрата несколько выше (при фильтрации через сухие фильтры) или равна концентрации в исходном растворе и по мере фильтрации поддерживается на уровне исходного раствора. Концентрация основных компонентов (катионов растворенных солей) в первых порциях фильтрата всегда меньше концентрации в исходном растворе и в дальнейшем фильтруется раствор с постепенным повышением концентрации основных компонентов до определенного стационарного уровня. Изменение концентрации легко подвижных ионов  $H^+$  и  $OH^-$ , сопряженное с изменением концентрации катионов и анионов, вызывает возрастание кислотности растворов во главе потока и закономерное изменение во времени. Резкое выдавливание порового раствора фильтра показали, что в нем происходят обратные изменения: концентрация основных компонентов выше, а кислотных равна или меньше исходного раствора.

Экспериментальные исследования показали, что фильтрационный эффект наблюдается в растворах при просачивании только через тонкопористые среды и зависит от многих факторов: от природы (заряд, радиус и т.д.) ионов, концентрации и кислотности растворов, характеристик (состав, размер пор и т.д.) фильтра. Специальные опыты по сорбционному насыщению фильтров, по выдавливанию поровых растворов и измерению концентрации фильтрата показали, что наблюдаемые в опытах зависимости изменения концентрации не могут быть объяснены сорбционными явлениями, а составляют в значительной мере собственно фильтрационный эффект. Предполагается, что в основе фильтрационного эффекта лежит электрокинетический механизм, вызывающий кислотно-основную дифференциацию раствора вследствие влияния двойного электрического поля, возникающего на границе раствор — порода. Специальные опыты с компенсацией потенциала течения, проведенные в последнее время, показали существенное влияние наложенного электрического поля на концентрацию компонентов фильтрата, подтвердив тем самым главное значение электрокинетических явлений в механизме кислотно-основной гидротермальной дифференциации.

Теоретические исследования методами необратимой термодинамики позволили раскрыть зависимость коэффициента фильтруемости от различных кинетических и термодинамических факторов. Для стационарных условий Д.С. Коржинским (1947) было выведено соотношение  $c'_i \varphi'_i = c''_i \varphi''_i = \dots \text{const}$  (где  $c'_i, c''_i, \dots$  — концентрации компонента, отвечающие значению коэффициента фильтруемости  $\varphi'_i, \varphi''_i, \dots$  в данных средах). В то же время можно показать (Жариков и др., 1973), что

$$c'_i = c''_i \exp \left( \frac{L_i^{DP} \bar{V}_i}{L_i^D RT} - (P^i - P^s) \exp \frac{L_i^{DE} Z_i F}{L_i^D RT} (\varphi^i - \varphi^s) \right),$$

тогда, сопоставляя, получим

$$\varphi_i = \exp \left( \frac{L_i^{DP} \bar{V}_i P + L_i^{DE} Z_i F \varphi}{L_i^D RT} \right),$$

где  $\bar{V}_i L_i$  — мольный объем и заряд иона,  $D$  — давление,  $\varphi$  — электрокинетический потенциал,  $F$  — число Фарадея,  $L_i^{DP}, L_i^{DE}, L_i^D$  — кинетические коэффициенты.

Экспериментальные и теоретические исследования фильтрационного эффекта открывают новую для геологии область физико-химической геогидродинамики и окажут несомненно существенное влияние на понимание процессов эндогенного минералообразования. Они позволят глубже понять закономерности процессов гидротермального рудоотложения, образования рудной зональности и первичных геохимических ореолов, помогут прогнозированию гидротермальных месторождений минерального сырья.

Развитие экспериментальной петрологии, накопление термохимических данных для минералов и веществ, участвующих в реакциях минералообразования, наряду с развитием методов геотермобарометрии и изучения газовой-жидких включений в минералах позволили в последние годы перейти к количественному анализу состава и некоторых свойств флюида при высокотемпературном минералообразовании. Роль флюида при этом весьма значительна. Флюид не только непосредственно участвует в реакциях с поглощением или выделением его составляющих, но и является главным агентом теплопереноса, а также осуществляет массоперенос нелетучих компонентов при метасоматозе.

Режим летучих компонентов наряду с температурой управляет реакциями типа гидратации, карбонатизации, сульфидизации, окисления и т.п. Знание закономерностей состава флюидов позволяет проводить прогнозирование направлений процессов минералообразования в природе.

В течение нескольких последних лет режим флюидов в карбонатных равновесиях изучался экспериментально в Лаборатории экспериментального метасоматизма. В.А. Жариковым, К.И. Шмуловичем, Н.Н. Перцевым, В.К. Булатовым, Т.Н. Жуковской изучались петрологически важные реакции в системе  $\text{CaO}-\text{MgO}-\text{SiO}_2-\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$  с целью определения температуры, парциальных давлений и концентрации  $\text{CO}_2$  равновесий применительно к скарнам и высокотемпературным карбонатным роговикам. При этом была разработана специальная методика заполнения ампул смесью с заданным отношением  $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ . Такое исследование в системе для высокотемпературных условий ( $> 700^\circ\text{C}$ ) выполнено впервые. Полученные результаты наряду с использованием данных других лабораторий позволили отградуировать по температуре и давлению  $\text{CO}_2$  многие природные парагенезисы.

Тщательное исследование природных парагенезисов метаморфических пород и скарнов, проводившееся в течение многих лет Д.С. Коржинским, Л.И. Шабининым, В.А. Жариковым, Н.Н. Перцевым и др., привело к установлению многих закономерностей развития процессов минералообразования. Приложение данных экспериментальных работ и термодинамических расчетов к анализу природных данных и закономерностей дает возможность оценить количественно условия минералообразования, в частности состав флюидов и его изменение во времени и пространстве.

Оценка производится на базе сопряженных парагенезисов, которые могут характеризовать летучести составных частей флюида, палеотемпературу и общее давление в конкретных объектах. Многие компоненты флюида связаны между собой реакционными соотношениями и это дает возможность рассчитать концентрации главных составляющих флюида. Для ряда характерных скарновых месторождений и проявлений контактового и регионального метаморфизма детальное изучение позволило установить достаточные для таких расчетов наборы парагенезисов.

Ввиду того что вода является главным компонентом флюидов, изучение свойств флюида началось именно с воды, с природных равновесий

гидратации — дегидратации, имеющих огромное значение при метаморфизме бедных кальцием пород.

На смену простейшей модели флюида  $P_{\text{общ}} = P_{\text{фл}} = P_{\text{H}_2\text{O}}$ , изученной экспериментально на многих петрологически важных равновесиях, пришла модель  $P_{\text{общ}} \geq P_{\text{фл}} > P_{\text{H}_2\text{O}}$ , выдвинутая Д.С. Коржинским еще в 30-е годы для объяснения природных закономерностей, не укладывающихся в простейшую модель. Монография А.А. Маракушева "Термодинамика метаморфической гидратации минералов" (1968) явилась методическим развитием этой последней модели. На основе экспериментальных данных для  $P_{\text{общ}} = P_{\text{H}_2\text{O}}$  и термодинамических расчетов А.А. Маракушев объяснил природные закономерности реакций гидратации — дегидратации малой зависимостью парциального давления воды от общего давления на средних и больших глубинах, т.е. уменьшением концентрации воды во флюидах с глубиной. Эта модель позволяет объяснить малую зависимость температуры равновесий гидратации от глубинности, отсутствие или слабость проявления ретроградного метаморфизма в гранулитовых комплексах и другие особенности.

Другой важнейшей составляющей флюидов является  $\text{CO}_2$ . Оценить ее влияние и концентрацию во флюиде можно только в богатых кальцием и (или) магнием породах. Это не значит, что  $\text{CO}_2$  отсутствует во флюидах при метаморфизме метапелитов. Она устанавливается во флюидных включениях в метапелитах и в магматических породах в количествах не меньших, чем в карбонатных породах.

Соотношения карбонатизации — декарбонатизации между парагенезисами позволяют проводить оценку концентрации  $\text{CO}_2$  во флюиде. Оказалось, что концентрация  $\text{CO}_2$  в высокотемпературных флюидах прогрессивного этапа удивительно постоянна и находится в интервале 20—40 мол.%, в общем независимо от глубинности или типа метаморфизируемых пород. Эта концентрация практически не зависит от конкретных реакций минералообразования (Перцев, 1974). Установлено также, что в послемагматических условиях происходит уменьшение концентрации  $\text{CO}_2$  во флюиде с падением температуры. Так, при температуре около  $500^\circ\text{C}$  концентрация  $\text{CO}_2$  измеряется уже только долями мольного процента (Перцев, 1974) (это не исключает присутствия больших количеств  $\text{CO}_2$  в виде комплексов в растворе, равновесном с флюидом).

Анализ природных парагенезисов показывает, что природные флюиды при метаморфизме карбонатных пород практически всегда богаче водой, чем углекислотой (Перцев, 1974). Важную роль играют "балластные" составляющие флюида, не участвующие в реакциях минералообразования, но которые могут влиять на равновесия уменьшением концентрации  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$ . К таким составляющим относятся  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{SO}_2$  и в меньшей степени другие газы. Оценить концентрации  $\text{N}_2$  можно только прямыми методами. По-видимому, она в среднем составляет несколько мольных процентов. Другие же составляющие связаны с реакциями окисления-восстановления, что позволяет рассчитывать состав флюида в модели  $P_{\text{общ}} \geq P_{\text{фл}} = P_{\text{H}_2\text{O}} + P_{\text{CO}_2} + P_{\text{CO}} + P_{\text{H}_2} + P_{\text{CH}_4} +$

+  $P_{O_2}$ . Такие расчеты выполнены для метаморфических комплексов А.А. Маракушевым и Л.Л. Перчуком (1972, 1973), Н.Н. Перцевым (1974). Выяснено, что при метаморфизме карбонатсодержащих толщ суммарное содержание  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$  и других углеводородов при высокой температуре ( $> 700^\circ C$ ) невелико и в максимуме достигает нескольких мольных процентов. В бескарбонатных гранулитовых толщах и эклогитах оно может быть заметно выше.

До последнего времени отсутствовали данные  $P$ - $V$ - $T$  даже для чистой  $CO_2$  в области высоких температур и давлений. Только после удачных экстраполяций Ю.П. Мельника и Л.Л. Перчука свойств  $CO_2$  на большие давления и экспериментальных определений В.М. Шмонова и К.И. Шмуловича стал вообще возможен расчет летучести  $CO_2$  во флюиде из предположения об идеальности смеси  $H_2O$ - $CO_2$ . Точность расчетов состава флюида при глубинном метаморфизме может быть повышена при получении экспериментальных  $P$ - $V$ - $T$  данных для различных составов флюидов хотя бы в системе  $C$ - $O$ - $H$  для больших давлений и температур. В настоящее время такие данные отсутствуют даже для системы  $H_2O$ - $CO_2$ .

Необходима также экспериментальная проверка влияния на летучесть воды и углекислого газа растворенных во флюиде нелетучих компонентов. Возможно, это влияние может быть существенным и учет его станет необходимым при расчетах.

Особенно важным при количественной оценке условий минералообразования является получение достоверных данных о составе и взаимоотношениях парагенезисов. Таким образом, роль детальных геологических и минералого-петрографических исследований месторождений должна значительно возрасти.

## ОБРАЗОВАНИЕ И ОРУДЕНЕНИЕ СКАРНОВ

Изучение скарновых месторождений составляет традиционное направление исследований метасоматизма и метаморфизма, начало которым положено классическими работами Д.С. Коржинского (1945, 1947, 1948, 1953).

На основании глубокого изучения ряда месторождений Д.С. Коржинским была выдвинута контактово-реакционная теория скарнообразования, согласно которой образование скарнов происходит в результате реакционного взаимодействия карбонатных и алюмосиликатных пород при участии магматогенных растворов.

Последующее изучение скарновых месторождений было направлено на дальнейшую разработку теории контактово-реакционного скарнообразования, конкретизацию ее применительно к различным типам скарнов. Известковые скарны исследовались группой сотрудников под руководством В.А. Жарикова.

Были изучены минеральный состав, парагенезисы и зональность скарнов на скарново-полиметаллических (Жариков, 1959) и скарново-шеелитовых месторождениях (Жариков, Власова, 1961), выявлены некоторые

общие закономерности состава парагенезисов и условий образования различных типов скарнов.

В результате изучения скарнов В.А. Жариковым (1968) выполнена обобщающая работа, в которой выделены три главные формации: магнезиальные скарны магматической стадии, магнезиальные скарны послемагматической стадии и известковые скарны и дана характеристика их минерального состава, парагенезисов, рассмотрены строения (зональность), условия и механизм образования скарновых тел. Выделены три типа скарновых руд: семейства одновременных (сингенетических), сопутствующих и наложенных руд, охарактеризованы их соотношения со скарнами, особенности минерального состава и условий локализации. Сравнительная характеристика скарновых и скарново-рудных формаций показала необходимость детального изучения некоторых особых типов скарнов, детального исследования околорудных изменений и условий локализации руд различного состава в скарнах.

Были детально изучены контактово-инфильтрационные скарны месторождения Чорух-Дайрон (Власова, Жариков, 1975). Изучение минерального состава, парагенезисов и закономерностей сосуществующих составов минеральных пар плагиоклаз – скаполит, скаполит – гранат и пироксен – гранат показало, что месторождение образовано в условиях повышенных значений кислотности, щелочнометальности и окислительного потенциала растворов.

Скарновые тела имеют зональное строение и сложены тремя типовыми колонками, образование которых предопределяется особенностями миграции Ca, Si и Al (и состава исходных пород)

I т и п					
Гранодиорит	Пи	Пи	Пи		Гр (Гр)
или монзонит	Орт	Ск	Гр		
	Пл				
II т и п					
Гранодиорит	Пи	Пи	Гр		
или монзонит	Орт	Ск	Ск		Гр (Гр)
	Пл				
III т и п					
Гранодиорит	Кв	Пи	Пи	Пи	Гр (Гр)
	Пи	Орт	Ск	Гр	
	Орт				

Характерной особенностью скарнов, подтверждающей инфильтрационный механизм образования, является постоянство состава минералов в пределах зон и резкое дискретное изменение их состава при переходе от зоны к зоне. Особенно ярко это выражено в составах граната, которые, будучи изучены оптически, рентгенометрически и на рентгеновском микроанализаторе, показали дискретную зональность:

Гр<sub>50-53</sub><sup>1</sup>      Гр<sub>61-64</sub>      Гр<sub>96-100</sub>      (наиболее распространенный тип)

<sup>1</sup> Индекс внизу обозначает процент андрадитового минала.

Примечательно, что такая зональность сохраняется и при замещении одних зерен граната другими.

Экспериментально полученные скорости разрастания диффузионных зон ( $n \cdot 10^{-9} - n \cdot 10^{-10}$  см<sup>2</sup>/сек) позволили В.А. Жарикову и Г.П. Зарайскому определить, что для осуществления инфильтрационной зональности скорость разрастания внутренних зон инфильтрационной колонки должна быть порядка  $n \cdot 10^{-7} - n \cdot 10^{-6}$  или  $n \cdot 10^0 - n \cdot 10^{-1}$  см/год.

Изучение скарново-шеелитовых месторождений (Жариков, Власова, 1972) показало, что шеелитово-сульфидное, шеелитово-молибденитовое, шеелитово-касситеритовое оруденения связаны с наложением на скарны кварцево-полевошпатового метасоматизма. В результате этого наложения скарны претерпевают окolorудные изменения с образованием зональных метасоматитов, в различных зонах которых размещаются одновременно образующиеся руды различного состава. Например, на месторождении Майхура, по пироксен-гранатовым скарнам возникает колонка (обозначены главные минералы):

	1	2	3	4	5
<i>Пл + Гр</i>	<i>Гр + Эн +</i>	<i>Пл + Амф +</i>	<i>Пл + Кв + Бу</i>	<i>Кв + Пл или</i>	<i>Кв</i>
	<i>+ Амф + Бу</i>	<i>+ Бу + Кв</i>		<i>Кв + Бу</i>	

Во внешних зонах (1, 2) размещаются полиминеральные шеелитово-сульфидные руды, иногда с касситеритом, во внутренних зонах — гнезда шеелита с пирротинитом или сфалеритом в существенно кварцевых метасоматитах. В зависимости от состава исходных скарновых пород состав метасоматитов, естественно, претерпевает изменения, точно так же как окolorудные метасоматиты других месторождений (Ингичке, Ленгар, Тырны-Ауз и т.д.) имеют свои специфические особенности состава и парагенезисов (особенно Тырны-Ауз, где метасоматиты заметно более высокотемпературны). Однако для всех месторождений характерны общая одинаковая тенденция изменения скарнов, образование специфических окolorудных парагенезисов с "рудным" гранатом, полевым шпатом, биотитом (флогопитом), кварцем и одновременное с метасоматизмом осаждение рудных минералов вследствие понижения кислотности растворов при взаимодействии их с основной скарновой средой.

Были изучены также особенности строения и состава скарновых зон в железорудных месторождениях Урала, относящихся к известково-скарновой формации (Подлеский, 1975).

Проводились обширные исследования магнезиальных скарнов и их оруденений. В этих исследованиях можно выделить три периода. В первом из них (1958—1960 гг.) произведено изучение минерального состава, строения и условий образования и нахождения магнезиальных скарнов и заключенных в них руд в гнейсовых комплексах докембрия в связи с железуруднением и борной минерализацией на территориях Алданского и Сино-Юрейского щитов. Были выявлены особенности отдельных минералов и их ассоциаций в магнезиальных скарнах магматического этапа и их преобразованных послемагматических разностях, изучена

метасоматическая зональность их, сопряженные со скарнированием доломитов, изменения в гнейсах, а также положение оруденения во времени и в разрезах скарновых тел.

К этому периоду относится открытие Л.И. Шабыниным в железорудных месторождениях Южной Якутии концентраций эндогенных магнезиальных боратов в виде комплексных магнетитовых руд и нового (суанитового) типа промышленных боратовых руд в месторождениях КНР.

Во втором периоде (1960–1970 гг.) исследования распространились на месторождения бора и железа в гиабиссальной фации. Полученные характеристики минерального состава и строения вмещающих оруденение магнезиальных скарнов в различных фациях глубинности, а также условия их нахождения и прослеженные связи с магматизмом позволили ИГЕМ выступить с прогнозом перспектив отдельных районов Советского Союза на эндогенные бораты. Соответствующие рекомендации использованы Министерством геологии и охраны недр СССР с положительными результатами. В частности, были открыты и суанитовые руды, но географическое положение выявленных месторождений задерживает их освоение.

Во втором же периоде углубленному изучению подверглись апомагнезиальные известковые скарны, было установлено, что их минералы существенно отличаются от одноименных скарнов по известнякам своим составом, оптическими свойствами и ассоциациями. Это естественно, поскольку при равных условиях со стороны состава и других особенностей послемагматических растворов подвергающийся замещению породой в одном случае является известняк, а в другом — богатая магнием (обычно также и глиноземом) силикатная порода (магнезиальный скарн). Процессы скарнового и рудного минералообразования происходят в этих породах при различной относительной подвижности компонентов, кислотности-щелочности поровых растворов, активности в них магния, кальция, железа, режима углекислоты, кислорода и других факторов.

Результаты исследований вещественного состава, минеральных парагенезисов эндогенных боратов и закономерностей их изменений в зависимости от физико-химических условий минералообразования приведены в монографии Н.Н. Перцева (1971), а также в книге "Условия нахождения и диагностические признаки борных минералов скарновых месторождений" (Шабынин и др., 1964). В этом же периоде Л.И. Шабыниным было установлено существование промышленного магнетитового оруденения магматического этапа в магнезиальных скарнах месторождений в различных фациях глубинности и дана характеристика этого оруденения.

В третьем периоде (начиная с 1971 г.) исследованиями были охвачены главным образом месторождения цветных и редких металлов. Было установлено, что среди промышленных скарновых месторождений данной группы имеется большое число таких, в которых вмещающие оруденение скарны экзоконтакта образовались путем замещения магнезиальных (т.е. являются апомагнезиальными), причем эти месторождения длительное время ошибочно рассматривались как образовавшиеся в скарнах по известнякам. В таких рудных районах, как Средняя Азия в СССР и

Калифорния в США, шеелитовые месторождения в апомагнезиальных скарнах, по-видимому, преобладают.

Это обстоятельство имеет не только важное научно-теоретическое, но также и практическое значение, поскольку появилась новая возможность выяснения ряда особенностей процесса скарно- и рудообразования и существенного повышения точности прогнозирования и результативности поисков скарновых руд. Реализация этой возможности связана с более точным разграничением геологических условий образования и нахождения месторождений на основе разделения особенностей строения, состава и окolorудных изменений сходных скарнов различных формаций и признаков наличия в них оруденения.

В качестве примеров можно привести следующие.

В гипабиссальных условиях продвижение вверх поднимающейся магмы происходит при различных соотношениях механических усилий и расплавления пород кровли. Соответственно значительная хрупкость доломитов проявляется в различной мере. В условиях, благоприятных для развития микротрещинной тектоники, в присводовой части интрузива, в доломитовых мраморах кроме инфильтрационных магнезиальных скарнов, образующихся в непосредственном контакте интрузива (под воздействием трансмагматических растворов на фронте магматического замещения доломитов), развивается более внешний ореол трещинных (жильных) магнезиальных скарнов. Одновременно в некоторых участках поверхности интрузивного тела на пересечениях более крупных трещин в доломитах создаются благоприятные условия для образования столбобразных тел магнезиальных скарнов.

Практическое значение трещинных магнезиальных скарнов велико, поскольку рудоносные известковые скарны и сопровождающие рудообразование апоскарновые новообразования развиваются только на месте магнезиальных скарнов (с наследованием форм, размеров и пространственного положения их тел). Как разновидность измененных трещинных магнезиальных скарнов выступают ритмически полосчатые скарново-грейзеновые образования с промышленным оруденением Sn, Be, W и др. (тип месторождений юга КНР и Аляски, известный в ряде районов Советского Союза). Скарново-грейзеновые месторождения данного типа не встречаются в скарнах по известнякам.

Обширный материал по скарнам доломитовых контактов и связанному с ними оруденению сведен в трехтомной монографии Л.И. Шабынина (Шабынин, 1973, 1974, 1977).

Необходимость ревизии формационной принадлежности рудоносных известковых скарнов большого числа промышленных месторождений с целью более точного разграничения типоморфных особенностей тех или других скарново-рудных образований и выделение отдельных совокупностей оценочных и поисковых критериев потребовали определенных организационных мероприятий. Главным из них явилась постановка с 1975 г. комплексной темы, выполняемой по единой программе на ряде месторождений различных районов силами коллективов геологических институтов Академии наук и других учреждений под общим руководством Отдела метасоматизма и метаморфизма ИГЕМ.

## ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ, СУЛЬФИДНОСТЬ И МЕТАМОРФИЗМ ВУЛКАНОГЕННЫХ ТОЛЩ

Главными объектами изучения являлись гидротермально измененные вулканы Урала, Камчатки и Курильских островов, в особенности их колчеданные, некоторые колчеданно-серные и другие сульфидные месторождения. Как известно, А.Н. Заварицким (1936) была высказана гипотеза о генетической связи уральских колчеданных месторождений с рудовмещающими вулканогенными толщами и очагами раннего геосинклинального вулканизма. Позднее сотрудниками ИГН АН СССР, затем — ИГЕМ АН СССР при участии других исследователей Урала были установлены следующие дополнительные доказательства этой гипотезы и, в частности, признаки близости геологического возраста колчеданных месторождений и рудовмещающих диабазо-альбитофировых толщ.

На примере северной части Среднего Урала было выявлено не имеющее исключений ограниченное распространение колчеданных месторождений вверх по уточнявшемуся тогда стратиграфическому разрезу, а именно не выше верхней границы диабазо-альбитофировых толщ. В связи с этой закономерностью на примере Среднего Урала установлено существование продуктивного и непродуктивного в отношении колчеданной руды стратиграфических этажей (Логинов, 1958<sub>1</sub>; Иванов, 1958).

При геологическом картировании, в особенности Кабанского и Левихинского рудоносных районов, отмечается приуроченность колчеданных месторождений к местам скопления даек кварцевых и кварцсодержащих альбитофитов, реже диабазов, а также к грубопирокластическим фациям этих вулкаников при явном отсутствии подобной связи с центрами молодого — андезитового и трахиандезит-базальтового вулканизма (Пэк, 1950; Логинов, 1958<sub>1</sub>).

Обнаруженные проявления резкого динамометаморфизма колчеданных руд Кабанского месторождения (с образованием местами гнейсовидно-грануляционных текстур) следует отнести к воздействиям того древнего динамометаморфизма, который предшествовал несогласному отложению полого залегающих флишоидов непродуктивного этажа на рудоносных диабазо-альбитофировых толщах, образующих здесь крутые складки (Логинов, 1950).

В окрестностях пос. Левихи в туфовых агломератах непродуктивного этажа были обнаружены существенно пиритные рудокласты, седиментационно-обломочное происхождение которых было подробно обосновано текстурными критериями (Логинов, 1956).

В отличие от выводов А.В. Пэка (1950) детальными исследованиями на Левихинских месторождениях был установлен отчетливо послерудный характер субвулканических даек авгитовых и плагиоклазовых порфиритов (Логинов, 1960; Логинов и др., 1963; Логинов и др., 1968). Геологический возраст этих даек, судя по их размещению в стратиграфическом разрезе района и их петрографическим особенностям, должен быть древнее андезит-трахитовых толщ (верхний лудлоу — жедин) непродуктивного этажа. Отсюда определяется по крайней мере донижнедевонский возраст Левихинских колчеданных месторождений. При данных исследо-

ваниях были значительно уточнены и дополнены критерии возрастных отношений даек с колчеданными рудами.

В связи с выявлением на примерах Кабанских и Левихинских месторождений Среднего Урала их по крайней мере донижнедевонского возраста в отличие от предверхнедевонского возраста большинства колчеданных месторождений Южного Урала обращает на себя внимание соответственно более раннее завершение продуктивного диабазо-альбитофирового вулканизма на Среднем Урале, чем на восточном склоне Южного Урала (Червяковский, 1972).

Проблема связи колчеданного оруденения с вторичными кварцитами была затронута в связи с обнаружением В.П. Логиновым (1950) в рудовмещающих метасоматитах Южно-Кабанского месторождения высокоглиноземистых (корунд, андалузит, диаспор, пирофиллит) и галоидсодержащих (зуниит, топаз, флюорит) минералов, а также гидротермального хлоритоида<sup>1</sup>. В минералого-петрографическом описании этих метасоматитов (Логинов, 1951) наряду с простейшим приложением правила фаз к трактовке минеральных парагенезисов защищался механизм одновременного разрастания всех зон метасоматической колонки. Такой механизм несколько ранее был теоретически обоснован Д.С. Коржинским (1946) и продемонстрирован им на примере лишь скарновых месторождений (Коржинский, 1945, 1948). В результате парагенетического анализа "алюмосилицитов" Южно-Кабанского месторождения и сопоставления с условиями экспериментального получения ряда минералов В.П. Логиновым (1951) было также установлено проявление в метасоматитах колчеданных месторождений резкого температурного градиента. В связи с этим в данном случае возникла колонка с одинаковым числом минералов в парагенезисах ее различных зон. Несколько позднее во вторичных кварцитах Кушновского колчеданного месторождения (Средний Урал) В.П. Логиновым был обнаружен обильный гипогенный алунит, частично заместившийся серицитом (Логинов и Николаева, 1953). Эта находка, по-видимому, свидетельствует о проявлении на Урале в среднем палеозое местами субазральных условий нахождения вулканогенных толщ в период метасоматических изменений и колчеданного оруденения последних.

Позднее были опубликованы обобщающие статьи об эндогенной зональности в колчеданных месторождениях Урала (Логинов, 1958<sub>2</sub>) и других районов (Логинов, 1974). В этих работах наряду с систематической сводкой проявлений зональности рудоотложения, ореолов геохимического рассеяния и околорудных изменений дается оригинальная трактовка двух крайних структурно-морфологических типов в зависимости от первичного наклона рудолокализирующих структур. Кратко рассматривается также влияние некоторых физико-химических факторов на возникновение того или иного минералогического типа зональности. При этом впервые детально анализируется с точки зрения приложения правила фаз Д.С. Коржинского (1953) наиболее распространенная на колчеданных

<sup>1</sup> Диаспор, пирофиллит и топаз были открыты несколько ранее Н.И. Наквином (1943) в Красногвардейском колчеданном месторождении.

месторождениях колонка метасоматитов. Кроме того, суммируются доказательства несколько более позднего развития колчеданного оруденения, чем рудовмещающих метасоматитов. Среди этих критериев приводятся такие оригинальные факты, как различное возрастное отношение тех и других процессов к интерминерализационным дайкам (Логинов, 1958<sub>1</sub>) и развитие местами пиритных "колец Лизеганга" (Логинов, Пирожок, Русинов, 1971). В этих статьях о зональности колчеданных месторождений характеризуются единичные примеры и метаморфогенной зональности в колчеданных телах около послерудных даек, а также систематизируются критерии практического использования эндогенной зональности при поисках и разведке колчеданных месторождений.

Вопросы метаморфизма колчеданных месторождений были затронуты в связи с выявлением широкого развития пренито-пумпеллиитовой фации как на Южном Урале (Нечеухин, 1963), так и на Среднем Урале (Логинов, 1966). В отличие от представлений ряда уральских геологов, рассматривавших эти зеленокаменные изменения как проявления пропилитизации, в статье В.П. Логинова (1969) характеризуется их регионально-метаморфическое происхождение с рассмотрением минеральных ассоциаций и региональной зональности субфаций пренито-пумпеллиитовой и зеленосланцевой фаций. Кроме того, в статье А.В. Зотова, В.П. Логинова, Г.Н. Пшеничного (1969) доказываемается, что изменения пренит-пумпеллиитовой фации в отличие от проявлений пропилитизации не предшествовали колчеданному оруденению, а наложились на послерудные дайки Учалинского и Сибайского месторождений. Это обстоятельство в связи с установлением В.М. Нечеухиным (1963) предверхнедевонского возраста зеленокаменного метаморфизма на Южном Урале характеризует и верхнюю возрастную границу здесь колчеданного оруденения. Кроме того, уточнение распространения пренито-пумпеллиитовой и зеленосланцевой фаций регионального метаморфизма на Среднем Урале позволяет конкретизировать условия метаморфизма на ряде месторождений. Независимо от этих выводов температура динамометаморфизма борнит-пиритовых руд Южно-Кабанского месторождения, как превышавшая 350°C, была охарактеризована В.П. Логиновым (1960) на основании отчетливого проявления в этих рудах экспериментально изученной метаморфической реакции между пиритом и борнитом с образованием халькопирита и его сростаний с борнитом типа структур распада. Для Маукского месторождения В.П. Логиновым, И.П. Лапутиной, Л.П. Носиком (1974) были определены температура метаморфизма колчеданных руд как близкая к 600°C (на основании разности  $\delta^{34}\text{S}$  пирита —  $\delta^{34}\text{S}$  пирротина) и давление на твердые фазы как 5–6 кбар (на основании сфалеритового геобарометра Скотта).

Среди представителей колчеданного семейства в кайнозойских толщах были исследованы серно-сульфидное месторождение на вулкане Менделеева (о. Кунашир) и месторождения типа Куроко Мапумине и Учинотай (о. Хонсю, Япония). Серно-сульфидная залежь на вулкане Менделеева (Логинов, Русинов, 1968) с продолжающейся на ней сольфатарной деятельностью оказалась связанной с субэвральным вулканизмом плейсто-

ценового возраста. Затем (Логинов, 1969<sub>2</sub>, 1975) были рассмотрены признаки сходства и различия этого и других, недавно изученных в Японии серно-сульфидных месторождений (типа Мацуо, Абута, Хоробецу) с типично колчеданными месторождениями. Эти юные месторождения, локализовавшиеся в субаэральных вулканитах (на местах пересечения сольфатарных струй с горизонтами подземных вод атмосферного происхождения), рассматриваются как своеобразная рудная формация, переходная от колчеданного семейства к семейству вулканогенной серы. Эти новейшие серно-сульфидные залежи приобретают существенное значение для познания некоторых деталей генезиса колчеданных руд. Серно-сульфидные месторождения также вносят вклад в геологическую классификацию колчеданных месторождений, позволяя различать метасоматические месторождения, возникавшие в субаэральных толщах, от месторождений, возникших в субмаринных толщах.

Исследованные А.В. Зотовым и В.Л. Русиновым месторождения типа Куроко Мацумине (рудник Ханаока) и Учинотай (рудник Косака) расположены в толще зеленых туфов среднемиоценового возраста, в пределах крупной брахисинклинальной структуры Хокуроку Бэсин, к которой приурочены и другие месторождения этого типа. Образцы из этих месторождений подверглись всестороннему изучению и в результате было установлено: 1) К-Аг возраст серицита из околорудных пород (11–13 млн. лет) значительно меньше возраста слюд из глинистых сланцев кровли (24 млн. лет). Разброс значений возраста слюд для каждого месторождения не превышает ошибку метода (меньше 1 млн. лет), что указывает на сравнительно короткий интервал времени отложения слюд как висячем, так и в лежащем боках рудного тела (Аракелянц и др., 1973); 2) установлено симметричное расположение модификаций серицита относительно рудных тел: в руде распространена смесь  $2M_2 + 2M_1$ , вблизи от рудного тела — преимущественно  $2M_1$ , а на удалении — смесь  $1M + 2M_1$ , что свидетельствует о влиянии рудоотложения на структуру околорудных серицитов; 3) выявлено развитие смешанослойного образования типа слюда — монтмориллонит в зональности выщелачивания пород лежащего бока. Серицит характеризуется нерегулярным чередованием пакетов с тенденцией к упорядочению при 10 и 50% разбухающих пакетов (Зотов, Русинов, 1975).

Пропилитизированные породы, вмещающие колчеданные и некоторые эпитермальные жильные месторождения, являются наиболее распространенными продуктами гидротермальной деятельности в вулканических толщах. В результате исследования пропилитов Центральной Камчатки В.Л. Русиновым (1972) был выявлен ряд их петрографических и геологических особенностей.

1. В приповерхностных пропилитах широкое распространение имеет оптически положительный альбит с неупорядоченной структурой (Русинов, 1965). Он слабо сдвойникован, причем степень сдвойникованности его возрастает с глубиной.

2. Существует определенная последовательность в замещении магматических минералов исходных пород новообразованиями, определяемая величинами энергий активации соответствующих реакций и от-

личающаяся от таковой при региональном метаморфизме. При пропилитизации она имеет вид (от легко замещаемых к стойким): оливин — гиперстен — моноклинный пироксен — плагиоклаз — ортоклаз. При региональном метаморфизме пироксен и плагиоклаз меняются местами.

3. Распространение эпидота ограничено глубиной порядка 500 м. Выше он практически не образуется, за исключением отдельных кристалликов длиннопризматического габитуса, возникших, вероятно, в участках локального повышения давления (Русинов, 1965<sub>2</sub>, 1972). На глубине 500—1000 м возникают эпидоты только наибольшей железистости (33—40%).

4. Между пропилитизацией и рудоотложением в ряде случаев отмечается тесная связь (Русинов, 1968). Особенно отчетливо она проявлена в пропилитах с рассеянной золотой минерализацией "сопряженного" типа, например в Апсаканской зоне Станового хребта (Григорьев, Коган, Русинов, 1970).

Выяснение взаимоотношений пропилитизации и регионального метаморфизма затруднено сходством минерального состава продуктов этих процессов. Характеристике ряда общих критериев их различия было посвящено несколько работ (Русинов, 1972; Логинов, Русинов, 1974). К таким критериям относятся: различия в площадях распространения, в температурных диапазонах наблюдаемой зональности, в отношениях к региональной сланцеватости и к колчеданному оруденению, а также в минералогических признаках неодинаковой глубинности тех и других процессов, в различном режиме щелочей и т.д.

Для выяснения физико-химических условий формирования некоторых минералов, широко развитых в приповерхностной обстановке в вулканогенных толщах, изучались современные процессы минералообразования. Такие процессы исследовались А.В. Зотовым на сольфатарных полях и в зонах разгрузки гидротермальных систем (о. Кунашир, кальдера Узон на Камчатке). В результате удалось рассчитать некоторые термодинамические свойства минералов (Зотов, 1967; Зотов, Миронова, Русинов, 1973) и выявить ряд физико-химических особенностей этих процессов: 1) с повышением температуры при постоянстве состава раствора алунит становится более калиевым (Зотов, 1971); 2) по сравнению с алунитом ярозит формируется в более окислительной обстановке (Зотов, 1970); 3) в образовании среди глинистых минералов каолинита либо монтмориллонита решающим фактором является кислотность растворов (Волченкова и др., 1971); 4) на сольфатарных полях широко развиты смешанослойные образования каолинит-монтмориллонитового типа (Градусов, Зотов, Русинов, 1975).

Для познания условий переноса и отложения рудных компонентов исследовались ионные равновесия в современных гидротермах кальдеры Узон. Эта работа производилась совместно с сотрудниками Лаборатории гидротермальных растворов ИЭМ АН СССР. Детальные полевые аналитические и потенциометрические исследования с применением методов диализа и электродиализа позволили установить: 1) коллоидная форма переноса не имеет существенного значения, все

анализированные компоненты находились в истинном растворе; 2) перенос As и Sb осуществляется не в виде сульфидных или гидросульфидных соединений, а в форме гидросокомплексов (Алехин, Зотов, Колпакова, 1973). Из этого следует, что благоприятным фактором для осаждения рудных компонентов является увеличение общего содержания сероводорода.

#### ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТАСОМАТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЩЕЛОЧНО-УЛЬТРАОСНОВНЫХ МАССИВАХ И КАРБОНАТИТАХ

К изучению этих комплексов отдел метасоматизма ИГЕМ приступил сравнительно недавно.

Метод парагенетического анализа систематически распространен на метасоматиты щелочно-ультраосновных комплексов (с которыми связаны крупнейшие месторождения Nb, Ta, Fe, Ti, флогопита и др.). В массивах Ковдор и Гули выделены и рассмотрены типы инфильтрационных метасоматических колонок, образующихся при внедрении в оливиниты ийолитов и турьяитов и при карбонатизации ранее образованных силикатных пород. Установлено, что смена парагенезисов метасоматитов магматической стадии обусловлена изменением химических потенциалов  $\text{Na}_2\text{O}$  и  $\text{CaO}$ . При постмагматическом метасоматозе смена парагенетических ассоциаций происходит в зависимости от роста химического потенциала  $\text{CaO}$  (при образовании автореакционных скарнов) либо  $\text{MgO}$  (при образовании магнезиальных метасоматитов) (Расс, 1971).

Для выяснения кислотно-основных условий минералообразования метасоматитов проведен анализ распределения р.з.э. в равновесных сосуществующих минеральных фазах. Установлено, что распределение р.з.э. между сосуществующими минералами контролируется кристаллохимическими особенностями минералов: магнезиально-железистые (оливин, флогопит, магнетит) практически не содержат р.з.э. В ряду Na и Ca-содержащих минералов: меланит → пироксен → апатит ≈ нефелин → мелилит → кальцит возрастает относительная концентрация более основных р.з.э. При повышении содержания эгриновой составляющей в пироксене р.з.э. характеризуются более кислотным составом. Для режима кислотности метасоматических слабощелочных растворов как магматической стадии, так и постмагматических характерна максимальная кислотность в средних зонах метасоматических колонок (Расс, 1971).

Установлено, что в пироксенах, нефелинах, апатитах нефелинсодержащих магматических пород, являющихся поздними дифференциатами, относительная концентрация основных р.з.э. возрастает. В метасоматических породах аналогичного состава наблюдаются те же тенденции, но в области более кислотных составов р.з.э. В отличие от силикатных пород в существенно карбонатных породах отмечаются противоположные соотношения кислотности состава р.з.э. между породами предположительно магматического и метасоматического генезиса. Таким образом, состав р.з.э. в породообразующих минералах

является геохимическим индикатором генезиса нефелинсодержащих и карбонатных пород в щелочно-ультраосновных массивах (Расс, 1975). Возрастание щелочных характеристик составов р.з.э. в минералах происходит параллельно с уменьшением "абсолютной основности" пород и увеличением их "относительной щелочности", определенных по методу А.А. Маракушева.

В последнее время в связи с внедрением ядерных методов исследования возможности парагенетического анализа значительно расширились: исследуются микрораспределения породообразующих элементов в породообразующих минералах и анализируются смещения равновесий в последовательных зонах метасоматических колонок.

Выявлены новые генетические критерии для пород сходного состава (Расс и др., 1974). Установлено, что параллельное изменение отношений  $Mg/(Mg + Fe)$  и  $Ti/(Mg + Fe + Ti)$  от центра к периферии кристаллов моноклинного пироксена и флогопита из магматических и метасоматических пород сходного состава резко различны: в минералах магматических пород первая величина резко падает, а вторая незначительно возрастает в соответствии с экспериментальными диаграммами плавления, в то время как в метасоматических породах изменения этих отношений противоположны или незакономерны. Таким образом, исследование закономерностей микрораспределения компонентов позволило подтвердить немагматический генезис некоторых уртитов, меланитовых нефелин-пироксеновых пород. Этим методом были исследованы некоторые карбонатиты Ковдорского и Гулинского массивов и показан в одних случаях магматический, в других — метасоматический их генезис.

Анализ выявленных закономерностей микрораспределения компонентов в породообразующих минералах позволил определить некоторые параметры метасоматических процессов: по пироксен-флогопитовому термометру Л.Л. Перчука удалось оценить температуры образования исследованных метасоматитов и некоторых магматических пород. Изменение температуры в процессе образования гулинских метасоматических карбонатитов носит прогрессивный характер, на основании чего можно предположить наличие метасоматизма магматической стадии при внедрении карбонатитовой магмы.

Предложенным методом выявлены также четкие закономерности изменения отношений  $2Al/2Al + Mg$  и  $2Na/Ca + 2Na$  мелилитов магматических пород — эти отношения при магматической кристаллизации возрастают; изменения указанных отношений в мелилитах из метасоматических пород иные и зависят также от парагенезиса мелилита.

Исследуются изменения индикаторных отношений в одинаковых минералах из последовательных зон метасоматической колонки, а также из начала и конца одной метасоматической зоны, что позволяет определить характер процесса — инфильтрационный или диффузионный, а также количественно охарактеризовать смещение составов сосуществующих минералов в последовательных зонах метасоматической колонки.

Большинство массивов с карбонатитами (Арбарастах, Ковдор, Гулинский и др.) сложено ультраосновными и щелочными (нефелиновые сиениты и ийолит-уртиты) магматическими и разнообразными метасоматическими породами. Среди последних можно выделить алюмосиликатные метасоматиты (пироксен-флогопитовые, пироксен-нефелиновые, пироксен-полевошпатовые, мелилитовые и другие породы) и апатило-карбонатные (апатит-магнезитовые породы и карбонатиты).

Удалось установить (Глаголев, 1970), что алюмосиликатные метасоматиты развиваются за счет магматических ультраосновных пород и частично за счет вмещающих массивы разнообразных пород на фронте магматического замещения их щелочными магмами. Разнообразие видов алюмосиликатных метасоматитов объясняется разным соотношением  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в замещаемых породах и разными химическими потенциалами  $\text{Na}_2\text{O}$  и  $\text{MgO}$  в метасоматизирующих растворах. Этим же предопределяется род магматических щелочных пород (нефелиновые сиениты или ийолит-уртиты). Метасоматические процессы постмагматической стадии приводили к дальнейшим изменениям алюмосиликатных метасоматитов.

Постмагматические процессы проявились в образовании апатитовых пород и карбонатитов. Процесс апатитизации, связанный с карбонатитообразованием, предшествовал главным типам карбонатитов (Глаголев, 1962, 1974). На фронте апатитизации пироксено-флогопитовые метасоматиты претерпевали перекристаллизацию с изменением химического состава минералов в сторону магнезиальности и превращались во флогопитовые руды (Ковдорское и другие месторождения). Процессы карбонатизации были самыми поздними и накладывались как на апатитовые и алюмосиликатные метасоматиты, так и на магматические породы.

## ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА И ФАЦИЙ МЕТАМОРФИЗМА

Изучение петрографии железистых кварцитов КМА позволило различать особенности их минерального состава, связанные с первичной осадочной фаціальностью, с одной стороны, и метаморфизмом — с другой. В метаморфизме пород железистой формации установлены прогрессивный и регрессивный этапы.

Прогрессивный метаморфизм железистых кварцитов КМА разделен на пять температурных фаций со следующими реакциями переходов между ними (Глаголев, 1966) (от низко- к высокотемпературным).

1. Сидерит-талъковая: сидерит + кварц → грюнерит — куммингтонит
2. Куммингтонит-талъковая: талък + кварц + анкерит → актинолит или анкерит + кварц → актинолит + кальцит.
3. Куммингтонит-актинолитовая: куммингтонит + анкерит + биотит → роговая обманка или актинолит + биотит → роговая обманка.
4. Роговообманковая: кальцит + актинолит + кварц → диопсид — генденбергит.
5. Диопсидовая.

Выделенные температурные фации расположены внутри зеленосланцевой и амфиболитовой метаморфических фаций Тернера и Ферхугена.

Наиболее интересным процессом регрессивного этапа метаморфизма является щелочной метасоматоз железистой формации. Установлено, что в силу слабой интенсивности этого процесса ассоциации минералов образуются почти без участия рудного железа (входящего в магнетит и гематит) (Глаголев, 1966). В связи в этом наиболее железистые парагенезисы (например, эгирин с рибекитом) образуются в железистых кварцитах, содержащих минералы с большим количеством силикатного и карбонатного железа, а наиболее магнезиальные — в породах, где все железо входило в состав рудных минералов.

Выделены три температурные фации щелочного метасоматоза (Глаголев, 1966) (в порядке понижения температуры процесса).

1. Эгириновая высокотемпературная (эгирин с примесью диопсида + кальциевый родузит).

2. Эгириновая низкотемпературная (чистый эгирин + щелочной амфибол ряда рибекит—родузит).

3. Рибекитовая (рибекит; эгирин отсутствует).

Установлено также, что небольшие проявления гипогенных железных руд связаны с процессом щелочного метасоматоза. В участках интенсивной циркуляции щелочные растворы выносили кремнезем и почти не растворяли рудные минералы. Сопровождавшая этот процесс метасоматическая контракция (вычисленное уменьшение объема ~50%) приводила к образованию богатых железных руд за счет бывших в железистых кварцитах магнетита и гематита (Глаголев, 1966).

Влияние температуры и глубинности на процессы метаморфизма и сопряженные процессы гранитизации и мигматизации изучались на примере раннепротерозойского и архейского комплексов Восточной Сибири (Становая зона, юг Алданского щита, Кодаро-Удоканский и Патомский прогибы).

На первом этапе (1961—1968 гг.) были исследованы неизменные и повторно перекристаллизованные образования архея в Становой зоне, прогрессивно метаморфизованные нижнепротерозойские породы Становика, Кодара и Удокана и синхронные с метаморфизмом гранитоиды (Кориковский, 1967). Было выявлено, что превращение архейских гранулитов в породы главным образом амфиболитовой фации является не метаморфизмом, а мигматизацией, связанной с региональным воздействием трансмагматических флюидов низкой щелочности, с огромным привнесом воды и щелочей. Исследовано влияние температуры и режима щелочности на состав главнейших минералов станового комплекса и проведено сравнение с архейскими мигматитами, для которых характерны иная щелочность и иные составы минералов. Изучение раннепротерозойских гранитоидов в пределах полосы более 1000 км (от восточного Становика до Патомского нагорья) показало полную независимость их состава от состава вмещающих толщ, как еще в 30-е годы указывалось Д.С. Коржинским. Находятся ли их массивы в бедных или богатых СаО породах, в архее или протерозое, повсюду

они представлены биотитовыми плагио- или плагиомикроклиновыми гранитами без малейших признаков гибридности. С ними, нередко в площадном развитии, связаны разнообразные средне- и низкотемпературные постмагматические процессы, чаще всего кислотного характера: мусковитизация, альбитизация, фибролитизация, дистенизация, окварцевание, поля мусковитовых пегматитов и т.д. Детальное изучение этих метасоматитов и сопоставление с другими регионами позволило впервые выделить ряд фаций кислотного выщелачивания в гранито-гнейсовых комплексах. Удивительная стабильность состава раннепротерозойских гранитоидов и их метасоматитов в такой широкой полосе подтверждает глубинный характер трансмагматических флюидов, специфический для каждой возрастной эпохи.

Помимо изучения обычных гранулитов архея Алданского щита и Становой зоны, расчленения их по глубинности и температурным ступеням недавно было впервые дано детальное описание минералогии и равновесий в породах ультраглубинной гиперстен-силлиманитовой фации (сутамский комплекс). Исследования многочисленных видов реакционных, в том числе келифитовых кайм в высокотемпературных кристаллосланцах как архея, так и нижнего протерозоя позволили выявить петрологические критерии смены  $P-T$  условий, направленность природных реакций смещенного равновесия и доказать, что главной причиной образования таких структур является повышение температуры в ходе метаморфизма, а не изменение давления.

Изучение зонального метаморфизма в пределах Кодаро-Удоканского прогиба позволило разработать схему температурных субфаций для андалузит-силлиманитового типа давления (Кориковский, 1969). Были закартированы несколько конкретных ореолов различной глубинности, выделены изограды, изучены составы гранитов, биотитов, ставролитов, кордиеритов и хлоритов и составлены полные диаграммы фазовых равновесий для каждой зоны. Впервые в литературе дано описание наименее глубинного ставролит-андалузит-силлиманитового типа зональности, в котором температурное поле ставролитовой фации чрезвычайно узко и возникает гипабиссальный парагенезис андалузит + микроклин. Сопоставление с другими регионами дало возможность подразделить андалузит-силлиманитовые метаморфические комплексы (давление 1–3,5 кбар) на три фации глубинности (изобарические типы зональности), обосновать петрологические критерии для их различия и показать влияние давления на составы всех главных минералов метапелитов в андалузит-силлиманитовых комплексах.

Начиная с 1969 г. главным объектом исследований становится кианит-силлиманитовый метаморфический комплекс Патомского нагорья, для которого составлена детальная карта метаморфизма и изучены полные фазовые равновесия в интервале от самых низких ступеней зеленосланцевой до верхов ставролитовой фации. На патомском материале обосновано новое подразделение кианит-силлиманитовых комплексов на температурные субфации. Введено понятие об "истинной изограде" (наиболее низкотемпературной реакции образования минерала), изучены составы хлоритоидов, гранатов и ставро-

литов на их истинных изоградах и тенденции изменения по мере роста температуры в различных парагенезисах. Впервые представлены равновесия в хлоритоид-пирофиллитовой, хлоритоид-кианитовой и ставролит-хлоритоидной субфациях; изучены парагенезисы стильпномелана, хлорита с гранатом и куммингтонитом, хлоритоида со ставролитом и хлоритом и т.д. Наряду с метаморфическими породами изучены раннепротерозойские гранитоиды Патомского нагорья, показано их петрологическое единство с гранитами Становика, Кодара и Удокана, исследованы своеобразные проявления щелочного метасоматоза в "холодных" контактах гранитов с метапелитами (Жориковский и др., 1974).

На основании обобщения собственных исследований и литературных данных создана новая схема метаморфических фаций на основе парагенезисов бедных СаО пород (Жориковский, 1973). Схема, построенная в Р-Т координатах, отражает температурный интервал от зеленосланцевой до наивысших ступеней гранулитовой фации и давления от 1 до 11 кбар. На ней выделено несколько температурных фаций: зеленосланцевая, ставролитовая, биотито-мусковитовая (с силлиманитом, кианитом или андалузитом), биотит-силлиманит-ортотлазовая, гранат-кордиерит-ортотлазовая и гиперстен-силлиманитовая (последняя для давлений выше 7,5 кбар). Границами фаций и субфаций являются моновариантные равновесия, наблюдающиеся в природе и картируемые обычно в виде границ метаморфических зон или подзон. На основании сравнения зональных ореолов различной глубинности и расчетов прослежено огромное влияние давления на ширину температурных полей отдельных субфаций, ряд которых полностью выклинивается с изменением глубинности. Для всех моновариантных равновесий показаны конкретные составы фаз для каждого сочетания Р-Т условий.

На обширном химико-аналитическом материале выявлены парагенетические особенности гранатов, биотитов, мусковит-фенгитов, кордиеритов, ставролитов, хлоритоидов и хлоритов во всех выделенных субфациях. Например, показано, что неуклонное повышение предельной магнезиальности граната с ростом температуры внутри гранат-кордиерит-ортотлазовой фации сменяется обратной тенденцией — разложением магнезиальных гранатов на кордиерит + гиперстен + шпинель. Для биотита С.П. Жориковским рассмотрены особенности его состава у изограды биотита и его парагенезисы внутри биотитовой зоны метаморфизма и у высокотемпературного предела его стабильности, на высоких ступенях гранулитовой фации. Выяснены закономерности изменения железистости и парагенезисов хлоритов, хлоритоидов, ставролитов и кордиеритов и натровости и фенгитовости мусковитовых слюд в зависимости от температуры и давления.

И.А. Зотовым проведена работа по комплексному изучению явлений метаморфизма и метасоматоза в пределах супракрустального комплекса Юго-Западного Памира. На основе широкого использования методов палеотермо-барометрии установлено, что в кульминационный период метаморфизма достигались температуры 650–700°C, давления 6,5–7,0 кбар, а давление воды ( $P_{H_2O}$ ) не превышало 3,0–3,5 кбар

(Зотов, 1972). Развитые в районе уникальные кордиеритсодержащие магнезиальные скарны на контакте алумосиликатных гнейсов и магнезитовых мраморов содержат реликты метаморфического кианита.

Изучение эволюции мигматитовых комплексов показало, что они длительно и разнообразно эволюционируют на регрессивном этапе. Установлено, что регрессивные преобразования метаморфических комплексов часто приобретают региональный характер, в соответствии с чем они названы "региональным диафторезом". Диафторез может завершаться в пределах фаций прогрессивного метаморфизма, осуществляясь в малоприметной "неявной" форме, либо протекать вплоть до температур зеленосланцевой фации, т.е. сопровождаясь сменой минеральных парагенезисов. Региональный диафторез возможен лишь при условии обширной деформации комплексов и просачивания по ним растворов ювенильного происхождения. В этих условиях широко проявляются пластические деформации пород прогрессивного этапа, изменения их текстуры и структуры. Региональный диафторез в некоторых комплексах затушевывает черты прогрессивного этапа, искажает первоначальные взаимоотношения пород, наделяет их новыми физико-химическими особенностями, которые часто неправильно интерпретируются как первичные (Зотов, 1975).

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время основной задачей изучения процессов метаморфизма и метасоматизма является количественное определение их параметров, т.е. температуры, давления, состава и парциального давления компонентов флюида. Для этого необходимы анализ природных парагенезисов минералов в сочетании с экспериментальными исследованиями минеральных равновесий, термодинамические расчеты, исследование флюидных включений в минералах.

Эти исследования необходимы для решения сложнейшей проблемы участия в метаморфических и метасоматических процессах флюидов различного происхождения, а также проблемы источников рудных компонентов, переносимых этими флюидами. Исследование явлений гранитизации с несомненностью доказывает существование восходящих трансмагматических потоков флюидов подкорового происхождения. С другой стороны, при постмагматических процессах в субвулканических формациях, например при образовании вторичных (гидротермальных) кварцитов, несомненно участие вод метеорного происхождения. При метаморфизме осадочных толщ могут принимать участие метаморфогенные воды, выделяющиеся при реакциях дегидратации, а иногда приобретают большое значение захороненные рассолы осадочного происхождения. Для выяснения степени участия флюидов различного происхождения в различных процессах необходимы также исследования изотопного состава минералов, другие тонкие геохимические исследования, а также изучение геологических условий этих процессов.

Интересна проблема постмагматических процессов в гипербазитах. Многие авторы отрицают эти процессы и связывают серпентинизацию гипербазитов и образование в них родингитов только с воздействием более молодых магматических процессов или с водами вмещающих пород. Между тем регулярность проявления родингитов и серпентинизации свидетельствует о наличии в гипербазитовых формациях также и автометасоматических процессов.

Новой проблемой является проблема метамагматических процессов, т.е. процессов взаимодействия магмы с трансмагматическими флюидами. Хотя это собственно магматические процессы, но они отчасти сходны с метасоматическими. Наиболее достоверным примером метамагматических пород являются аплиты и пегматиты, которые, по-видимому, возникли в результате дебазификации гранитной магмы под воздействием потока трансмагматических флюидов. Не исключено, что при формировании гранитоидных формаций метамагматические процессы имеют большое значение. Но здесь еще много неясного ввиду отсутствия простых критериев отличия метамагматических образований от автометасоматических и от магматических дифференциатов.

Интересные новые возможности дает применение рентгеновского микроанализатора (микрозонда). Так, например, изучение этим методом микронеодности зерен метаморфических пород дает возможность раскрыть последовательные стадии метаморфического процесса. Разумеется, что и другие затронутые в обзоре работ отдела проблемы требуют дальнейшего изучения и развития.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Алехин Ю.В., Зотов А.В., Колпакова Н.Н.* Ионные равновесия в современной гидротермальной системе кальдеры Узон на Камчатке. — Доклады I Международного геохимического конгресса. Гидротермальные процессы, т. II. М., 1973.
- Аракелянц М.М., Зотов А.В., Русинов В.Л.* Абсолютный возраст околорудных изменений и рудоотложения в колчеданных месторождениях Учинотай и Ханаока (Япония). — Докл. АН СССР, 1973, № 4, 209.
- Волченкова В.А., Зотов А.В., Ключков Л.Ф., Франк-Камеицкий В.А.* Глинистые минералы в осадках термальных вод на о. Кунашир. — Записки Всес. мин. об-ва, 1971, ч. 100, вып. 6.
- Власова Д.К., Жариков В.А.* Контактво-инфильтрационные скарны Чорух-Дайрона. — В кн. "Метасоматиты и оруденение". Наука, 1975.
- Глаголев А.А.* Пример метасоматической зональности вокруг апатито-магнетитовых пород и карбонатитов. — Докл. АН СССР, 1962, 147, № 3.
- Глаголев А.А.* Метаморфизм докембрийских пород КМА. "Наука", 1966.
- Глаголев А.А.* Алюмосиликатные метасоматиты массива Арбарастах (Алдан) и других щелочно-ультраосновных минералов. — В кн. "Проблемы метасоматизма". "Недра", 1970.
- Глаголев А.А., Корчагин А.М., Харченко А.Г.* Арбарастах и Инагли-щелочно-ультраосновные массивы Алдана. "Наука", 1974.
- Градусов Б.П., Зотов А.В., Русинов В.Л.* Условия образования каолинита и монтмориллонита на современных сольфатарных полях. — Докл. АН СССР, 1975, 222, № 5.
- Григорьев Л.С., Коген В.С., Русинов В.Л.* Золотоносные пропилиты Центральной части Станового хребта. — Изв. АН СССР, серия геол., 1970, № 1.

- Жариков В.А.* Геология и метасоматические явления скарново-полиметаллических месторождений Западного Карамазара. — Труды ИГЕМ АН СССР, 1959, вып. 14.
- Жариков В.А.* О возможной геохимической роли электрокинетических явлений. — В кн. "Проблемы геохимии". "Наука", 1965.
- Жариков В.А.* Кислотно-основные характеристики минералов. — Геол. рудн. месторожд., 1967, № 5.
- Жариков В.А.* Скарновые месторождения. — В кн. "Генезис эндогенных месторождений". "Недра", 1968.
- Жариков В.А., Алехин Ю.В.* Опыты по фильтрации растворов через срезы горных пород. — Докл. АН СССР, 1971, 198, № 2.
- Жариков В.А., Алехин Ю.В.* Экспериментальное исследование фильтрационного эффекта. Сообщение IV. — В сб. "Экспер. исслед. минералообразования". "Наука", 1972.
- Жариков В.А., Власова Д.К.* Контактные роговики и скарны месторождения Майхура. — В сб. "Физ.-хим. проблемы петрологии и рудообразования". Изд-во АН СССР, 1961.
- Жариков В.А., Власова Д.К.* Околорудные изменения и оруденение в скарнах Майхуры. — В сб. "Минеральные месторождения". Докл. сов. геологов на XXIV сессии МГК. "Наука", 1972.
- Жариков В.А., Дюжикова Т.Н., Максакова Э.М.* О различной скорости и фильтрации анионов и катионов при просачивании растворов через тонкопористые фильтраты. — Докл. АН СССР, 1961, 141, вып. 1.
- Заварицкий А.Н.* Колчеданное месторождение Блява на Южном Урале и колчеданные залежи Урала вообще. — Труды Института геол. наук АН СССР, 1936, т. V.
- Зотов А.В.* Современное образование алуниды в кратерном озере Кипящее (вулкан Головинна, о. Кунашир). — Докл. АН СССР, 1967, 174, № 3.
- Зотов А.В.* Ярозит в осадках термальных вод о. Кунашир. — В сб. "Минералогия гидротермальных систем Камчатки и Курильских островов". "Наука", 1970.
- Зотов А.В.* Зависимость состава алуниды от температуры его образования. — Геохимия, 1971, № 1.
- Зотов А.В., Логинов В.П., Пшеничный Г.Н.* Отношение пренито-пумпеллиитовой фации регионального метаморфизма к колчеданному оруденению на Южном Урале. — Докл. АН СССР, 1969, 187, № 1.
- Зотов А.В., Русинов В.Л.* Зональность и парагенезисы в околорудных породах на двух месторождениях типа Куроко в Японии. — В кн. "Метасоматиты и оруденение". "Наука", 1975.
- Зотов А.В., Миронова Г.Д., Русинов В.Л.* Определение pH ярозита, синтезированного из природного раствора. — Геохимия, 1973, № 5.
- Зотов И.А.* Давление воды (H<sub>2</sub>O) при метаморфизме пород кристаллического комплекса Юго-Западного Памира. — Изв. АН СССР, серия геол., 1972, № 7.
- Зотов И.А.* Региональный диафорез в метаморфических комплексах. — В кн. "Метасоматиты и оруденение". "Наука", 1975.
- Зотов И.А.* Некоторые особенности взаимодействия траптовых магм Талнахских интрузий (Норильский район) с вмещающими породами. — В кн. "Очерки геологической петрологии". "Наука", 1976.
- Иванов С.Н.* Главнейшие итоги изучения геологии медноколчеданных месторождений Урала за последние 10–15 лет. — Материалы по геологии и полезным ископаемым Урала. Свердловск, 1958, вып. 5.
- Коржинский Д.С.* Подвижность и инертность компонентов при метасоматозе. — Изв. АН СССР, серия геол., 1936, № 1.
- Коржинский Д.С.* Образование контактовых месторождений. — Изв. АН СССР, серия геол., 1945, № 3.
- Коржинский Д.С.* Метасоматическая зональность при околотрещинном метаморфизме. — Записки Всес. мин. об-ва, 1946, ч. 75, № 4.
- Коржинский Д.С.* Фильтрационный эффект и его значение в геологии. — Изв. АН СССР, серия геол., 1947, № 2.

- Коржинский Д.С.* Биметасоматические флогопитовые и лазуритовые месторождения архея Прибайкалья. — Труды ИГН АН СССР, 1947<sub>2</sub>, вып. 29.
- Коржинский Д.С.* Петрология Турьинских скарновых месторождений меди. — Труды ИГН АН СССР, 1948, вып. 68.
- Коржинский Д.С.* Термодинамические потенциалы открытых систем и пример их применения в геохимии. — Изв. Сектора физико-химического анализа АН СССР, 1949, № 19.
- Коржинский Д.С.* Очерк метасоматических процессов. — В кн. "Основные проблемы в учении о магматогенных рудных месторождениях". М., Изд-во АН СССР, 1953.
- Коржинский Д.С.* Физико-химические основы анализа парагенезисов минералов. М., Изд-во АН СССР, 1957<sub>1</sub>.
- Коржинский Д.С.* Режим кислотности послемагматических растворов. — Изв. АН СССР, серия геол., 1957<sub>2</sub>, № 12.
- Коржинский Д.С.* Теория метасоматической зональности. "Наука", 1969.
- Коржинский Д.С.* Поток трансмагматических растворов и процессы гранитизации. — В сб. "Магматизм, формации кристаллических пород и глубины земли". "Наука", 1972.
- Коржинский Д.С.* Теоретические основы анализа парагенезисов минералов. "Наука", 1973<sub>1</sub>.
- Коржинский Д.С.* Метамагматические процессы. — Изв. АН СССР, серия геол., 1973<sub>2</sub>, № 12.
- Кориковский С.П.* Метаморфизм, гранитизация и постмагматические процессы в докембрии Удокано-Становой зоны. "Наука", 1967.
- Кориковский С.П.* Влияние глубинности на соотношения метаморфических зон в насыщенных  $K_2O$  метapelитовых сланцах и роговиках. — В сб. "Очерки физ.-хим. петрологии", т. 1. "Наука", 1969.
- Кориковский С.П.* Границы фаций регионального метаморфизма в бедных СаО породах. — В сб. "Актуальные проблемы современной петрографии". "Наука", 1973.
- Кориковский С.П., Гусева А.И., Федоровский В.С.* Перекристаллизация кианит-хлоритоидных сланцев и изменение состава мусковит-фенгитов в зонах контактового воздействия нижнепротерозойских гранитоидов Патомского нагорья. — В сб. "Очерки физ.-хим. петрологии", вып. IV. "Наука", 1974.
- Логинов В.П.* Геология Кабанских колчеданных месторождений и основные черты их генезиса и метаморфизма. — В кн. "Колчеданные месторождения Урала". М., Изд-во АН СССР, 1950.
- Логинов В.П.* Алюмосилициты Кабанского колчеданного месторождения (Средний Урал). — Труды Ин-та геол. наук АН СССР. М., Изд-во АН СССР, 1951, вып. 134.
- Логинов В.П.* Метаморфизованные колчеданные гальки в верхнесилурийских конгломератах Левихи. — Изв. АН СССР, серия геол., 1956, № 6.
- Логинов В.П.* Закономерности локализации колчеданных месторождений на Северном Урале и некоторые вопросы их генезиса. — В кн. "Закономерности размещения полезных ископаемых", т. 1. М., Изд-во АН СССР, 1958<sub>1</sub>.
- Логинов В.П.* Основные типы первичной зональности колчеданных месторождений Урала. — Материалы к совещанию по разработке научных основ поисков слепых рудных тел. Тезисы докладов. М., 1958<sub>2</sub>.
- Логинов В.П.* Метаморфизм колчеданных руд месторождения Левиха (Средний Урал) у контактов с дайкой авгитового порфирита. — Геол. рудн. месторожд., 1960, № 3.
- Логинов В.П.* Пренито-пумпеллиитовая фация в главной зеленокаменной полосе Среднего Урала. Труды Второго Уральского петрографического совещания. Тезисы докладов, т. 3. Свердловск, 1966.
- Логинов В.П.* Пренито-пумпеллиитовая фация регионального метаморфизма в главной зеленокаменной полосе Среднего Урала — Труды Второго Уральского петрографического совещания, т. 5. Свердловск, 1969<sub>1</sub>.

- Логонов В.П. О генетическом родстве серно-сульфидных месторождений с типично колчеданными. — Докл. АН СССР, 1969, 2, 189, № 3.
- Логонов В.П. Эндогенная зональность колчеданных месторождений. — В сб. "Зональность гидротермальных рудных месторождений", т. II. "Наука", 1974.
- Логонов В.П., Лапутина И.П., Носик Л.П. К характеристике физических условий метаморфизма колчеданных руд Маукского месторождения (Средний Урал). — В кн. "Магматизм, метаморфизм и оруденение в геологической истории Урала". Тезисы докладов Третьего Уральского петрографического совещания, III. Свердловск, 1974.
- Логонов В.П. Серно-сульфидные залежи новейшего возраста и их значение для геологической классификации и познания условий генезиса колчеданных месторождений. — В кн. "Метасоматиты и оруденение". "Наука", 1975.
- Логонов В.П., Николаева О.Я. Находка гипогенного алунита на Среднем Урале. — Изв. АН СССР, серия геол., 1953, № 2.
- Логонов В.П., Русинов В.Л. Серно-колчеданная залежь среди вулканогенных толщ четвертичного возраста у вулкана Менделеева на острове Кунашир. — В кн. "Метасоматизм и другие вопросы физико-химической петрологии". "Наука", 1968.
- Логонов В.П., Русинов В.Л. Некоторые существенные различия пропилитизации и регионального зеленокаменного метаморфизма в вулканогенных толщах геосинклиналей. — В кн. "Метасоматизм и рудообразование". "Наука", 1974.
- Логонов В.П., Русинов В.Л., Колесова А.Н., Симбирятин З.П. Контактные взаимоотношения некоторых даек плагиоклазового порфирита с колчеданной рудой месторождения Левиха-Южная. — В кн. "Физико-химические проблемы образования горных пород и руд", т. 2. М., Изд-во АН СССР, 1963.
- Логонов В.П., Захаров А.С., Колесова А.Н. Гематитовая минерализация у контактов дайки авгитового порфирита на Левихинских колчеданных месторождениях (Средний Урал). — В кн. "Метасоматизм и другие вопросы физико-химической петрологии". "Наука", 1968.
- Логонов В.П., Пирожок П.И., Русинов В.Л. Текстуры типа "колец Лизеганга" в зоне окрашенной пиритовой минерализации Учалинского месторождения (Южный Урал). — Геол. рудн. месторожд., 1971, № 1.
- Маракушев А.А. Термодинамика метаморфической гидратации минералов. "Наука", 1968.
- Маракушев А.А., Перчук Л.Л. Происхождение и эволюция трансмагматических и метаморфических флюидов. — В кн. "Доклады I Международного геохимического конгресса", т. III, кн. 1. М., 1972.
- Наковник Н.И. Новое в минералогии боковых пород колчеданных залежей Урала. — Изв. АН СССР, серия геол., 1943, № 1.
- Нечеухин В.М. Вулканогенные горные породы восточной части Баймакского района (Южный Урал) и некоторые особенности их метаморфизма. — В кн. "Магматизм, метаморфизм, металлогения Урала". Труды Первого Уральского петрографического совещания, т. II. Свердловск, 1963.
- Перцев Н.Н. Парагенезисы борных минералов. "Наука", 1971.
- Перцев Н.Н. Высокотемпературный метаморфизм и метасоматизм карбонатных пород. Автореф. докт. дисс. ИГЕМ АН СССР. М., 1974.
- Перчук Л.Л. Физико-химическая петрология гранитоидных и щелочных интрузий Центрального Туркестано-Алая. "Наука", 1964.
- Перчук Л.Л. Равновесия порообразующих минералов. "Наука", 1970.
- Перчук Л.Л. Термодинамический режим глубинного метаморфизма. "Наука", 1973.
- Подлесский К.В. Скарны и окологорудные метасоматиты железорудных месторождений Урала. Автореф. канд. дисс. ИГЕМ АН СССР. М., 1975.
- Пэк А.В. Структура и некоторые вопросы генезиса Левихинских колчеданных месторождений на Среднем Урале. — В кн. "Колчеданные месторождения Урала". М., Изд-во АН СССР, 1950.
- Расс И.Т. Закономерности распределения редкоземельных элементов в минеральных парагенезисах метасоматитов щелочно-ультраосновных массивов. Автореф. канд. дисс. М., 1971.

- Расс И.Т., Боронихин В.А., Кравченко С.М.* Тенденции изменения концентраций Mg, Fe, Ti, Ca и Na в различных зонах кристаллов моноклинного пироксена и флогопита пород карбонатитовых комплексов как критерий их генезиса. — Докл. АН СССР, 1974, 219, № 2.
- Расс И.Т.* Редкоземельные элементы в сосуществующих минералах ассоциаций различной щелочности. — В сб. "Метасоматиты и оруденение". "Наука", 1975.
- Русинов В.Л.* Неупорядоченный гидротермальный альбит и его петрографическое значение. — Докл. АН СССР, 1965<sub>1</sub>, 164, № 2.
- Русинов В.Л.* О находках пренита и кластическом характере эпидота в породах некоторых областей современного гидротермального метаморфизма. — Изв. АН СССР, серия геол., 1965<sub>2</sub>, № 2.
- Русинов В.Л.* Пропилиты и оруденение. — Геол. рудн. месторожд., 1968, № 6.
- Русинов В.Л.* Геологические и физико-химические закономерности пропилитизации. "Наука", 1972.
- Сергиевский В.М.* Краткий геологический очерк меденосной вулканогенной зоны Урала. — В кн. "Геология и полезные ископаемые Урала", вып. 1. М.-Л., 1947.
- Червяковский Г.Ф.* Среднепалеозойский вулканизм восточного склона Урала. "Наука", 1972.
- Шабынин Л.И.* Формация магнезиальных скарнов. "Наука", 1973.
- Шабынин Л.И.* Рудные месторождения в формации магнезиальных скарнов. "Недра", 1974.
- Шабынин Л.И., Перцев Н.Н., Малинко С.В.* Условия нахождения и диагностические признаки борных минералов скарновых месторождений. "Недра", 1964.
- Шабынин Л.И.* Железорудные месторождения в формации магнезиальных скарнов. "Недра", 1977.

# ОСНОВНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ПЕТРОЛОГИИ

## ВВЕДЕНИЕ

Петрографические исследования в Академии наук СССР были организованы и успешно развиты плеядой высокоавторитетных петрографов — академиками Ф.Ю. Левинсоном-Лессингом, Д.С. Белянкиным и членом-корреспондентом АН СССР П.И. Лебедевым. На первом этапе организации петрографических исследований в Геологическом музее Ф.Ю. Левинсон-Лессинг создал группу исследователей из петрографов-специалистов — Б.М. Куплетского, А.А. Турцева, М.К. Бельштерли — и молодежи, из которых выросли крупные исследователи-петрографы: О.А. Воробьева, Б.П. Беликова, Е.К. Устиев, В.П. Петров. Автору настоящего доклада так же довелось начать свой научный путь в этом коллективе в 30-х годах.

Уже в самом начале Ф.Ю. Левинсоном-Лессингом были заложены основные направления петрографии как науки комплексного характера, тесно связанной с сопредельными областями знания.

Если собственно петрографы вели исследования в области трех главнейших формаций изверженных пород — гранитных, щелочных и основных, то П.И. Лебедев уделял специальное внимание петрогеохимическим исследованиям, Д.С. Белянкин — изучению искусственных камнепродуктов, Б.В. Залесский — горным породам как неметаллическим полевым ископаемым, а А.А. Турцев — изучению ряда физических свойств, например магнитности. Придавая большое значение физикохимии магматических процессов, Ф.Ю. Левинсон-Лессинг привлек к экспериментальным исследованиям проф. А.С. Гинзбурга, дело которого продолжил А.И. Цветков.

В 50-х годах, после проведения Первого Всесоюзного петрографического совещания (Москва, 1953), петрографами Академии наук разрабатывалась проблема "Магматизм и связь с ним полезных ископаемых".

Таковы истоки научных направлений, развиваемых ныне коллективом петрографов ИГЕМ. В девятом пятилетии петрографы разрабатывали направление "Магматизм как индикатор глубинного строения Земли и источник формаций изверженных пород и связанных с ними полезных ископаемых".

Организационное разобщение смежных научных направлений, таких, как петрология, физические свойства горных пород и минералов,

экспериментальные исследования по изучению физико-химических магматогенных процессов и другие, компенсировалось разработкой совместных проблем и тем в пределах единого плана.

В содружестве с лабораториями ИГЕМ (например, Лабораторией физико-механических свойств горных пород) и другими научными учреждениями (Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта) проводились совместные полевые и экспериментальные исследования, позволившие разработать новые представления в части интерпретации геофизических работ для понимания строения и состава земной коры.

С учетом большого значения для геологической петрологии данных абсолютного возраста и поведения радиогенных элементов в природных объектах при Отделе петрографии была создана Лаборатория абсолютного возраста, позднее превращенная в самостоятельную лабораторию.

Третьим и главным направлением петрографических исследований была разработка учения о формациях изверженных горных пород и связи с ними полезных ископаемых. При этом особое внимание уделялось конкретным формациям — сообществам горных пород, генетически между собой связанных.

#### НЕКОТОРЫЕ ИТОГИ ИССЛЕДОВАНИЙ СТРОЕНИЯ И СОСТАВА ВЕРХНЕЙ ОБОЛОЧКИ ЗЕМЛИ

В настоящей статье автор обращает внимание, что им 20 лет назад были поставлены и с тех пор разрабатывались некоторые вопросы о строении земной коры. Впервые они были изложены в докладе на Первом Всесоюзном петрографическом совещании (Москва, 1953).

Поскольку для многих геологов и петрографов "кора" и "мантия", разделяемые так называемой поверхностью Мохоровичича, постепенно стали восприниматься как реально существующие среды принципиально разного состава, то в геологии постепенно возникли представления о "коровых" и "мантийных" эклогитах, о "мантийных" источниках рудного вещества, о существовании двух типов земной коры — "океанического" и "континентального" и другие аналогичные гипотетические представления. Анализ истории возникновения и развития таких представлений, проводимый автором в течение последних 20 лет, показывает, что они базируются на косвенных геофизических данных о скоростях прохождения упругих волн в земной коре. Однако нашими работами с М.П. Воларовичем и др. (ИФЗ) и с Б.П. Беликовым (ИГЕМ) было показано, что для правильной геологической интерпретации геофизических данных необходимо расширять и уточнять методические подходы к проведению экспериментальных исследований физических свойств горных пород, привлекая к изучению хотя бы монокристаллы минералов.

К тому же разделу уточнений методического подхода и интерпретации геофизических данных относится и выдвинутое автором положение (Афанасьев, 1967, 1968) о том, что при изучении силы тяжести на море

более правомерно применение в качестве поправок аномалии Фая, но не Буге. Такой подход лишил основания гипотетическое предположение о том, что дно океанов сложено избыточно тяжелыми массами.

Прежде чем напомнить мои собственные, в значительной части опубликованные ранее выводы о строении и составе земной коры, приведу исследование некоторых представлений Б.П. Беликова о петрофизических исследованиях. По его мнению, познание строения земной коры базируется как на данных сейсмологии и материалах геолого-петрографических исследований, так и на определениях физических характеристик горных пород и минералов, таких, как упругие, магнитные, электрические и тепловые свойства. Свойства эти рассматриваются в неразрывной связи с историей формирования породы, накладывающей, как известно, отпечаток путем изменения порового пространства и минерального состава.

В лаборатории ИГЕМ проводится петрофизическое изучение упругих свойств горных пород. Правильное понимание взаимосвязи свойств с составом требует также определения упругих констант главных породообразующих минералов, для чего был предложен способ расчета свойств пород по минеральному составу, определяемому петрографически. Вычисленные упругие константы минералов подтвердили условность "гранитного" и "базальтового" слоев земной коры, выделяемых по сейсмическим данным.

Значительные экспериментальные исследования были проведены по материалам Кавказа. Одной из задач здесь являлось моделирование состояния пород в условиях глубинного залегания, т.е. изучение упругих свойств при повышенном давлении.

Эти работы, проведенные совместно с ИФЗ АН СССР (М.П. Воларович, Е.И. Баяк, Г.А. Ефимова, А.И. Левыкин), позволили классифицировать породы и минералы по характеру их поведения при всесторонних давлениях до 20 кбар. Выяснилось, что повышение давления влечет за собой увеличение скоростей упругих волн во всех породах, слагающих Кавказ.

Оказалось вместе с тем, что вулканические стекла ведут себя по-иному (Э.А. Тонкова), что было отмечено мною в 1960 г.

Экспериментальное изучение совместного действия  $P$  и  $T$  на скорости волн пока только начато, но, несомненно, оно является весьма важным для моделирования поведения горных пород на глубинах, где температуры *a priori* порядка нескольких сотен градусов.

Проведенные экспериментальные исследования показали, как отметил Б.П. Беликов, что при давлениях до 2 кбар скачком, а от 2 до 10 кбар плавно скорость упругих волн в различных петрографических классах горных пород и монокристаллах минералов увеличивается от 5 до 30%, что связано с закрытием трещин, общим уплотнением породы, минерала.

Выяснилась существенная роль порового пространства для скорости прохождения упругих волн в горных породах и минералах. Результаты этих экспериментальных исследований публиковались в совместных работах автора, Б.П. Беликова и др. в 1965–1971 г.

Еще в 1960 г. Г.Д. Афанасьевым обосновывалось, что поверхность Мохоровичича не представляет границу между ассоциациями горных пород существенно разного состава, а отвечает уплотнению мозаичного по составу субстрата коры (литосферы) с почти полной ликвидацией порового пространства.

В какой-то мере с этим выводом согласуются выводы Д.П. Мак-Кензи (1972) и Д. Дормана (1969), которые считают, что раздел Мохо является одной из многих границ в верхней мантии и не имеет решающего значения, которое приписывалось ему ранее. Д. Дорман пишет, что граница Мохо представляет случайный раздел и всю область от земной поверхности до глубины в несколько сотен километров можно назвать активной геологической зоной.

Выделение "коры" и "мантии" основано на различиях физико-механических параметров единой среды — литосферы в условиях разномышенного состояния. Это подтверждается и тем фактом, что известные мощности коры порядка 30—40 км характерны для обоих типов областей — древних складчатых и платформенного типа, со спокойным залеганием чехла; увеличивается она в молодых горных хребтах до 60 км.

По расчетам К. Конди (Condie, 1973), кора, связанная с архейским магматизмом, оставалась практически неизменной по мощности 38—40 км от периода древнее 2500 млн. лет до периода моложе 225 млн. лет.

Все сказанное позволяет скорее считать употребляемое сейчас понимание "коры" в отличие от "мантии" геофизическим представлением, не адекватным тому содержанию, которое обычно вкладывается в понятие "кора" геологами, в первую очередь имеющими в виду сиалический ее состав.

Анализ геофизических данных и материалов по геологии, магматизму и геохимии континентального и океанического сегментов Земли, проводившийся автором в работах с 1960 до 1973 г., позволил прийти к выводу о том, что земная кора едина и имеет идентичные мощности и состав в области материков и океанов.

Так, на геологическом профиле, впервые опубликованном в 1966 г., от Гималаев до Марианской впадины наблюдается повышение уровня поверхности Мохо от континента к глубоководной впадине. С этим изменением положения границы Мохо коррелируется увеличение  $V_p$  для наиболее плотных пород (дунит, эклогит, амфиболит) и ряда минералов.

Как установлено в результате экспериментального изучения монокристаллов кварца, полевых шпатов и нефелина, сходную картину увеличения  $V_p$  с повышением давления от 1 атм до ~ 600—1000 атм показывает средняя величина  $V_p = 7,1-7,2$  км/сек, полученная для лейкократовых минералов, столь распространенных в так называемых сиалических (коровых) породах.

С точки зрения изменения типа коры в ходе геологической истории (кора континентальная переходит в океаническую) интересны новые данные японских геологов о валунах докембрийских силлиманитовых

гнейсов, заключенных в конгломератах Камиасо Центральной Японии (Shibata, Mamoгу, 1972). Цифры, полученные ими при определении возраста ряда образцов Rb/Sr и K-Ar методами, колеблются около 1600 млн. лет. К тому же порядку новых фактов о строении океанического дна относятся и данные о палеозойском возрасте гранитов, извлеченных с поверхности подводного поднятия Ямато в глубоководной части Японского моря (Леликов, Васильев, 1974).

С точки зрения единой мощности твердой коры в 100–150 км механизм процессов, определяющих тектонику плит, а также горизонтальное перемещение континентов и раздвижение океанического дна, требует дополнительных геологических обоснований помимо известных данных о сходстве очертаний континентов и выявленных вариантах магнитного поля Земли. Необходимо также заметить, что "тектоника плит" и дрейф континентов (в еще недавно принимавшемся смысле) — это вовсе не идентичные геологические явления глобального порядка!

#### ГЕОХРОНОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ИГЕМ

Организованные в ИГЕМ с 1958 г. геохронологические исследования послужили твердой основой при разработке проблемы конкретных магматических формаций и их связи с полезными ископаемыми. Эта трудоемкая часть синтетического изучения конкретных формаций является существенным вкладом в обоснование выводов по отдельным объектам изучения, рассматриваемым ниже.

Однако следует кратко сказать и о той организующей роли, которую осуществлял ИГЕМ в развитии геохронологических исследований в стране в целом. Последние годы научный совет по геохронологии — Комиссия по определению абсолютного возраста геологических формаций — находится в ИГЕМ. Комиссией совместно с лабораторией ИГЕМ (Л.Л. Шанин) и Отделом петрографии проводится большая систематическая работа по созданию эталонов для различных геохронологических методов. Созданы эталоны для K-Ar, U-Pb и Rb-Sr методов.

Вместе с действующими геохронологическими лабораториями СССР Комиссией проведены исследования эталонных и сверочных проб, что способствовало поднятию общего уровня геохронологических аналитических исследований в стране.

При обработке данных существенная помощь была оказана лабораторией Московского государственного университета (С.И. Зыков). При активном участии лаборатории ИГЕМ (Л.Л. Шанин), Грузинской академии наук (М.М. Рубинштейн) в 1964 г. была создана советская геохронологическая шкала, которой в практической работе пользуются все геологи Союза. В 1965 г. эта шкала одобрена Международной геохронологической комиссией (Нанси, Франция, 1965). Основанная главным образом на датировке минералов изверженных пород, шкала создает также основу выделения планетарности некоторых эпох гранитообразования. Конечно, необходимы дальнейшая детализация и уточнение датировок отдельных рубежей.

ИССЛЕДОВАНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ ПЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ  
КАК БАЗА СОЗДАНИЯ УЧЕНИЯ  
О КОНКРЕТНЫХ МАГМАТИЧЕСКИХ ФОРМАЦИЯХ

Разработка научного направления "Магматические формации и связь с ними полезных ископаемых" в Отделе петрографии тесно связана с развитием представлений Ф.Ю. Левинсона-Лессинга о формациях изверженных пород, изложенных в его классической монографии "Олонецкая диабазовая формация" (1888). Проблеме формаций много сил и внимания уделил Е.К. Устиев, возглавивший и организовавший доклад по формациям на IV петрографическом совещании в Баку.

Формационный — в разрезе конкретных формаций — подход к изучению истории развития магматизма любого геологического региона позволяет выявить естественные ассоциации изверженных пород, связанных общностью структурно-фациальной обстановки образования и источника происхождения, а также спецификой состава, отражающейся, в частности, на металлогенических особенностях изучаемых магматических формаций.

Такое изучение эволюции магматизма конкретных геологических регионов создает основу для петрогенетических выводов в области основных проблем, например, дифференциация магм, типы родоначальных магм, их множественность или ограниченность, процессы ассимиляции, гибридизма, метасоматизма. Выяснение физического состояния магм, особенно кислых, в эффузивной и интрузивной фациях, с учетом провинциальных сопутствующих обстоятельств — тектонических движений, глубины генерации расплавов и глубины формирования из них горных пород — существенно важно для многих процессов петрогенезиса.

Изучение контактовых, позднемагматических и постмагматических производных позволяет оценить потенциальную металлоносность магматических формаций. Изучение вещественного состава, возраста, структурно-тектонического положения конкретных формаций особенно необходимо для все расширяющихся в нашей стране палеовулканических исследований. Без петрографии вулканогенов не может серьезно обсуждаться генезис залегающих среди них рудных месторождений.

Ниже публикуются краткие данные об итогах изучения отдельных петрологических объектов.

Проводившиеся в Отделе А.П. Лебедевым глубокие исследования ассоциаций пород основного состава на примере диабазовой формации Кавказа и траппов Восточной Сибири были успешно продолжены его учениками Ю.И. Дмитриевым и О.А. Богатиковым.

Были также развернуты работы по детальному петролого-геохимическому изучению анортозитовых ассоциаций. О.А. Богатиковым и Ю.И. Дмитриевым ведутся работы по сравнительному анализу анортозитов и базальтов Земли и Луны, первые результаты которого уже нашли отражение в периодической печати.

*Конкретные формации изверженных пород  
Северо-Кавказской горной области*

В 1971 г. коллективом петрографов (Г.Д. Афанасьев, А.М. Борсук, Л.А. Кондаков, Н.П. Лупанова и В.В. Плошко) была опубликована карта конкретных магматических формаций Северного Кавказа, составленная на существовавшей геологической основе. Такую карту возможно было создать только после геолого-петрографического изучения истории развития магматизма региона во времени и пространстве, сочетавшегося с данными ряда сопредельных наук.

Монографические работы исследователей магматизма Кавказа (Афанасьев, 1950, 1958 и др.; Борсук, 1963; Плошко, 1965) во многом способствовали созданию такой карты. Основные выводы изложены в опубликованных недавно работах (Лупанова, 1975; Кондаков, 1974).

Следует подчеркнуть важный для петрологии и для учения об эндогенных рудных месторождениях вывод о необходимости максимально полного знания специфики структурно-геологических обстановок во время формирования ассоциации магматических пород и сопровождающей их минерализации.

Тектонический режим областей развития конкретных формаций отражается существенным образом на специфике петрографического состава пород, образующих формации, и на характере производных, с ними связанных.

Так, в истории магматизма Кавказа наряду с этапами геосинклинального развития в разных структурно-формационных зонах установлены проявления субплатформенного магматизма с образованием специфических формаций изверженных пород.

На основе карты магматических формаций и всего опыта изучения Кавказа автором в феврале 1973 г. на ученом совете ИГЕМ был сделан доклад о связях магматизма и эндогенного оруденения. Остановимся лишь на некоторых выводах этого доклада.

1. Установлена структурно-территориальная и часто возрастная сопряженность отдельных типов эндогенного оруденения с разнотипными и разновозрастными магматическими формациями.

2. Петрохимическая специфика горных пород и отдельных рудопроявлений позволила обосновать существование генетической связи этих рудопроявлений с конкретным магматизмом. Эти выводы подтвердили ранее высказанные автором, а также сформулированные в решениях I и II Всесоюзных петрографических совещаний (1953 и 1958 гг.) достаточно обоснованные положения о существовании генетических связей между магматизмом и эндогенным оруденением.

3. Частное, но тем не менее важное для металлогенических построений обстоятельство заключается в выявленной приуроченности среднепалеозойских медноколчеданных (Худес, Уруп) месторождений Северного Кавказа не к троговому прогибу в образованиях нижнего — среднего палеозоя кавказской геосинклинали среднепалеозойского времени, а к более молодой периферийной структуре с развитием пород трахиандезит-базальтовой формации.

*Специализированные рудоносные  
магматические гранитоидные комплексы  
(на примере Дальнего Востока,  
Центрального Казахстана и Средней Азии)*

На основании многолетних исследований на Дальнем Востоке, в Средней Азии (М.Г. Руб и В.А. Павлов) и других регионах выяснены закономерности размещения и особенности состава этих комплексов. Показано, что рудоносные магматические комплексы наблюдаются в разнообразных геологических условиях как в пределах щитов и платформ, так и в складчатых областях; в последнем случае они являются посторогенными и приурочены к зонам крупных тектонических нарушений и оперяющим их трещинам.

Возраст пород, слагающих рудоносные гранитоидные комплексы, колеблется от докембрия (1950–800 млн. лет) до неогена (30–15 млн. лет). Однако распространенность этих комплексов и практическое значение сопровождающих их месторождений различны. Так, среди оловоносных наиболее широко развиты мезозойские, особенно верхнемеловые, среди редкометалльных и вольфрамоносных наряду с мезозойскими очень большую роль играют палеозойские.

Рудоносны обычно дифференцированные многофазные интрузивные комплексы, наиболее поздние дифференциаты которых представлены аляскитовыми или лейкократовыми гранитами повышенной щелочности. В ряде случаев рудоносны кислые вулканоплутонические ассоциации, в пределах которых устанавливается комагматичность эффузивных, субвулканических и интрузивных образований. В Сихотэ-Алиньской складчатой области оловянное оруденение касситерит-силикатной формации связано с существенно калиевыми трахит-граносиенитовыми комплексами (трахиандезиты – монцититы – граносиениты).

Сопоставление химического состава эффузивных и интрузивных пород оловоносных вулканоплутонических ассоциаций Балыгычано-Сугуйского (Северо-Восток) и Мяо-Чанского (Хабаровский край) районов показало, что эффузивные породы отчетливее отражают состав первичной магмы, а интрузивные указывают на большую роль в их формировании не только дифференциации, в том числе и эманационной, но также процессов ассимиляции и гибридизма. Породы рудоносных магматических комплексов отличаются обычно повышенным содержанием рудных элементов и летучих компонентов, количество и дисперсия концентраций которых резко увеличиваются в поздних, наиболее кислых дифференциатах. Содержание рудных элементов и летучих компонентов в породообразующих и акцессорных минералах рудоносных гранитов выше, чем в соответствующих минералах нерудоносных гранитоидов.

В рудоносных магматических комплексах наблюдается прямая корреляционная связь между содержанием рудных элементов (Sn, Ta, Nb, W и др.) и летучих компонентов в породе и породообразующих минералах. Летучие в рудоносных комплексах присутствуют не только в акцессорных и цветных породообразующих минералах (биотите и роговой обманке), но и в кварце (в составе газовых и газовой-жидких включений).

Q. большом значении летучих при формировании редкометалльных и оловоносных магматических комплексов свидетельствуют протолитионитовые граниты, вскрытые на Востоке СССР. Имеющиеся геологические материалы и проведенное М.Г. Руб специальное изучение протолитионитовых гранитов с применением прецизионных методов исследования позволяет высказать предположение об их магматическом происхождении. В ряде экспериментальных работ показана возможность существования гранитных расплавов при температурах 500–600°. Магматическое происхождение редкоземельных гранитов подтверждают результаты изучения флюоритсодержащих шаровых лав липаритового состава в Приморье (М.Г. Руб).

В то же время имеющиеся материалы позволяют предполагать, что в некоторых случаях летучие, в частности фтор, попадают в магму во время образования палингенной гранитной магмы и связаны с глубинным источником. Бор же может попадать в магму во время продвижения фронта магмообразования, захватывающего по пути и вовлекающего в процесс песчано-глинистые отложения, богатые этим элементом. В некоторых других регионах бор связан и с глубинным источником.

Образование рудоносных гранитоидных комплексов помимо общих геологических факторов обуславливается: 1) особенностями химизма вещества пунктов магмообразования, в которых возникла палингенная гранитная магма; 2) составом и количеством газовой фазы; 3) полнотой процессов дифференциации с участием газовой фазы, приводящих к накоплению рудных элементов и летучих компонентов в остаточном магматическом расплаве; 4) явлениями ассимиляции и гибридизма, в результате которых происходит накопление одних элементов и рассеивание других; 5) составом глубинных растворов, принимавших участие в палингенном магмообразовании, и другими факторами.

Показателем рудоносности гранитоидов может служить повышенное содержание рудных элементов и летучих компонентов в породообразующих и акцессорных минералах.

Впервые с помощью электронно-зондового микроанализатора установлены формы вхождения рудных элементов (Sn, Ta, Nb, W) и летучих (F) в породообразующие (слюды) и акцессорные минералы (цирконы, рутилы, сфены, апатиты). Показано, что олово и тантал могут входить в биотит в виде изоморфной примеси, замещая трехвалентное железо и титан. Однако главными концентраторами олова и тантала в слюдах являются акцессорные минералы — касситерит, колумбит, рутил и другие, присутствующие в слюдах в виде микровключений.

Повышенное содержание рудных элементов в биотитах, кристаллизующихся в магматическую стадию, и присутствие в них микровключений касситерита, колумбита, стрюверита и других рудных минералов указывают на магматическую природу олова и тантала.

Материалы, полученные по разновозрастным гранитоидам различных регионов СССР, свидетельствуют о том, что состав акцессорных минералов и содержание в них тех или иных элементов-примесей отражают геохимические особенности кристаллизующейся гранитной магмы. Так, если магма обогащена вольфрамом, то в акцессорных апатитах

гранитов отмечается повышенное количество вольфрама и присутствуют микровключения шеелита и вольфрамита, если магма обогащена танталом, образуется танталсодержащий рутил — стрюверит, и т.д.

Оловянные, редкометалльные, а в ряде случаев вольфрамовые месторождения связаны обычно с развитием многофазных, интенсивно дифференцированных гранитоидных комплексов. При этом отделение рудоносных растворов от магмы происходило неоднократно — после образования интрузивных пород различных фаз и субфаз. Однако максимальное количество рудоносных растворов выделилось после образования наиболее поздних лейкократовых и аляскитовых гранитов, т.е. они являются дериватом остаточного магматического расплава, насыщенного рудными элементами и летучими компонентами. Таким образом, ряд месторождений грейзеновой и кварц-вольфрамит-касситеритовой формаций непосредственно генетически связан с гранитами заключительных фаз, а другие, относящиеся к касситерит-силикатной и касситерит-сульфидной, слюдисто-берtrandит-фенакитовой и другим формациям, являются дериватом остаточного расплава, поступающего из магматического очага.

О связи оловянного, редкоземельного, вольфрамового, а в ряде случаев также молибденового, свинцово-цинкового и золотого оруденения с магматическими комплексами свидетельствуют выдвинутые и разработанные М.Г. Руб структурно-геологические, минералого-петрографические и геохимические критерии. Детально критерии связи оруденения с магматическими комплексами были ранее рассмотрены этим автором в специальной совместной работе (Коптев-Дворников, Руб, 1965). В связи с развитием новых методов исследований (определение изотопного состава, состава газовой-жидких включений в минералах гранитоидов и сопровождающих их постмагматических образованиях, исследования на микроанализаторе, электронном микроскопе и др.) появились дополнительные факты, подтверждающие выдвинутые нами критерии.

Петрографами Отдела (В.С. Коптев-Дворников, О.С. Полквой, В.А. Павлов, С.В. Ефремова, Е.В. Негрей, Н.Л. Пламеневская, М.А. Осипов, Г.М. Царева, О.И. Яшухин) осуществляется длительное и многостороннее изучение гранитоидного магматизма областей завершённой складчатости на примере Центрального Казахстана. Геолого-петрографические данные, полученные в ходе исследования гранитоидов этого региона, позволили: 1) выявить основные закономерности формирования многофазных гипабиссальных гранитоидных комплексов (Полквой, 1950; Коптев-Дворников, 1952; Коптев-Дворников и др., 1960, 1962; Ефремова, 1962, 1970; Павлов, 1964; Негрей, 1972); 2) установить парагенетический характер связи гранитоидов и близких им по времени формирования эффузивов с появлением пород вулканоплутонических ассоциаций; 3) показать, что в данном регионе основной формой пространственного сопряжения интрузивного магматизма и вулканизма на орогенном этапе развития являются вулканотектонические, обычно кольцевые структуры.

Результаты исследований гранитоидов Центрального Казахстана послужили основой для решения ряда проблем вертикального строения гранитоидных массивов и сопровождающих их экзоконтактовых, в том числе и надинтрузивных зон (Коптев-Дворников и др., 1971). Изучение последних показало, что контактовые превращения вмещающих пород, сопровождающие интрузии гранитоидов, могут иметь наряду с почти изохимическими и метасоматический преимущественно инфильтрационный характер. Намечены признаки двух этажей надинтрузивных зон невоскрытых интрузивов. Верхний, где ороговикование отсутствует, расположен на удалении 1–2 км от кровли интрузива. Присутствие последнего устанавливается по развитию полей жильных пород. В нижнем этаже различаются зоны незавершенного (рассеянного) ороговикования в интервале 300–1000 м от границы интрузива и завершенного (сплошного) ороговикования в прилегающей к массиву полосе шириной до 300 м. В нижнем этаже обычно присутствуют сателлиты и апофизы пород различных фаз массивов и рудная минерализация. Температурная зональность контактовых ореолов проявляется в уменьшении железистости цветных минералов и в смене актинолитовых парагенезисов роговиков роговообманковыми и пироксеновыми по мере приближения к массивам.

Анализ вертикальных разрезов гранитоидов массивов сильно расчлененных районов Памира и Средней Азии позволил выявить, что становление интрузивов происходит по крайней мере при двукратном поступлении расплава из магматического очага (Негрей, Волков, 1974). Кристаллизация каждой порции сопровождается серией внутрикамерных инъекций с перемещением дифференциатов к апикальным частям массива. Геохимическая зональность гранитоидных тел выражается в накоплении в их апикальных частях редких металлов, Rb и F.

### *Формации щелочных пород*

Среди различных аспектов магматической геологии и петрологии важное место занимает проблема щелочного магматизма и связанных с ним рудогенных процессов, изучение которых в ИГЕМ выполняли О.А. Воробьева, Е.Д. Андреева, В.А. Кононова, Е.В. Свешникова, Р.М. Ящина.

Актуальность проблемы, ее общегеологическое научное и практическое значение определяются: 1) индикаторными свойствами формаций щелочных пород, отражающих определенный режим развития и состояния глубинных и коровых структур Земли; 2) высокой рудогенерирующей способностью исходных и особенно поздних дифференциатов щелочных магм, дающих промышленно ценные магматические месторождения (алюминий, щелочи, титан, железо, фосфор, редкие элементы); 3) исключительным разнообразием сопутствующих метасоматических процессов, ведущих к концентрации редких элементов в особых типах пород и руд: редкометальных альбититах, слюдитах, карбонатитах и др.

Главнейшими объектами исследований были щелочные провинции и многочисленные щелочные массивы Советского Союза, огромная тер-

ритория которого представляет классическую область развития щелочного магматизма начиная с протерозойской эпохи (1900 млн. лет) вплоть до кайнозоя. Для сравнения исследовались щелочные массивы соседних зарубежных стран: Румынии, Монголии, Финляндии, частично Швеции и Канады. Одновременно проводился синтез литературных материалов советских и зарубежных ученых. Он отражен в соответствующих обобщающих трудах и на схеме размещения различных ассоциаций щелочных пород в континентальных структурах Советского Союза и мира.

Разработка проблемы осуществлялась за последнее десятилетие в нескольких направлениях.

Исследования по магматической геологии щелочных пород проводились в целом ряде провинций: Кольской, Уральской, Украинской, Кавказской (частично), Саяно-Тувинно-Монгольской, Алданской и др.

Важные результаты получены в итоге систематического изучения магматических комплексов центрального типа, для которых установлены главнейшие морфоструктурные типы, определены закономерности их распространения в структурах земной коры, показано их исключительное значение как магмоконтролирующих и рудогенерирующих структур (Свешникова, 1973).

Исследования по магматической геологии щелочных пород позволили выявить главные магмоконтролирующие структуры: 1) древние глубинные разломы фундамента и узлы их пересечений; 2) палеорифтовые зоны; 3) орогенные сводово-глыбовые поднятия и вулканогенные пояса, наложенные на платформы и древние складчатые области в эпохи повышенной тектоно-магматической активности глубинных зон Земли. Петрографы создали ряд работ по систематике, классификации и номенклатуре щелочных пород.

Изучение вещества щелочных пород осуществлялось традиционным минерало-петрографическим путем, а также наиболее современными методами (микрохимический, рентгенохимический, рентгеноструктурный, изотопный, математико-статистический и др.). Их применение позволило охарактеризовать состав щелочных пород различных природных ассоциаций, установить петрографо-геохимические особенности щелочных пород Кузнецкого Алатау (Андреева, 1968); произвести всестороннее исследование якупирангит-уртитовых ассоциаций (Кононова, 1961, 1971, 1974); выявить редкометальную минерализацию щелочных пород Тувы (Яшина, 1968); изучить ряд групп редкометальных минералов нефелиновых сиенитов Заангарья (Свешникова, 1964, 1973). Среди этих работ особое место занимают методические исследования по использованию нефелина для определения абсолютного возраста щелочных пород (Кононова, Шанин, 1973), а также обобщающие статьи по металлогенической специализации щелочного магматизма (Воробьева, 1960, 1964, 1969).

Принципы формационного анализа щелочных пород и классификация щелочных формаций разрабатываются в разных масштабах, охватывая природные щелочные ассоциации пород различных рангов, приуроченные к крупным структурным элементам земной коры — платформам и складчатым областям. Для специфических тектоно-магмати-

ческих структур центрального типа, развивающихся длительное время и связанных с различными магматическими очагами, выделяются ассоциации разновозрастных формаций с широким диапазоном их вещественного состава. Опыт формационного анализа разновозрастных щелочных массивов древних складчато-глыбовых областей произведен на примере байкальско-каледонского складчатого обрамления Сибирской платформы и Саяно-Тувинно-Монгольского региона (Яшина, 1974<sub>1</sub>), для которых выделены разновозрастные закономерные ряды щелочных формаций, различные по вещественному составу и структурному положению формационные группы, а также конкретные щелочные формации. Для каждой из них определены петрогеохимические особенности и металлогеническая специфика.

Теоретической основой разрабатываемых направлений в изучении щелочных пород служат объективные эмпирические закономерности: 1) прерывистый (многоэтапный) характер щелочного магматизма и его связь с магматическими источниками; 2) дифференциация глубинных магм от щелочно-ультраосновных или щелочно-базальтовых до собственно щелочных (нефелинитовых, фонолитовых, щелочно-трахитовых, пантеллеритовых) с образованием естественных (природных) рядов магматических щелочных пород; 3) особая роль поздние и послемагматических процессов, обуславливающих метасоматическую переработку и исключительное минерало-петрографическое разнообразие щелочных пород; 4) гетерогенность и конвергентность всех групп щелочных пород.

Установленные эмпирические закономерности находят подтверждение в широко известных экспериментах Боуэна и Шерера, Рингвуда и Грина, на основании которых определены физико-химические параметры возникновения щелочных глубинных магм. Работами советских экспериментаторов (Н.И. Хитаров, И.Д. Рябчиков, Л.И. Когарко, В.К. Марков, В.В. Наседкин) выявлена возможность выплавления, дифференциации и ликвации щелочных расплавов в определенных диапазонах температур и давлений, но с обязательным присутствием воды и летучих компонентов.

Значительное место в исследованиях, которыми руководила О.А. Воробьева, занимают теоретические разработки по петрогенным процессам: 1) магматической и кристаллизационной дифференциации щелочных интрузивных расплавов различного состава; 2) контактно-реакционного взаимодействия с вмещающей средой; 3) магматического замещения (ийолитизация, сиенитизация, фенитизация) и 4) многостадийного послемагматического метасоматоза (нефелинизация, калишпатизация, альбитизация, ослоденение, канкринитизация, карбонатизация). Результаты теоретических разработок освещены в коллективных сборниках (1962, 1965) и доложены на XXIV сессии МГК в Канаде (Воробьева и др., 1972).

Перечисленные петрогенные процессы являются в то же время рудогенными, так как с ними связан широкий спектр полезных ископаемых (нефелин, апатит, слюда, титаномагнетит и разнообразные редкометалльные руды). Однако наибольший удельный вес в щелочном рудо-

генезе имеет послемагматический метасоматоз, особенно альбитизация и карбонатизация.

В ходе петрографических исследований были попутно получены практические результаты: 1) открытие Ловозерского редкометалльного месторождения (О.А. Воробьева); 2) открытие и обоснование новой базы глиноземного (нефелинового) сырья в Туве (В.А. Кононова, Р.М. Яшина); 3) обнаружение и изучение редкометалльных рудопроявлений Заангарья (Е.В. Свешникова); 4) исследование и промышленно-перспективная оценка месторождений глиноземного сырья (Е.Д. Андреева, Е.В. Свешникова).

### *Трапповый магматизм платформ*

Детализация съемочных и поисковых работ на платформах, расширение геологических исследований ложа океанов, получение данных о составе и строении литосферы Луны существенно расширили наши знания о базальтовом магматизме и его важной роли в истории Земли.

Базальтовые формации весьма типичны для платформ — жестких, относительно стабильных участков литосферы нашей планеты, где интрузивные, эффузивные и вулканогенно-обломочные производные основной магмы — так называемые траппы, имеющие возраст от протерозойского до третичного и даже более молодые, развиты иногда на огромных территориях (Базальты плато, 1964; Геология и петрография трапповых формаций, 1950; Кузнецов, 1964).

Несколько разновозрастных трапповых формаций выделено на Сибирской платформе, где с ними связаны крупные месторождения меди, никеля, кобальта, железа, исландского шпата и других полезных ископаемых (Минерагения Сибирской платформы, 1970). Наиболее широко развита и лучше изучена верхнепалеозойская — нижнемезозойская трапповая формация, распространенная в основном в пределах Тунгусской синеклизы на площади около 1,5 млн. км<sup>2</sup> (Петрография Восточной Сибири, 1962; Траппы Сибирской платформы и их металлогения, 1971).

Время становления формации и, что особенно важно, возрастные соотношения между отдельными фациями и генерациями слагающих ее пород были существенно уточнены в последние годы методами изотопного датирования.

Установлено, что интрузивные и эффузивные процессы траппового магматизма не были разорваны во времени, а развивались более или менее параллельно в период от карбона — перми до юры включительно. Наиболее древние траппы, в том числе эффузивные, приурочены к периферической зоне Тунгусской синеклизы, а самые молодые члены формации тяготеют к центральным частям этой структуры.

Определения абсолютного возраста интрузивных траппов показали, что толеитовые и палагонитовые разности чаще встречаются среди пород ранних этапов внедрения, в то время как дифференциаты траппов пониженной основности более обычны среди относительно поздних генераций долеритов.

Сравнительное изучение петрографии дифференцированных и гомогенных интрузий траппов в центральной и южной частях Тунгусской синеклизы показало практическое отсутствие разновидностей долеритов, не встречающихся в ассоциации с другими представителями этой группы пород в составе одного интрузивного тела.

Это обстоятельство указывает на образование всего многообразия пород трапповой формации из единого исходного расплава. По имеющимся материалам состав его в пределах однородных тектонических структур существенно не менялся в ходе многократного процесса магнообразования.

Многократность процесса траппового магматизма проявлена особенно отчетливо в разрезах вулканогенно-обломочных и эффузивных свит, суммарная мощность которых достигает 200 м. Эти свиты имеют в различной степени выраженное ритмичное строение, обусловленное закономерной повторяемостью в разрезе сходных пород, что отражает циклический характер процесса траппового вулканизма.

В толще лав ритмичность, как правило, выражена чередованием базальтов с анамезитами. Анамезиты обычно отличаются от предшествующих им базальтов повышенными содержаниями тугоплавких элементов, порфирированностью и признаками кристаллизации из расплавов, относительно бедных летучими компонентами (Дмитриев, 1973<sub>1</sub>).

Эти особенности позволяют заключить, что анамезиты образуются на последних стадиях активности вулканического очага из относительно более основных расплавов (частично раскристаллизованных), которые поступали из нижних уровней магматических камер.

Базальтовые расплавы, поступавшие на поверхность с разных глубин и при различных тектонических режимах, имели определенную специфику состава. На окраинах синеклизы, в зонах разломов глубокого заложения, изливались лавы относительно более высокой основности, чем в центральных частях этой структуры. В центре синеклизы усиленное прогибание обусловило поступление в зону магнообразования силикатического материала, что привело к обогащению трапповых расплавов кремнеземом, глиноземом и щелочами.

Наряду с проявлениями траппового магматизма повышенной основности в зонах глубинных разломов по периферии синеклизы дифференциация базальтовой магмы в очагах, нередко локализованных под сводами положительных структур, обуславливала появление ассоциаций долеритов, обогащенных водой (гидрофильный тип) или щелочами (субщелочной тип). Эволюция нормальных, гидрофильных или субщелочных трапповых расплавов определяла возникновение серий меланомезо- и лейкократовых долеритов, встречающихся не только в составе расслоенных интрузий, но и образующих самостоятельные внедрения (Дмитриев, 1973<sub>1</sub>).

При дифференциации траппов проявляются две тенденции: повышение железистости темноцветных компонентов (оливина и пироксена) и повышение содержания кремнезема и щелочей вплоть до появления свободного кварца и калиевого полевого шпата. Последняя тенденция

стимулируется и усиливается процессами ассимиляции кварц-полевошпатового материала вмещающих континентальных отложений.

Дифференциация *in situ* наиболее четко выражена в крупных согласных и реже в секущих типах, развитых преимущественно в тектонических прогибах, где условия для их формирования были наиболее благоприятными. С дифференцированными интрузиями траппов во многих случаях связаны месторождения меди, никеля, кобальта, железа, исландского шпата и других полезных ископаемых. Для этих траппов в центральной и южной частях Тунгусской синеклизы какой-либо отчетливой специализации на полезные компоненты не отмечается. Главным фактором, обуславливающим возникновение экономически ценной минерализации, является, вероятно, обогащенность исходных расплавов летучими и прежде всего водой. Повышенное содержание летучих в магме способствовало ее дифференциации, в том числе отделению рудных элементов, выносу этих элементов во вмещающие породы и гидротермальной переработке последних (Дмитриев, Гусева, 1974). Вынос отдельно составляющих рудных и нерудных минералов из траппов и вмещающих их пород вполне четко устанавливается на месторождениях исландского шпата и магнетита (Дмитриев, 1963).

Вмещающие породы не только являются одним из источников вещества при формировании месторождений полезных ископаемых, связанных с траппами, но играют очень важную роль и в качестве рудовмещающей среды. Взаимодействие железосодержащих гидротерм с карбонатными породами приводит к фиксации железа в экзоконтактных зонах трапповых интрузий, прорывающих известняки и доломиты.

Легкая проницаемость базальтовых туфов и развитие свободных полостей в шаровых лавах и мандельштейнах эффузивных свит трапповой формации обуславливают возникновение здесь месторождений исландского шпата. Источником минералообразующих растворов в последних случаях, возможно, являются очаги нормальной трапповой магмы. Гидротермы поступали к поверхности по тектоническим разрывам и вулканическим каналам.

Проблема генезиса трапповых формаций и их металлогении имеет множество аспектов, которые требуют дальнейшей разработки.

Все большее внимание исследователей в настоящее время привлекают вопросы об источнике базальтовой магмы, о глубине и механизме образования очагов трапповых расплавов, а также о характере процесса, обусловившего периодическое возобновление основного магматизма на огромной территории и в течение многих десятков миллионов лет.

Для нужд поисковой и рудничной геологии также очень важна дальнейшая разработка вполне объективной, детализированной теории образования месторождений цветных и редких металлов, связанных с траппами.

*Базит-гипербазитовые формации древних платформ  
и связанная с ними минерализация*

Важным достижением науки последних лет является более глубокое познание вещества, слагающего изверженные горные породы, а следовательно, и более четкое и правильное представление о формационной принадлежности последних и генетических особенностях и типах связанных с ними полезных ископаемых. Достиженные успехи во многом определяются применением более совершенных и точных методов исследования вещества (электронное и лазерное микронзондирование, метод f-радиографии, активационный метод и др.).

Не менее важной особенностью научно-исследовательских работ последнего времени является комплексное решение поставленных задач с участием научно-исследовательских и производственных организаций. Такое комплексирование особенно эффективно при проведении работ на закрытых территориях с мощным осадочным чехлом, требующим бурения исследуемой площади. Знание формационной принадлежности той или иной ассоциации магматических горных пород, установление границ между отдельными генетическими сообществами, особенно когда наблюдается определенное сходство их минерального и химического составов (щелочно-базальтоидная и трахибазальтовая формации), являются важнейшей задачей сегодняшнего дня, так как это определяет направление поисков полезных ископаемых. Известно, что каждый формационный тип пород, каждая конкретная формация имеют свои специфические металлогенические особенности.

В.И. Гоньшаковой совместно с Приазовской комплексной геолого-разведочной экспедицией осуществляется изучение базит-гипербазитового магматизма Восточного Приазовья в связи с проблемой алмазности, составом и строением глубинных зон земной коры. Эти работы, проводимые на основе формационного анализа, позволили выявить новую для изучаемой провинции щелочно-ультраосновную – щелочно-базальтоидную формацию, перспективную на редкие элементы и алмазы. Ранее эта формация относилась к спилито-кератофировой, с которой предположительно связывалось полиметаллическое оруденение.

Материалы, полученные по Восточному Приазовью, а также данные, имеющиеся по северо-западу Сибирской платформы (Маймеч-Котуйская провинция; Егоров, Сурина, 1969), позволяют говорить о самостоятельности одних формационных типов пород – траппового, щелочно-оливин-базальтового (трахибазальтового) и тесной генетической (парагенетической) связи других – щелочно-базальтоидного, ультраосновного-щелочного (с карбонатами) и кимберлитового.

Генетическое (парагенетическое) родство трех последних формаций, признаваемое большинством исследователей (Ю.М. Шейнманн, А.А. Кухаренко, Н.П. Михайлов, В.И. Гоньшакова, Л.С. Егоров, В.Л. Масайтис и др.), позволяет объединить их в одну – щелочно-ультраосновную – щелочно-базальтоидную, с выделением трех соответствующих субформаций.

Более ранняя точка зрения о генетическом родстве кимберлитовых и трапповых образований (Л.Н. Леонтьев, А.А. Меняйлов) не нашла

подтверждения при дальнейших исследованиях. Наряду с этим до сих пор дискуссионным и актуальным является вопрос о соотношении щелочно-оливин-базальтовой и щелочно-базальтоидной формаций. В работах Л.С. Егорова, Н.П. Суриной и др. по Маймеча-Котуйской провинции (северо-запад Сибирской платформы) приводится убедительный структурно-геологический материал о самостоятельности существования этих двух ассоциаций горных пород. Сходная картина наблюдается и в Приазовье (Гоньшакова и др., 1974).

Установление в пределах Восточного Приазовья новой, щелочно-ультраосновной — щелочно-базальтоидной формации в свою очередь определило поиски специфических на алмазы субщелочных ультрабазитов и позволило в дальнейшем обосновать принадлежность их к кимберлитам железо-титанистой ассоциации, которые по условиям образования близки породам эклогитовой фации.

Как известно, для наиболее глубоких алмазоносных кимберлитов характерен дунит-гарцбургитовый хромсодержащий минеральный парагенезис (форстерит, пироп, хромит).

Минеральная специфика субщелочных ультрабазитов Приазовья, как и кимберлитов Сибири, выражается в переменном составе типоморфных минералов — граната, ильменита, хромшпинелида с равномерным распределением входящих в их состав микроэлементов. Для исследуемых пород характерно присутствие граната пироп-альмандинового ряда, соответствующего по составу гранатам, связанным с эклогитами (Якутия) и заключенным в алмазах (Урал). Лиловый хромсодержащий пироп, характерный для дунит-гарцбургитовой ассоциации, в исследуемых породах не обнаружен, хотя в терригенных отложениях нижнего карбона он встречается.

Примечательной особенностью рассматриваемых пород является присутствие в тяжелой фракции протоочных проб редкого для земных пород высокотитанистого хромшпинелида ( $\text{Cr}_2\text{O}_3 = 24,88-42,65\%$ ,  $\text{TiO}_2 = 4,02-11,1\%$ ) наряду с пикроильменитом ( $\text{MgO} = 3,01-11,5\%$ ) и хромитом ( $\text{Cr}_2\text{O}_3 = 55,62\%$ )<sup>1</sup>. Для земных пород отмечен только один случай (устное сообщение Н.В. Соболева) нахождения высокотитанистого хромшпинелида (с содержанием  $\text{Cr}_2\text{O}_3 = 6,44\%$ ) в ассоциации с богатым хромом пиропом в обломке перидотита из кимберлита алмазоносной трубки "Удачная". Последнее обстоятельство представляется особенно важным, так как указывает на образование высокотитанистого хромшпинелида в условиях значительных глубин (больших давлений), в соответствии с данными Н.В. Соболева не превышающих, однако, 40 кбар (область устойчивости алмаза).

Как установлено в последнее время, титанохромиты отмечаются в лунных базальтах (Agrell et al., 1970; Haggerty et al., 1970, 1971), что объясняется низким окислительным потенциалом среды, в которой формируется вещество.

Железистость граната и оливина ( $\text{Fa} = 10-14\%$ ) согласуется с общей повышенной железистостью ультрабазитов Восточного Приазовья.

<sup>1</sup> Исследовано с помощью электронно-зондового микроанализатора (Н.В. Тронева) в лаборатории ИГЕМ АН СССР.

Присутствие в нижнекарбонových кластических отложениях Восточного Приазовья лиловых хромсодержащих пиропов, свойственных кимберлитам глубинных фаций, позволяет считать, что в рассматриваемом районе могут быть развиты и более глубинные — магнезиально-хромистые кимберлиты, характерные для других сегментов земного шара (Сибирь, Африка и др.).

Таким образом, полученные данные подтверждают специфику кимберлитовых пород Восточного Приазовья, указывая на меньшую глубину их образования по сравнению с магнезиально-хромистыми кимберлитами Восточной Сибири и Африки и тем самым расширяя диапазон образования пород кимберлитового ряда. Наряду с этим все изложенное свидетельствует о значительном сходстве магматических процессов, происходящих в пределах древних платформ, при определенном региональном их различии.

Выделенный щелочно-ультраосновной — щелочно-базальтоидный тип магматизма во времени совпадает с более поздними этапами развития платформ, отвечающими наиболее крупным геолого-тектоническим перестройкам последних (на Русской платформе средний палеозой, на Сибирской — ранний мезозой). Отсутствие в пределах некоторых древних платформ какого-либо из указанных формационных типов магматических горных пород и связанной с ними минерации может быть объяснено современным уровнем изученности региона, процессами денудации, геотектоническими особенностями развития и формирования региона, а также возможной гетерогенностью субстрата в отдельных регионах земного шара.

Различные формационные типы базит-гипербазитов платформ и свойственная им минерация определяются в основном исходным составом магм, глубиной их формирования и условиями становления.

Специфической особенностью локализации рассматриваемого типа формаций является связь их с глубинными разломами большой протяженности.

#### *Ультрамафитовый магматизм и метаморфизм*

Детальные петрографические исследования последнего времени позволяют высказать не совпадающие с общепринятыми соображения о генезисе альпинотипных гипербазитов и ассоциированных с ними пород контрастного состава.

На примере двух разновозрастных складчатых областей — Урала и Малого Кавказа — выявлено, что в формировании пород, слагающих мощные гипербазитовые пояса обоих регионов, главную роль играли процессы метаморфизма и метасоматоза (В.Ф. Морковкина). В противоположность стратиформным, дифференцированным от ультрабазитов до гранофилов интрузивам платформ для альпинотипных гипербазитов и ассоциированных с ними пород установлены различия в радиологическом возрасте и тектоническом положении массивов, перемещенных из глубинных частей Земли в твердом состоянии в более молодые образования.

Становление альпинотипных гипербазитов проходило в два резко разновозрастных и принципиально различных этапа. В раннем формиро-

валось тонкодисперсное ультрамафитовое вещество, сохраняющееся в настоящее время в виде реликтов во всех породах альпинотипных гипербазитовых ассоциаций (Морковкина и др., 1973)<sup>1</sup>. По химическому составу оно близко серпентинитам океанического дна, но принципиально отличается от типичных серпентинитов дисперсным строением, более магниальным составом и высоким содержанием FeO (2,71–2,90%), превышающим Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (2,19%).

Во втором, длительном этапе становления гипербазитовых ассоциаций происходило интенсивное метасоматическое и метаморфическое преобразование дисперсного вещества первого этапа. Среди петрогенных процессов установлены два принципиально различных вида: изохимические (перекристаллизация и дегидратация субстрата) и метасоматические, которые по ведущему минералу классифицируются как пироксенизация, фельдшпатизация, амфиболизация, карбонатизация, окварцевание и др.

Преимущественное развитие изохимических процессов привело в конечном итоге к образованию серпентинитов и существенно оливиновых пород — дунитов, гарцбургитов и всей серии переходных между ними и серпентинитами разновидностей.

Современный облик пород, слагающих гипербазитовые пояса, является следствием длительной метаморфической истории их развития (Морковкина и др., 1973). На основании химизма сосуществующих минералов и геохимических особенностей выявляется глубинный характер метасоматизма, реализовавшегося в условиях, соответствующих гранулитовым и эклогитовым фациям метаморфизма.

### *Формация эклогитов Полярного Урала*

На Полярном Урале Н.Г. Удовкиной впервые обнаружены и детально изучены эклогиты. В ряде посвященных им публикаций дан анализ минеральных ассоциаций пород эклогитовой группы с характеристикой геологии массивов эклогитов и сопряженных с ними образований. Выявлены соотношения собственно эклогитов с перидотитами, гранатовыми перидотитами, друзитами, габбро и гранитоидами. Геологические данные подкреплены многочисленными определениями абсолютного возраста пород.

Установлено, что в процессе эклогитизации плагиоклазовых перидотитов возникают породы с друзитовой структурой. На основании изучения геологии и данных радиологического датирования пород выяснено, что эклогиты и гранатовые перидотиты являются древнейшими образованиями на Полярном Урале. Марун-Кеусская структура, в пределах которой развиты эклогиты, выделена в самостоятельную.

На Урале впервые обнаружены муассонитсодержащие эклогиты, найдены и детально изучены специфические глиноземистые роговые обманки — каринтин и смарагдит. Установлено, что каринтин — единствен-

<sup>1</sup> Вопрос о времени появления дисперсного ультрамафитового вещества, близкого по составу к серпентинитам, и соотношении его с кристаллами оливина и пироксена требует дополнительных лабораторных данных. — Г.А.

ная разновидность роговой обманки, устойчивая с минералами эклогитового парагенезиса. Изучена структура каринтина (совместно с А.Л. Литвиным, ИФМ АН УССР). Она представляет собой роговую обманку с высокоупорядоченной структурой. Установлено, что эклогиты Полярного Урала представляют собой вторичные образования, возникшие в условиях земной коры.

Анализ вещественного состава эклогитов Урала, данные по абсолютному возрасту пород позволяют по-новому подойти к вопросу об источниках алмазов на Урале и Тимане; возможно, что ими были эклогиты, развитые в пределах метаморфических зон.

В современной литературе общепринято представление о том, что в природе существуют "мантийные" и "коровые" эклогиты. Глубинные образуются ниже поверхности Мохо, коровые — в условиях земной коры.

Изучение вещественного состава коровых эклогитов, друзитов и процессов эклогитизации плагиоклазовых перидотитов Урала, Казахстана и Тянь-Шаня позволило сделать вывод о том, что в ходе эклогитизации ультраосновных пород в условиях земной коры возникают минеральные парагенезисы, присущие мантийным эклогитам. Сравнительный анализ вещественного состава эклогитов различных генетических типов Полярного Урала, Тянь-Шаня, Казахстана, Якутии, Польши, ГДР, ФРГ и других регионов показал близость химического состава глубинных и коровых эклогитов. Они различаются лишь содержанием и распределением редких, редкоземельных и радиоактивных элементов в породах, породообразующих и акцессорных минералах. Так, по сравнению с глубинными коровые эклогиты богаче U и Th. Если поведение этих элементов в глубинных эклогитах коррелируется с содержанием калия в породах, то для коровых эклогитов такой закономерности не наблюдается. Выявлена определенная зависимость характера распределения редкоземельных элементов в эклогитах от их генетического типа. Установлено, что в коровых эклогитах уран концентрируется главным образом в рутиле.

Акцессорные минералы эклогитов могут быть критерием для оценки геохимических условий формирования пород.

### *Анортозиты*

До недавнего времени проблема анортозитов казалась чисто теоретической, не затрагивающей коренных вопросов геологии. Предполагалось, что анортозиты в основном распространены в пределах щитов, а их неясный генезис принято было относить к одной из бесчисленных загадок природы, не первостепенных по важности решения.

В свое время проблема анортозитовых ассоциаций рассматривалась ведущими советскими учеными — Г.Д. Афанасьевым, А.П. Виноградовым, А.Н. Заварицким, Ю.А. Кузнецовым, А.П. Лебедевым, Ф.Ю. Левинсоном-Лессингом, И.И. Малышевым, Н.П. Михайловым, Е.В. Павловским, Н.В. Павловым, А.А. Полкановым, Ю.И. Половинкиной, В.С. Соболевым, К.А. Шуркиным и др. За рубежом наиболее полной сводкой по анортозитам и ассоциированным с ними породам являются труды специального симпозиума, состоявшегося в США в 1966 г.

Однако исследования последних лет заставили пересмотреть некоторые привычные представления во многих областях геологии и вызвали повышенный интерес к проблеме анортозитов. Этот интерес объясняется главным образом следующими обстоятельствами.

Анортозиты чрезвычайно широко распространены в земной коре. Они входят в состав дифференцированных габброидных плутонов или образуют громадные докембрийские самостоятельные массивы.

Согласно данным глубинного бурения, анортозиты развиты не только в пределах шитов. Не менее широко они распространены в доколе древних платформ, где залегают также в виде огромных массивов.

Данные радиологии показали, что в некоторых регионах Земли анортозиты являются одними из самых древних пород.

Успехи космических исследований принесли одну из главных сенсаций космической геологии — широкое развитие анортозитов на Луне. Это открытие показало общность направленности некоторых геологических процессов, происходящих на Земле и на Луне, и актуальность изучения анортозитовых ассоциаций, играющих важную роль в процессах дифференциации оболочек планет.

В ИГЕМ АН СССР в последние годы были детально изучены анортозитовые ассоциации Западной Латвии, Украины, Карелии, Восточной Польши и др. (Богатиков, Биркис, 1972). Опубликован сборник статей "Анортозиты СССР" (1974), в котором собран новейший материал по геологии и петрографии семи главных анортозитовых провинций СССР — Кольской, Прибалтийской, Украинской, Волго-Уральской, Анабарской, Алданской и Охотской. Опубликована специальная статья, касающаяся сопоставления некоторых особенностей земных и лунных анортозитов (Богатиков, 1973). Наконец, в совместном докладе на II Региональном петрографическом совещании по Русской платформе (Биркис и др., 1972) изложены результаты коллективных исследований анортозитов Русской платформы.

Таким образом, интенсивные исследования анортозитовых ассоциаций (главным образом докембрийских), выполненные в последние годы, позволили сделать следующие выводы.

1. В настоящее время можно считать установленным, что главная масса анортозитовых ассоциаций имеет магматическое происхождение. Изотопное отношение кислорода в них очень близко к изотопному отношению кислорода в плагиоклазах магматических габброидов, а также в лунных анортозитах и в плагиоклазах из лунных норитов.

2. Изучение дифференцированных базитовых интрузий, в которых анортозиты являются закономерными членами ассоциации, показало, что эти массивы формировались в относительно спокойной тектонической обстановке. Видимо, спокойные тектонические условия можно считать одним из главных факторов появления анортозитов в фанерозое и докембрии.

3. Анортозитообразование характерно практически для всей докембрийской истории Земли и происходило в относительно жестких структурах, в связи с чем выделяются докембрийские анортозиты:

- а) этапа зарождения древних платформ ("друзитовый" комплекс Беломорья, Кандалакшский и Колвицкий массивы);
- б) этапа становления древних платформ (Джугджур, Анабар);
- в) этапа стабилизации древних платформ (Украина, Западная Латвия и др.).

4. Анортозиты этапа стабилизации древних платформ, с которыми ассоциируются также массивы близких им по возрасту гранитоидов (чаще рапакиви), образуют громадные пояса, приуроченные к окраинам древних платформ. Таков, например, пояс анортозитов и ассоциированных с ними пород, обрамляющий с запада Восточно-Европейскую платформу (Богатиков, Биркис, 1972).

5. Анортозиты не являются эвтектоидными образованиями. Напротив, они относятся к наиболее высокотемпературным (тугоплавким) среди ассоциированных с ними пород. Другими словами, анортозитовый расплав не мог селективно выплавляться из гипотетической мантии, а следовательно, анортозиты — "коровые" образования и генезис их надо связывать с плавлением и кристаллизацией материала литосферы, средней состав которой, по данным большинства исследователей, отвечает составу андезита (Афанасьев, 1969), а мощность, согласно К. Конди (Condie, 1973), оставалась неизменной с архея.

6. Установлено, что в ассоциации с анортозитами находится широкий круг горных пород (габброиды, сиениты, граниты и др.), причем их объем не является строго постоянным. В то же время средневзвешенный состав родоначальной магмы для анортозитовых комплексов колеблется от базальтового до кварц-диоритового, отражая таким образом мозаичное строение Земли. Количество гранитного материала, ассоциированного с анортозитами, зависит от состава первичной магмы. Видимо, максимальный кислый состав такой магмы был для протерозойской ассоциации анортозитов — рапакиви, а наиболее основной (базальтовый) — для базитовых расслоенных интрузий ассоциации перидотит — габбро-анортозит.

Во всех случаях анортозиты являются продуктом сегрегации твердых кристаллов плагиоклаза и не образуют первоначального самостоятельного анортозитового расплава (за исключением случаев частичного плавления анортозитов). Эти выводы хорошо согласуются с последними экспериментальными данными по плавлению различных типов пород при давлениях 0—13,5 кбар (Грин, 1968).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренный круг проблем, разрабатываемых петрографами ИГЕМ в области геологической петрологии, показывает принципиально важное значение этого направления для большинства задач геологии и ее разделов и для сопредельных наук — геофизики, геохимии и др.

Проведенный обзор показывает, в частности, индикаторное значение многих формаций изверженных пород для выявления структурно-тектонического состояния отдельных участков земной коры в прошлые геологические эпохи. Таковы диабаз-кератофировая формация в фации зе-

ленных сланцев, силловая долеритовая, формации щелочных пород, в том числе щелочных гранитов.

Изучение развития магматизма во времени для отдельных участков земной коры показывает последовательность развития во времени и пространстве подвижных поясов, их эволюцию с развитием специфических формаций изверженных пород.

Пример Кавказской горноскладчатой системы показывает реальность повторного вовлечения раздробленного платформенного основания в геосинклинальные условия развития.

Петрографическое изучение формаций изверженных горных пород из разных участков континентов во времени в увязке с выяснением развития тектонических обстановок составляет фундаментальную основу знаний о веществе нашей планеты и его эволюции во времени. Значение петрографических исследований для решения практических задач геологии было проиллюстрировано примерами связи магматизма и рудной минерализации, выявленными при характеристике отдельных конкретных формаций.

Некоторые области познания нашей планеты требуют расширения петрографического подхода с позиций учения о конкретных формациях изверженных пород. Сюда относятся все интенсивнее развивающиеся палеовулканологические исследования. На основе их одних, без обязательного петрологического изучения вещества горных пород вулканических формаций, решение фундаментальных проблем вулканизма в истории Земли невозможно.

Загадка Мирового океана — строение его дна — не может решаться без применения петрографического метода с позиций учения о конкретных формациях изверженных пород. В частности, наступило время подойти с этих позиций и к изучению ассоциаций изверженных пород, слагающих срединно-океанические хребты. Намечающиеся формации зеленокаменных 'эффузивов, габброидов, серпентинитов и плагиогранитных пород, сходные с альпийскими ассоциациями пород континентов, требуют сравнительного петрографического изучения.

Систематическое петрографическое изучение ксенолитов фундамента, вынесенных при извержениях вулканов, образующих острова в ряде глубоководных частей Мирового океана (Северная и Южная Атлантика, Тихий океан и др.), позволит получить объективную информацию о строении и составе глубоких горизонтов коры под океанами.

Несомненно, фундаментальные данные по петрографии Земли окажутся существенными для будущих исследований вещества других планет нашей Солнечной системы.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Александров К.С., Рыжова Т.В.* Упругие свойства породообразующих минералов. II. Слоистые силикаты. — Изв. АН СССР, серия геофиз., 1961, № 12.
- Александров К.С., Рыжова Т.В.* Упругие свойства породообразующих минералов. IV. Нефелин. — Изв. АН СССР, серия геофиз., 1962, № 12.
- Андерсон Д.Л.* Пластичный слой в земной мантии. — В кн. "Верхняя мантия Земли". "Мир", 1965.
- Андреева Е.Д.* Щелочной магматизм Кузнецкого Алатау. "Наука", 1968.

- Анортозиты СССР. "Наука", 1974.
- Афанасьев Г.Д.* Гранитоиды древних интрузивных комплексов Северо-Западного Кавказа. Изд-во АН СССР, 1950.
- Афанасьев Г.Д.* Геология магматических комплексов Северного Кавказа и основные черты связанной с ним минерализации. Изд-во АН СССР, 1958.
- Афанасьев Г.Д.* О петрографической интерпретации геофизических данных в строении земной коры. — Изв. АН СССР, серия геол., 1960, № 7.
- Афанасьев Г.Д.* Новые данные о соотношениях земной коры и верхней мантии. — Изв. АН СССР, серия геол., 1966, № 11.
- Афанасьев Г.Д.* Некоторые геологические и геофизические факты и их интерпретация в отношении состава и строения земной коры. — Изв. АН СССР, серия геол., 1967, № 5.
- Афанасьев Г.Д.* О границе земной коры и верхней мантии. XXIII сессия МГК. Докл. сов. геологов. "Наука", 1968.
- Афанасьев Г.Д.* О некоторых вопросах изучения базитового вулканизма. — Изв. АН СССР, серия геол., 1969, № 3.
- Афанасьев Г.Д.* Строение и состав земной коры в связи с проблемами геологической петрологии. — Изв. АН СССР, серия геол., 1970, № 11.
- Афанасьев Г.Д.* О строении и составе верхней оболочки Земли. — Изв. АН СССР, серия геол., 1973, № 4.
- Афанасьев Г.Д., Кожина Т.К., Старик И.Е.* Результаты определения аргоновым методом возраста эталонных проб мусковита, биотита и микроклина. XXI сессия МГК. Докл. сов. геологов. Изд-во АН СССР, 1960.
- Афанасьев Г.Д., Баюк Е.И., Беликов Б.П.* Физические свойства горных пород в структурно-формационных зонах Северного Кавказа и их значение для интерпретации геофизических данных. — Изв. АН СССР, серия геол., 1965, № 9.
- Афанасьев Г.Д., Зыков С.И.* Итоги сверки эталонной пробы Т/65 в геохронологических лабораториях СССР. — Изв. АН СССР, серия геол., 1968, № 3.
- Афанасьев Г.Д., Баюк Е.И., Беликов Б.П., Воларович М.П., Ефимова Г.П., Левыкин А.И.* Исследование скоростей упругих волн некоторых породообразующих минералов при давлениях до 20 кбар. — Докл. АН СССР. Геофизика, 1971, 201.
- Афанасьев Г.Д., Борсук А.М., Кондаков Л.А., Лупанова Н.П., Плошко В.В.* Конкретные магматические формации Северного Кавказа. — Изв. АН СССР, серия геол., 1971, № 7.
- Афанасьев Г.Д., Зыков С.И.* О результатах измерения сверочной пробы "монахит-68". — Изв. АН СССР, серия геол., 1973, № 6.
- Базальты плато. XXII сессия МГК. Докл. сов. геологов. "Наука", 1964.
- Базит-гипербазитовый магматизм и минералогия юга Восточно-Сибирской платформы (Отв. ред. В.И. Гоньшикова). "Недра", 1973.
- Биркис А.П., Богатилов О.А., Богданова С.В., Дагелайская И.Н., Личак И.Л., Мошкин В.Н., Шарков Е.В., Шуркин К.Н.* Докембрийские анортозиты Русской платформы. — Тезисы Совещ. по петрографии Русской платформы. Воронеж, 1972.
- Богатилов О.А., Биркис А.П.* Габбро-лабрадоритовый пояс запада Русской платформы. — В кн. "Магматизм, формации кристаллических пород и глубины Земли". "Наука", 1972.
- Богатилов О.А.* Анортозиты Земли и Луны — опыт сравнения. — В кн. "Геохимия, минералогия, петрография", т. 7. М., 1973.
- Борсук А.М.* Петрология мезозойских магматических комплексов западного окончания Главного Кавказского хребта. — Труды ИГЕМ АН СССР, 1963, вып. 86.
- Воробьева О.А.* Главные типы нефелиновых щелочных пород, их возраст и особенности минерализации. — В кн. "Магматизм и связь с ними полезных ископаемых". Госгеолтехиздат, 1960.
- Воробьева О.А.* Генетические особенности и минерализация щелочных пород. XXII сессия МГК. Докл. сов. геологов, проблема 5. "Наука", 1964.
- Воробьева О.А.* Проблема щелочного магматизма. — В кн. "Проблема магмы и генезис изверженных горных пород". "Наука", 1969.

- Воробьева О.А., Яшина Р.М., Свешникова Е.В., Кононова В.А., Андреева Е.Д.* Условия формирования щелочных пород (на материалах СССР). XXIV сессия МГК. Докл. сов. геологов, проблема 14. Минералогия. "Наука", 1972.
- Геология и петрография трапповых формаций (под ред. А.П. Лебедева). ИЛ, 1950.
- Гоньшакова В.И.* и др. К вопросу о кимберлитовом магматизме в Приазовье. — Изв. АН СССР, серия геол., 1974, № 2.
- Грин Т.Х.* Экспериментальное исследование генезиса анортозитов при высоких давлениях. — В кн. "Петрология верхней мантии". "Мир", 1968.
- Дмитриев Ю.И.* Траппы и исландский шпат р. Чопы. изд-во АН СССР, 1963.
- Дмитриев Ю.И.* Мезозойский трапповый вулканизм в центре и на периферии Тунгусской синеклизы. — Изв. АН СССР, серия геол., 1973, № 10.
- Дмитриев Ю.И.* Принципы расчленения интрузивных траппов Сибирской платформы. — В сб. "Актуальные вопросы современной петрографии". "Наука", 1973<sub>2</sub>.
- Дмитриев Ю.И., Гусева А.И.* Зависимость состава и рудоносности интрузивных траппов от структурно-литологической обстановки проявления магматизма. — В сб. "Магматизм и рудообразование". "Наука", 1974.
- Дорман Л.С., Сурина Н.П.* О пространственно-временной связи различных типов платформенного магматизма (на примере Маймеча-Котуйской провинции). — Материалы IV Всес. петрогр. совещ. Изд-во АН АзербСССР, Баку, 1969.
- Егоров Л.С., Сурина Н.П.* О пространственно-временной связи различных типов платформенного магматизма (на примере Маймеча-Котуйской провинции). — Материалы IV Всес. петрогр. совещ. Изд-во АН АзербСССР, Баку, 1969.
- Ефремова С.В.* Об интрузивах щелочных (рибекитовых) гранитов Бетпак-далы. — Изв. АН СССР, серия геол., 1962, № 10.
- Ефремова С.В.* Дайки в гранитоидных комплексах Центрального Казахстана. "Наука", 1970.
- Кондаков Л.А.* Мезозойский магматизм юго-восточной части Лабино-Малкинской структурно-формационной зоны (Северный Кавказ). "Наука", 1974.
- Кононова В.А.* Уртит-йолитовые интрузии Тувы и некоторые вопросы их генезиса. — Труды ИГЕМ АН СССР, 1961, вып. 60.
- Кононова В.А.* О роли магматических и метасоматических процессов при формировании мельгейтит-уртитовых серий. — В кн. "Геохимия, петрология и минералогия щелочных пород". "Наука", 1971.
- Кононова В.А., Гартман И.А.* Мельгейтит-уртитовая серия пород — продукт эволюции глубинных магм. — В кн. "Современные проблемы петрологии". "Наука", 1974.
- Кононова В.А., Шанин Л.Л.* О радиогенном аргоне в нефелине в связи с вопросом о его пригодности для датирования щелочных комплексов. — В кн. "Геолого-радиологическая интерпретация значений возраста". — Труды XVI сессии МГК. "Наука", 1973.
- Коптев-Дворников В.С.* К вопросу о некоторых закономерностях формирования интрузивных комплексов гранитоидов (на примере Центрального Казахстана). — Изв. АН СССР, серия геол., 1952, № 4.
- Коптев-Дворников В.С.* Палеозойские интрузивные комплексы Бетпакдала. Том 1. Изд-во АН СССР, 1960.
- Коптев-Дворников В.С.* Палеозойские интрузивные комплексы Бетпакдала. Том 2. Изд-во АН СССР, 1962.
- Коптев-Дворников В.С., Павлов В.А., Пламеневская Н.Л., Царева Г.М., Яшухин О.И.* Некоторые проблемы изучения надинтрузивных зон гранитоидных массивов (на примере Центрального Казахстана). — Сов. геол., 1971, № 1.
- Коптев-Дворников В.С., Руб М.Г.* Критерии связи оруденения с интрузивными комплексами. — В кн. "Критерии связи оруденения с магматизмом применительно к изучению рудных районов". "Наука", 1965.
- Кузнецов Ю.А.* Главные типы магматических формаций. "Недра", 1964.
- Левинсон-Лессинг Ф.Ю.* Олонеккая диабазовая формация. Труды СПб. общества естествоиспыт., 1888, вып. 19.
- Леликов Е.П., Васильев Б.П.* Петрография и геохимия гранитов подводной возвышенности Ямато (Японское море). Изв. АН СССР, серия геол., 1974, № 5.

- Лупанова Н.П.* Формации магматических пород нижнего и среднего палеозоя (Северный Кавказ). "Наука", 1975.
- Мак-Кензи Д.П.* Граница Мохоровичича. — В сб. "Земная кора и верхняя мантия". "Мир", 1972.
- Минералогия Сибирской платформы (под ред. П.М. Татарина и Ю.Г. Старицкого). "Недра", 1970.
- Морковкина В.Ф., Гаврилова С.И., Кузьмина О.В.* К вопросу о гетерогенности альпийских гипербазитов и слагающих их оливинов. — В сб. "Актуальные вопросы петрологии". "Наука", 1973.
- Негрей Е.В.* О дифференциации при становлении гранитных интрузий формирования малых глубин на примере формирования дополнительных интрузивов (Центральный Казахстан). — В сб. "Редкометалльные граниты и проблемы магматической дифференциации". "Недра", 1972.
- Негрей Е.В., Волков В.Н.* Вертикальная зональность Раумидского гранитоидного интрузива, вскрытого по вертикали на два километра. — В кн. "Актуальные вопросы современной петрографии". "Наука", 1974.
- Павлов В.А.* Структурные особенности некоторых пермских гранитных массивов Центрального Казахстана. "Наука", 1964.
- Петрография Восточной Сибири, т. 1. Изд-во АН СССР, 1962.
- Плошко В.В.* Уруштенский комплекс Северного Кавказа (геология, петрография и акцессорная минерализация). "Наука", 1965.
- Полквой О.С.* Образование жильных пород кислых интрузий (Центральный Казахстан). Изд-во АН СССР, 1950.
- Свешникова Е.В.* Магматические комплексы центрального типа. "Недра", 1973.
- Свешникова Е.В., Князева Д.Н., Дмитриева М.Т.* Метамиктные ториты щелочных пород Енисейского кряжа. — Труды Мин. муз. АН СССР, 1964, вып. 15.
- Свешникова Е.В., Бурова Т.А.* Минералы группы сфалерита и титанрозенбушита из нефелиновых сиенитов Заангарья. — Труды Мин. муз. АН СССР, 1973, вып. 22.
- Траппы Сибирской платформы и их металлогения (Тезисы докл. II Всес. совещ.). Иркутск, 1971.
- Урделл Дж., Шерберт Г.Л.* Интерпретация аномалий силы тяжести на основании стандартных колонок земной коры океанов и материков. — В сб. "Земная кора". ИЛ, 1954.
- Щелочные породы Сибири. Изд-во АН СССР, 1962.
- Щелочной магматизм складчатого обрамления юга Сибирской платформы. "Наука", 1965.
- Яшина Р.М.* О контактно-реакционном взаимодействии нефелин-сиенитовой интрузии с габброидами на примере зонально-кольцевой структуры Коргеретабинского массива Юго-Восточной Тувы. — В кн.: Щелочной магматизм складчатого обрамления юга Сибирской платформы. "Наука", 1965.
- Яшина Р.М., Кононова В.А.* Новые месторождения глиноземсодержащего сырья в Тувинской автономной области. Бюл. НТИ ВИМС, 1969, № 4.
- Яшина Р.М.* О формационном анализе щелочных пород длительно развивавшейся складчатой области. — В сб. "Актуальные проблемы петрологии". "Наука", 1974<sub>1</sub>.
- Яшина Р.М.* Щелочные формации сводово-глыбовой области и их металлогеническая специфика. — В сб. "Закономерности полезных ископаемых", т. XI. "Наука", 1974<sub>2</sub>.
- Afanass'yev G.D.* L'interprétation pétrographique des données géophysiques sur la structure du Pécorel terrestre. — Bull. Soc. geol. France, sér. 7, 1961.
- Afanass'yev G.D.* On the Boundary delimiting the Earth's Crust and the Upper Mantle. Internat. Geol. Congr. Rept of the XXIII Sess. Prague, Sect. 1, 1968.
- Afanass'yev G.D., Brandt S.B., Bagdassaryan G.P., Gorokhov J.M., Dunayev V.A., Zykov S.J., Rubinstein M.M.* Summarized Analyses of Standards. — Eclogae geol. Helv., 63. N 1, 1970.
- Agrell S.O., Scoon S.H.* Observations on the chemistry, mineralogy and petrology of some Apollo 11 samples. — Lunar Sci. Conf., 1, 1970.

- Condir K.E. Archean Magmatism and Crustal Thickening. — Bull. Geol. Soc. Amer., 84, N 9, 1973.
- Ewing I., Ewing M. Seismic-refraction measurements in the Atlantic Ocean basins, in the Mediterranean Sea, on the Mid-Atlantic Ridge and in the Norwegian Sea. — Bull. Geol. Soc. Amer. 70, N 3, 1959.
- Haggerty S.E., Meyer H.O. A. Apollo 12: Opaque Oxides. — Earth Planet. Sci. Let., N 9, 1970.
- Haggerty S.E., Meyer H.O.A. Apollo 12: Opaque Oxides. — Lunar. Sci. Conference. Abstr. 2, 1971.
- Simmons G. Velocity of compressional waves in various minerals at pressures to 10 kb. — J. Geophys. Res., 69, N 6, 1964.
- Wyllie P.L., Tuttle O.F. Experimental investigation of silicate system containing two volatile components. The effects of  $\text{NH}_3$  and HF in addition to  $\text{H}_2\text{O}$ , on the melting temperatures of albite and granites. — Amer. J. Sci., 259, N 2, 1961.
- Shibata K., Adachi Mamoru. Rb-Sr and K-Ar geochronology of metamorphic rocks of the Kamioyo conglomerate, Central Japan. — J. Geol. Soc. Japan, 78, N 5, 1972.

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЯ

Экспериментальное изучение условий образования минералов, руд и горных пород с целью расшифровки процессов минерало-, рудо- и породообразования проводится в отделе физико-химического эксперимента ИГЕМ АН СССР. Работы эти, основанные на экспериментальном методе, имеют конечную цель — выяснение механизма глубинных геологических процессов.

В рамках сформулированного выше направления разрабатывались три главные проблемы.

1. Экспериментальное изучение и термодинамический анализ условий образования магм и магматогенных растворов (в минеральных системах с летучими компонентами).

2. Исследование механизма и кинетики высокотемпературных превращений в минералах методами термического анализа.

3. Исследование высокотемпературных равновесий в силикатных системах, важных для петрологии и технического минералообразования.

## УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ МАГМ И МАГМАТОГЕННЫХ РАСТВОРОВ НА ПРИМЕРЕ МИНЕРАЛЬНЫХ СИСТЕМ С ЛЕТУЧИМИ КОМПОНЕНТАМИ

Переходя к характеристике основных результатов по первой из перечисленных проблем, необходимо отметить, что логическим основанием этих работ явилось изучение состояния и термодинамических свойств воды в магматических расплавах. Была определена растворимость воды в расплавах системы  $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ , а также в гранитном расплаве при давлениях до 12000 атм (Островский и др., 1964; Орлова, 1971). Этими же исследователями были измерены парциальные мольные объемы воды и ряд других свойств синтезированных водно-силикатных стекол (Островский, Орлова, 1966; Орлова, 1971). На основе полученных данных были в значительной мере видоизменены существовавшие ранее представления об условиях отделения водных флюидов от магмы. В частности, было показано, что распределение воды в магматическом резервуаре по вертикали характеризуется значительно меньшими градиентами концентрации, чем это предполагалось предыдущими исследователями, т.е. на основании этих данных можно утверждать, что гравитационная дифференциация в гомогенной магме вряд ли является

существенным петрогенетическим фактором. Далее, исходя из результатов по растворимости водяного пара в расплавленных силикатах и мольных объемах воды в силикатных жидкостях, были рассчитаны термодинамические свойства водно-силикатных систем и построены их ликвидусные диаграммы в области недосыщения в отношении чистого водяного пара. Это позволило использовать экспериментальные данные для систем силикат — вода в качестве основы для рассмотрения более сложных и ближе отвечающих природным условиям систем с несколькими летучими компонентами, на чем мы остановимся ниже.

И.А. Островский расширил область исследования систем силикат — вода вплоть до давлений, характерных для условий мантии Земли. Важные результаты были получены им в системе  $\text{SiO}_2\text{—H}_2\text{O}$  на основе усовершенствованной им техники anvилей Бриджмена с внутренним нагревателем. В этой системе им были установлены P—T координаты равновесного перехода коусит — стишовит (Островский, 1965). Тем самым впервые в истории физико-химической петрологии было произведено экспериментальное исследование минерального равновесия при давлениях порядка 100 000 атм (ранее выполнялись только синтезы минералов в этой области), а также впервые было количественно изучено минеральное равновесие с участием фаз, в которых кремний входит как в четверной, так и в шестерной координации. Результаты опытов И.А. Островского были в дальнейшем полностью подтверждены экспериментальными и термодинамическими данными зарубежных исследователей. Тем же методом И.А. Островский изучил ряд других минеральных равновесий и, в частности, были проведены опыты в системе форстерит — вода.

Анализ термодинамических констант модификаций кремнекислоты позволил И.А. Островскому (1971) предложить новые уравнения для равновесий кварц — коусит и коусит — стишовит, совпадающие с надежными экспериментальными данными. Они могут использоваться для калибровки аппаратуры. Эти же данные позволили оценить количества энергии, освобождающейся при превращении метастабильных форм кремнекислоты, что важно для понимания причин сейсмических явлений.

И.А. Островским было также произведено теоретическое рассмотрение равновесий в открытых системах. Он пришел к определенному мнению о приложимости равновесной теории открытых систем только к мембранным равновесиям.

Как уже указывалось, результаты исследований систем силикат — вода были использованы в качестве основы для изучения силикатных систем с несколькими летучими компонентами. Важнейшим дополнительным летучим компонентом минеральных систем является  $\text{CO}_2$ , в связи с чем была поставлена серия экспериментальных исследований системы гранит —  $\text{H}_2\text{O—CO}_2$  (Орлова, 1973). В результате была определена растворимость воды и двуокиси углерода в гранитном расплаве, находящемся в равновесии с флюидом смешанного состава. Установлено, что растворимость углекислоты не превышает  $0,5 \pm 0,2$  вес.% при  $1000^\circ\text{C}$ , максимальном давлении 4000 атм и мольной доле воды во флюиде 0,3—0,7. Методом ИК-спектроскопии выявлено присутствие молекулярной двуокиси углерода в структуре закаленного стекла. Растворимость воды

в гранитных расплавах уменьшается параллельно снижению мольной доли воды в равновесном флюиде  $H_2O + CO_2$ . На основании термодинамической обработки полученных данных установлено идеальное поведение  $H_2O$  и  $CO_2$  в сжатом газе при параметрах магматического процесса вплоть до давлений порядка 4 000 атм и рассчитана диаграмма плавкости системы гранит —  $H_2O-CO_2$ .

Рассмотрение этой диаграммы показало, что при средних содержаниях  $H_2O$  и  $CO_2$  в гранитных магмах их кристаллизация должна начаться в интервале температур 900–800°C, причем в первых порциях магматического флюида преобладает  $CO_2$  (> 50 мольн. %), а затем содержания двуокси углерода в газовой фазе падают, приближаясь на позднемагматической стадии к 10 мольн. %. Подобный характер эволюции магматического флюида хорошо согласуется с имеющимся литературным материалом по первичным газовой-жидким включениям в минералах гранитоидов.

Наряду с водой и  $CO_2$  важными компонентами магматических флюидов являются соли и в первую очередь хлориды. Это послужило причиной детального изучения минеральных равновесий с участием воды и солей при параметрах магматического процесса (Рябчиков, 1969, 1975). Было установлено, что растворимость хлоридов в гранитном расплаве чрезвычайно низка (не выше 0,3 вес. % Cl), в результате чего при кристаллизации гранитных магм на глубинах не более 5 км наряду с газовой фазой должно наблюдаться ликвационное отделение второй водно-солевой жидкости. Вследствие этого температуры кристаллизации породообразующих минералов и растворимость воды в силикатном расплаве системы гранит — хлориды — вода практически не отличаются от таковых для граничной бессолевого системы гранит — вода, т.е. хлориды играют на магматической стадии в кислых интрузивных системах весьма пассивную роль. В то же время их значение в мобилизации рудного вещества и метасоматических магматогенных процессах чрезвычайно велико, что было выявлено на основе изучения минеральных систем с водой, хлоридами и рудными металлами.

Эти исследования позволили оценить рудогенерирующие способности гранитоидных интрузий. Было установлено, что из гранитоидных интрузий с нормальными содержаниями рудных и анионогенных элементов в водную фазу переходят массы железа и халькофильных металлов (Zn, Cu, Pb), сравнимые с запасами промышленных месторождений (Рябчиков, 1970, 1975). Таким образом, так называемая геохимическая специализация магм на эти металлы не является необходимым условием формирования рудной минерализации. Кроме того, из полученных данных следует, что в условиях повышенных температур и давлений халькофильные элементы мобилизуются в значительных количествах в раствор и при взаимодействии пластовых хлоридных вод с метаморфизируемыми осадками, содержащими кларковые количества рудных компонентов.

Металлы литофильного семейства интенсивно переходят в водный флюид только в магматических системах, обогащенных фтором и претерпевших фракционирование твердых фаз на стадии кристаллизации силикатного расплава, откуда вытекает, что связь фторофильных рудных элементов с экзогенными источниками маловероятна.

Олово занимает промежуточное положение между халькофильными и литофильными металлами, так как при максимальной кислотности гранитоидов оно заметно мобилизуется хлоридными растворами, но этот процесс еще более интенсифицируется в присутствии фтора, о чем свидетельствует возрастание коэффициентов распределения олова между водной фазой и гранитным расплавом в присутствии флюорита и топаза по сравнению с бесфтористыми системами, а также преимущественным переходом олова в богатый фторидами расплав при равновесии двух жидких фаз (Ryabchikov, Durasova, Barsukov, 1974).

К работам о силикатных системах с несколькими летучими компонентами примыкают и исследования, проведенные Т.Б. Карпинской (Карпинская и др., 1965) по синтезу минералов в присутствии водно-аргонового флюида, хотя эти результаты имеют большее значение для решения геохронологических проблем.

Т.Б. Карпинская совместно с Л.Л. Шаниным впервые провела опыты по внедрению аргона в мусковит при высоких температурах и значениях суммарного давления аргона и воды до 15 000 атм. Синтезированные аргонсодержащие мусковиты детально изучены методами рентгеноструктурного анализа, что позволило установить вхождение аргона в мусковит на место иона калия. Полученные результаты свидетельствуют о возможности не только занижения, но и существенного завышения определений абсолютного возраста по калий-аргоновому методу при наличии в глубинных флюидах даже небольших концентраций аргона.

Таким образом, главным результатом исследований по первой проблеме явилось выяснение основных закономерностей флюидного режима магматических систем. На основании полученного экспериментального материала и термодинамических расчетов оказалось возможным оценить параметры, при которых выделяется магматическая газовая фаза, и характер ее эволюции в ходе охлаждения гранитных магм усредненного состава, причем учтено поведение всех главных летучих составляющих —  $H_2O$ ,  $CO_2$ , соединений S, F, Cl. Даны методические установки, позволяющие провести расчеты для конкретных природных систем с учетом отклонений от средних геохимических характеристик. Введение рудных металлов в системы с летучими компонентами позволило оценить максимальную рудогенерирующую способность магматических систем, что вносит определенный вклад в развитие теории гидротермального рудообразования.

#### ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА И КИНЕТИКИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В МИНЕРАЛАХ

Переходя далее ко второй проблеме, следует отметить, что здесь основным объектом исследований также являются минеральные реакции с летучими компонентами типа гидратации-дегидратации, декарбонизации и т.д., но основной акцент делается не на изучение равновесных состояний, как это было в исследованиях по первой проблеме, а на выяснение кинетических параметров (т.е. скоростей процессов в зависимости от их

температуры и других факторов) и механизмов реакций. Вопросы кинетики высокотемпературных гетерогенных превращений, к которым относится большинство эндогенных процессов, чрезвычайно сложны и в методическом и в теоретическом плане. Тем более ценно, что в лаборатории термического анализа минералов решение этих важных для развития теории глубинных процессов проблем ведется на основе такого экспрессного метода, каким является термический анализ.

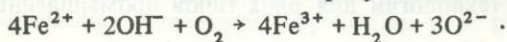
Основные результаты, полученные по второй из сформулированных в начале данного обзора проблем (исследование механизма и кинетики высокотемпературных превращений в минералах) за 1965–1974 гг., сводятся к следующему.

В развитии теории термического анализа (Г.О. Пилоян) был разработан метод определения энергии активации реакций, происходящих в минералах при высоких температурах, по термографическим данным. Этот метод получил признание как в СССР, так и за рубежом (ряд статей в журнале Американского химического общества и т.д.). Кроме того, была выведена система уравнений, позволяющая проводить с помощью ЭВМ математическое моделирование термографического эксперимента. Такой подход позволяет открыть новые закономерности в теории, наметить новые области применения термического анализа.

Важным достижением следует считать также разработку теории термографического метода определения термостабильности некоторых кристаллических структур.

Основные результаты систематических исследований высокотемпературных превращений в минералах из группы амфиболов, водных фосфатов, хлоритов и каолина (Г.О. Пилоян, А.Г. Котлова, Н.И. Щепочкина, З.П. Ершова, Б.М. Кобцев) могут быть кратко суммированы следующим образом.

1. Изучен механизм окисления  $Fe^{2+}$  в водных силикатах (амфиболах, хлоритах). Вопреки общепринятому мнению, что окисление  $Fe^{2+}$  происходит за счет групп  $OH^-$  с выделением водорода, показано, что окисление  $Fe^{2+}$  возможно только в присутствии кислорода по схеме



2. Методами  $\gamma$ -резонансной (мессбауэровской) спектроскопии и ИКС совместно с ДТА впервые изучено изменение катионного распределения  $Fe^{2+}$  и  $Mg^{2+}$  в структуре амфиболов при нагревании. Показано, что способность к окислению иона  $Fe^{2+}$  сильно зависит от положения его в структуре.  $Fe^{2+}$  в позиции  $M_4$ , например, не окисляется до разрушения кристаллической структуры амфибола.

3. Разработаны методы и проведен синтез ряда водных фосфатов алюминия, железа, магния, меди и т.д. Методами высокотемпературной рентгенографии и ДТА установлен фазовый переход между двумя метастабильными фазами варисцита, что представляет определенный теоретический интерес.

4. Разработаны термографические методы количественного фазового анализа бокситов, карбонатов, количественного определения галлузита в глинах.

5. Получены эталонные термограммы свыше 30 минералов из группы амфиболов, фосфатов, хлоритов, цеолитов, боратов.

6. Разработан метод определения термостабильности синтетических алмазов по данным ДТА и ТГА (совместно с ВНИИСИМС).

7. Изучена зависимость температуры полиморфного перехода синтетического кварца от содержания микропримесей. Показано, что ДТА может служить методом отбраковки синтетического кварца (совместно с ВНИИСИМС).

8. Разработан термографический метод изучения газовой-жидких включений. Этот метод имеет определенные преимущества перед обычным методом декрепитации (работа проведена совместно с Е.И. Доломановой, Ю.Н. Пашковым) — устанавливается не только температурная область разрушения включений, но и их масса.

9. Совместно с ЦХЛ разработаны методики для термометрического метода химического анализа — новой области применения термического анализа.

Разработаны методы определения в горных породах Al, Si, Mg, Ca, Fe, Mn.

#### ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ РАВНОВЕСИЙ В СИЛИКАТНЫХ СИСТЕМАХ, ВАЖНЫХ ДЛЯ ПЕТРОЛОГИИ И ТЕХНИЧЕСКОГО МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЯ

Третье научное направление, как и два предыдущих, включает физико-химическое изучение высокотемпературных реакций в минеральных системах, но здесь используются методы высокотемпературной химии и силикатной технологии преимущественно без летучих компонентов. Получаемые в результате этих исследований данные вносят вклад в понимание наиболее высокотемпературных процессов и, в частности, формирования отдельных типов ультраосновных пород и связанных с ними магматических рудных месторождений. Кроме того, эти данные находят важное практическое применение, поскольку их учет позволяет дать ряд рекомендаций по совершенствованию технологии для ряда типов промышленных процессов.

Важный результат в этом плане был получен В.В. Лапиным и И.П. Солововой на основе экспериментального изучения путей кристаллизации шлаков, а также состава и строения главных шлаковых минералов. Ими было установлено впервые для доменных шлаков явление частичного распада мелилита с выделением при кристаллизации из расплава, начиная с 1250°C и ниже, неравновесного двухкальциевого силиката и других фаз (псевдоволластонит, волластонит). Этот факт имеет большое практическое значение при использовании доменных шлаков в народном хозяйстве, так как благодаря распаду мелилита шлаки рассыпаются с потерей механической прочности изделий. Существуют механические и кристаллохимические способы стабилизации шлаков. Аналогичные результаты были получены и для природных мелилитов.

Изучение полей стабильности минералов со структурой мелилита в системах  $\text{CaO}-\text{CoO}-\text{SiO}_2$ ;  $\text{CaO}-\text{MgO}-\text{CoO}-\text{SiO}_2$ ;  $\text{CaO}-\text{NiO}-\text{SiO}_2$ ;

$\text{CaO} - \text{MgO} - \text{NiO} - \text{SiO}_2$ ;  $\text{CaO} - \text{CoO} - \text{NiO} - \text{SiO}_2$ ;  $\text{CaO} - \text{MgO} - \text{CoO} - \text{NiO} - \text{SiO}_2$ ;  $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CoO} - \text{SiO}_2$ ;  $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{NiO} - \text{SiO}_2$ ;  $\text{CaO} - \text{MnO} - \text{SiO}_2$ ;  $\text{CaO} - \text{MgO} - \text{MnO} - \text{SiO}_2$  и  $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Mn}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$  показало, что только в двухчастных разрезах  $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7 - \text{Ca}_2\text{CoSi}_2\text{O}_7$  и  $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7 - \text{Ca}_2\text{CoSi}_2\text{O}_7$  образуются непрерывные твердые растворы, а в остальных системах наблюдается лишь частичное замещение ионов  $\text{Mg}^{2+}$  и  $\text{Al}^{3+}$  в мелилитах ионами  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{3+}$ . Результаты исследований по мелилитам освещены в ряде статей В.В. Лапина и И.П. Солововой (1966, 1968<sub>1,2</sub>, 1972, 1973, 1974<sub>1,2</sub>).

### *Новая аппаратура для физико-химического эксперимента*

Существенные результаты в ходе исследования рассматриваемых проблем были достигнуты и в области разработки новых видов научной аппаратуры.

Так, в Лаборатории высоких давлений была сконструирована и собрана установка типа одноступенчатого мультипликатора с неподвижным уплотнением на поршне, позволяющая работать при давлениях до 20000 атм газового давления и до температур порядка 1600°C (конструктор Г.С. Кац при участии И.Д. Рябчикова). От аналогичных созданных ранее установок этот газовый мультипликатор отличается большей простотой и надежностью в эксплуатации. С его помощью был изучен ряд минеральных равновесий в системах с летучими компонентами при давлениях до 17000 атм.

В этой же лаборатории А.С. Ефимовым была сконструирована и под его руководством изготовлена и сдана в эксплуатацию высокотемпературная многореакторная гидротермальная установка типа толстостенных пробирок с холодным затвором, позволяющая работать до 800°C и 2000 атм. На этой установке проводится изучение мобилизации рудных компонентов надкритическими флюидами различного состава.

В Лаборатории термического анализа минералов в 1972 г. была создана рабочая модель терморентгеновской установки, позволяющей одновременно записывать термограмму и рентгенограмму образца при нагревании до 1000°C (Б.М. Кобцев). Ценной особенностью этой установки является возможность записи термограммы и рентгенограммы из одного образца, а не из двух, как в некоторых существующих типах подобных приборов.

С целью изучения структурных характеристик минералов не только при высоких температурах, но и непосредственно в момент приложения высоких и сверхвысоких давлений Лабораторией высоких давлений была приобретена рентгеновская камера высокого давления (производство Опытного завода СО АН СССР), в конструкцию которой были внесены определенные модификации с целью увеличения мощности источника рентгеновского излучения (Т.Б. Карпинская, И.А. Островский, при участии А.С. Ефимова).

В Лаборатории термического анализа минералов создана рабочая модель микротермовесовой установки (Г.О. Пилоян, В.А. Дунаевский).

## СОСТАВЛЕНИЕ СПРАВОЧНИКОВ И ВНЕДРЕНИЕ НАУЧНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ В НАРОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО

В числе работ за 1965—1974 гг. следует упомянуть выпуски "Диаграммы фазовых равновесий, важные для природного и технического минералообразования", два тома справочника "Минералы" объемом 125 п.л. (66% диаграмм — В.В. Лапин, Н.И. Овсянникова, большая часть остальных — И.А. Островский, Г.П. Орлова, Т.Б. Карпинская) и участие в создании других справочников по диаграммам состояния (В.В. Лапин).

Внедрены в народное хозяйство разработанные В.В. Лапиным способ получения минеральных порошков из доменных шлаков и способ изготовления шлакового щебня — последнее изобретение внедрено в 1972 г. на Новолипецком металлургическом заводе. На оба изобретения получены авторские свидетельства.

По использованию металлургических шлаков в дорожном и гражданском строительстве и в сельском хозяйстве (в качестве удобрений) согласно постановлению Президиума Всесоюзного совета научно-технических обществ (ВСНТО, председатель акад. А.Ю. Ишлинский) была создана Временная комиссия. Комиссия выработала практические предложения по стопроцентному использованию шлаков черной металлургии. Реально ожидаемый от этих мероприятий эффект можно представить, если учесть, например, опыт завода Азовсталь, единственного в СССР перешедшего на стопроцентное использование отвальных шлаков. В 1972 г. этим заводом получено за счет переработки шлаков 7,5 млн. рублей прибыли, что составило примерно 10% общей прибыли завода, а таких заводов в нашей стране десятки (Камионский, Трофимчук, 1974).

### *Перспективы развития физико-химического эксперимента*

Для физико-химического изучения генезиса магм и магматогенных растворов основные усилия предполагается по-прежнему сосредоточить на выяснении условий перехода рудных компонентов из магм и пород в высокотемпературные флюиды. Количественные данные по межфазовому распределению рудных металлов в системах с летучими компонентами получены пока для цинка, железа, меди, золота, свинца и олова.

В будущем предстоит вовлечение в круг аналогичных исследований других рудных элементов.

Поскольку предыдущими работами, выполненными в Лаборатории высоких давлений, установлено, что для мобилизации рудных компонентов из магмы ведущая роль принадлежит анионогенным элементам (для халькофильных металлов — хлору, для литофильных — фтору), в качестве важной задачи будущих исследований выдвигается выяснение условий формирования магм, аномально обогащенных летучими и анионогенными компонентами. Здесь предстоит продолжение изучения фазовых равновесий в минеральных системах с галогенидами (и в первую очередь с фтором) и водой, исследование превращений, проте-

кающих при плавлении образцов горных пород, обогащенных галогенами, выявление фазовых равновесий — индикаторов активности хлора, фтора, серы и других аниогенов. Для успешного исследования подобных равновесий при параметрах, отвечающих мантийным глубинам, необходимо продолжение усилий, направленных на преодоление методических трудностей при работе в области сверхвысоких давлений.

Следует подчеркнуть, что изучение фазовых равновесий при сверхвысоких давлениях имеет не только огромное значение для развития теории петрогенезиса, но представляет непосредственный интерес и для металлогенических построений, так как многие неясные сейчас вопросы размещения рудных месторождений в земной коре могут найти свое решение при изучении процессов, протекающих в мантии Земли.

Развитие исследований механизма и кинетики высокотемпературных превращений в минералах будет вестись в двух аспектах:

а) систематические термоаналитические исследования различных групп минералов;

б) методико-теоретические исследования; работы по созданию новых типов установок термического анализа, главным образом для микро-навесок, разработка новых направлений термического анализа — применение в аналитической химии для анализа химического состава горных пород и руд, применение в физико-химических исследованиях для определения кинетических параметров химических реакций, представляющих интерес для геологии, разработка новых термографических методов фазового анализа, работы по некоторым теоретическим аспектам термографии.

Предполагается также развивать экспериментальные исследования в области высокотемпературных физико-химических систем, важных для изучения некоторых вопросов природного минералообразования при кристаллизации магм и образовании магматических месторождений (вопросы генезиса хромитов и т.д.) и одновременно представляющих интерес для познания теоретических основ получения современных видов технического камня (шлаки, огнеупоры и проч.).

#### ЛИТЕРАТУРА

- Ершова З.П. О термическом поведении амфиболов ряда куммингтонит — грюнерит. — Изв. АН СССР, серия геол., 1972, № 8.
- Ершова З.П. О термической кривой амозита. — В сб. "Неметаллические полезные ископаемые гипербазитов". "Наука", 1973.
- Камионский Л.И., Трофимчик Б.Н. Почему растут отвалы. Газета "Труд", 1974, № 171.
- Карпикская Т.Б., Шанин Л.Л., Борисевич И.В. Искусственное внедрение аргона в слюду, оливин и пироксен. — Изв. АН СССР, серия геол., 1965, № 11.
- Кобцев Б.М., Пилоян Г.О. Высокотемпературная приставка к дифрактометру для одновременной регистрации дифрактометрических и термических кривых. — Изв. СО АН СССР, серия хим. наук, 1974, вып. 4, № 9.
- Котлова А.Г., Щепочкина Н.И. Термоаналитическое исследование варисцитов месторождения Сарысай. — В сб. "Термоаналитические исследования в современной минералогии". Наука, 1970.
- Котлова А.Г., Щепочкина Н.И. Синтез берлинита. — Изв. АН СССР, серия неорг. материалы, 1970, 6, № 11.

- Котлова А.Г., Щепочкина Н.И. Синтез двуводного фосфата железа. — Ж. неорган. химии, 1971, 16, вып. 1.
- Котлова А.Г., Щепочкина Н.И. Сравнительное термографическое исследование  $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . — Ж. неорган. химии, 1972, 18, вып. 2.
- Лапин В.В., Соловова И.П. Кристаллизация фаз и разложение мелилита при охлаждении расплава доменного шлака. — Изв. АН СССР, серия неорган. материалы, 1966, 2, вып. 5, № 7.
- Лапин В.В., Соловова И.П. О различном характере выделения двухкальциевого силиката в доменных шлаках. — Труды II Уральского петрографического совещания. Свердловск, 1968, вып. 7.
- Лапин В.В., Соловова И.П. Синтез мелилитов, содержащих элементы первой переходной группы. Кобальтовый окерманит. — Изв. АН СССР, серия неорган. материалы, 1972, 8, № 10.
- Лапин В.В., Соловова И.П., Тронева Н.В. К вопросу об окраске Ni-Co-окерманита и его частичном распаде. — Изв. АН СССР, серия неорган. материалы, 1973, 9, № 7.
- Лапин В.В., Соловова И.П., Тронева Н.В. Синтез мелилитов, содержащих элементы первой переходной группы Co-Ni-Mg -окерманиты. — Изв. АН СССР, серия неорган. материалы, 1974, 10, № 5.
- Лапин В.В., Соловова И.П., Игамбердиев Ш.К., Тронева Н.В. Синтез мелилитов, содержащих элементы первой переходной группы. Co-Al- и Ni-Al-мелилиты. — Изв. АН СССР, серия неорган. материалы, 1974, 10, № 8.
- Орлова Г.П. Равновесие силикатный расплав — вода при высоких давлениях. — Труды VIII Совещания по эксп. и техн. минералогии и петрографии. Выпуск "Экспериментальное моделирование природных процессов". "Наука", 1971.
- Орлова Г.П. К методике определения  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$ , растворенных в силикатных расплавах под давлением (по анализам закаленных стекол). Изв. АН СССР, серия геол., 1972, № 9.
- Островский И.А. Экспериментальное определение положения кривой фазового равновесия коусит — стишовит. — Изв. АН СССР, серия геол., 1965, № 10.
- Островский И.А. Расчет высокотемпературных равновесий плотных модификаций кремнекислоты и выводы для геологии и сейсмологии. — Изв. АН СССР, серия геол., 1971, № 10.
- Островский И.А., Орлова Г.П., Рудницкая Е.С. О стехиометрии при растворении воды в щелочно-алюмосиликатных расплавах. — Докл. АН СССР, 1964, 157, № 5.
- Островский И.А., Орлова Г.П. О парциальном мольном объеме воды в расплаве альбита. — Изв. АН СССР, серия геол., 1966, № 12.
- Пилоян Г.О., Новикова О.С. Термографические и термогравиметрические методы определения энергии активации реакций. — Ж. неорган. химии, 1967, 12, № 3.
- Пилоян Г.О., Вальяшихина Е.П. Термический анализ минералов из группы каолинита и галлуазита. — В сб. "Термоаналитические исследования в современной минералогии". "Наука", 1970.
- Рябчиков И.Д. Условия отделения концентрированных солевых растворов в ходе кристаллизации кислых магм. — В сб. "Проблемы геологии минеральных месторождений, петрологии и минералогии". "Наука", 1969, т. 2.
- Рябчиков И.Д. Содержание цинка в хлоридных растворах, равновесных с минералами гранитоидов в условиях повышенных температур и давлений. — Докл. АН СССР, 1970, 194, № 6.
- Рябчиков И.Д. Термодинамика флюидной фазы гранитоидных магм. "Наука", 1975.
- Термоаналитические исследования в современной минералогии (ред. Г.О. Пилоян). "Наука", 1970.
- Цветков А.И., Ершова З.П. Термоаналитическое исследование тремолита — актинолита. — В сб. "Термоаналитические исследования в современной минералогии". "Наука", 1970.
- Ryabchikov I.D., Durasova N.A., Barsukov V.L. The role volatiles in the mobilization of tin from granitic magmas. — In: "Metallization associated with acid magmatism". Praha, 1974, v. 1.

## ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД В СВЯЗИ С ПРОБЛЕМАМИ РУДО- И ПЕТРОГЕНЕЗИСА

Систематические исследования физико-механических свойств горных пород в Академии наук начаты в Отделе строительных материалов Петрографического института, в пределах которого в 1935 г. была организована специальная лаборатория.

Первые годы главным направлением работ сотрудников Отдела явилось полевое изучение месторождений облицовочного камня важнейших регионов Союза и лабораторные исследования свойств пород. Разрабатывались методики определения пористости, прочности, морозостойкости и вязкости горных пород. Устанавливалась их связь с петрографическим составом и структурой. К этому периоду относятся работы, связанные с решением важнейших вопросов, поставленных практикой, — применение камня в строительстве, например, возможности обеспечения морозостойким камнем наиболее ответственных, находящихся в зоне переменного уровня воды, деталей плотины Куйбышевской ГЭС им. Ленина за счет местных ресурсов.

В результате совместных работ с Гидропроектом Б.В. Залесским была показана достаточная морозостойкость доломитизированных известняков Жигулей и строительство было освобождено от ввоза гранитов с Урала.

Параллельно проводились методические работы по изучению и теоретическим расчетам морозостойкости, обследование поведения облицовочных камней в старинных постройках и исследование причин их разрушения.

В дальнейшем работы проводились в двух основных направлениях: 1) исследование физико-механических свойств горных пород в связи с процессами гидротермального рудообразования и 2) изучение влияния минерального состава и истории формирования пород на их физико-механические свойства с целью анализа строения земной коры и верхней мантии. Продолжались в ограниченном масштабе работы по изучению свойств строительных камней.

В работах первого направления особое внимание было обращено на изменение свойств пород в связи с прерудным процессом, для чего изучались: характер пористости и проницаемости и влияние их на движение гидротермальных рудоносных растворов.

Было показано, что в зависимости от минерального состава, условий образования и последующей геологической истории породы характеризуются определенным комплексом физических и механических параметров.

ров. В дальнейшем на эти свойства накладывают свой отпечаток эпигенетические изменения и деформации.

Петрофизический анализ позволяет произвести реконструкцию геодинамических условий становления интрузивных тел и выделить в интрузивном процессе наиболее благоприятные для рудообразования тектонофизические периоды. Так, в районах с промышленным оруденением (Каджаран, Дашкесан, Зырянск и др.) установлено, что кристаллизация рудных интрузивов происходит при сжимающих напряжениях, обусловленных глубиной залегания интрузивов. Напряжения усиливаются или уменьшаются складчатостью. В связи со складчатостью могут образоваться структуры, способствующие локализации промышленных месторождений как в самих интрузивах, так и в экзоконтактах. Последние инъекции магмы кислого состава (трещинные интрузии), а затем и даек основного состава происходят во второй период при преобладании растягивающих напряжений. Промышленное гидротермальное оруденение (медное — Каджаран, скарновое — Дашкесан и др.) по времени совпадает с действием растягивающих напряжений после становления даек базальтоидного состава. Этот период является благоприятным для формирования наиболее крупных месторождений — отщепления рудных растворов и миграции их в верхние горизонты земной коры (Шипулин и др., 1975).

В локализации оруденения кроме геологических факторов важную роль играет физическое состояние среды, в которой протекают процессы рудообразования. Так, упругие и пластические свойства вмещающих пород в известной мере предопределяют характер возникающих структур и положение в них зон оруденения.

Первостепенная роль при рудоотложении принадлежит пористости. Породы, способные к рудовмещению, характеризуются обычно повышенной пористостью, которая может возникнуть либо при образовании породы (межзерновая пористость в процессе складчатости, деформационная пористость за счет микротрещиноватости), либо при гидротермальной предрудной подготовке (повышенная вторичная пористость).

В качестве примера может быть приведено медно-молибденовое месторождение Каджаран, в котором локализация руд приурочена к наиболее деформированным частям монзонитов в зоне Дебаклинского разлома, где пористость в 2 раза выше, чем средняя по интрузиву.

Поскольку в процессах миграции растворов весьма важную роль играют трещины, были поставлены экспериментальные исследования о влиянии физических свойств пород на способность их к трещинообразованию. Работы проводились в двух направлениях: а) исследование поведения пород в условиях высоких давлений и б) изучение упругих и прочностных свойств пород при атмосферном давлении и комнатной температуре. Эксперименты при высоких давлениях проводились в условиях наложения стресса. Выяснилось, что образование трещин является сложным процессом с двумя четко разграниченными областями, для первой из которых характерны локальные нарушения в виде пластических деформаций или микротрещин в пределах отдельных минералов, для второй — лавинное возникновение трещин по всему объему породы, что при-

водит к разрушению образца с образованием магистральных трещин скалывания, заполненных обломками и песком трения. Возникшие таким образом трещинные структуры могут служить областями разгрузок для избыточного межзернового флюида из соседних уплотненных блоков, не потерявших сплошности.

Экспериментально полученные закономерности позволили подойти к решению обратной задачи — реконструкции тектоно-физических условий, существовавших при формировании месторождений.

Поскольку инициатором большинства работ этого рода была Лаборатория физико-механических исследований горных пород, то после значительного числа публикаций естественным этапом явился созыв специального совещания по влиянию физико-механических свойств на рудовмещение, проведенного Комитетом по рудообразованию и ИГЕМ, труды которого были опубликованы в виде сборника докладов, вышедшего в 1973 г. под редакцией Ю.А. Розанова.

В рассматриваемый период продолжались исследования фильтрационных свойств горных пород. На основании обобщения фонда накопленных экспериментальных данных А.А. Пэком была выдвинута гипотеза, объясняющая происхождение модальных значений эффективной пористости и проницаемости глубинных интрузивных и метаморфических горных пород процессом их уплотнения внешним литостатическим давлением. Исходя из этой гипотезы, в качестве общей причины восходящего движения магматогенных гидротермальных растворов были определены силы гравитационной изостазии — "кипения" магматического расплава на ранних стадиях магматической дегазации и литостатического "фильтр-прессинга" (отжимания) межзернового флюида на заключительных этапах консолидации интрузий.

В 1967 г. были начаты работы по гидродинамическому анализу структурных условий гидротермального рудообразования на основе методов электрогидродинамической аналогии (ЭГДА). Проведены исследования динамики стационарных потоков в типовых структурных условиях экранирования и фильтрационной зональности контролирующего разлома и боковых пород. В результате удалось установить ряд дополнительных по отношению к традиционным структурным, собственно гидродинамических условий развития гидротермального процесса. После анализа типовых расчетных схем была предпринята попытка реконструкции методом ЭГДА палеогидродинамических условий рудообразования на конкретном объекте — Гайском медноколчеданном месторождении на Южном Урале. В результате удалось установить статистически значимые корреляции между рассчитанным распределением в структуре удельных расходов древнего рудообразующего потока и пространственным размещением руд (Пэк, Требухин, Гераков, Рыфмин, 1973).

Логическим развитием работ по гидродинамике гидротермального рудообразования явились начатые в последнее время работы по термогидродинамике гидротермального процесса. Исследования эти ведутся в научном сотрудничестве с Лабораторией термических методов исследования ИГЕМ. Г.О. Пилояном и А.А. Пэком было получено и проанализировано решение конвективного теплопереноса по стволу гидротер-

мальной системы при учете теплоотдачи в боковые породы. Анализ граничных условий расчетной схемы показал, что установленная на основании эмпирических исследований общая картина термобарической эволюции гидротермальной системы наиболее естественно объясняется в рамках модели со снижающимся расходом (истощающимся источником) гидротермальных растворов. Исходя из этого условия и полученного решения задачи теплопереноса по стволу гидротермальной системы, была предложена процедура оценки возможной глубины источника гидротермальных растворов по данным (в случае палеогидротермальных систем) минералогической термобарометрии и сведениям о геометрии рудного поля и теплофизических свойствах пород.

К первому разделу относятся также исследования физико-механических свойств и особенно анизотропии упругости пород, пройденных сверхглубокой скважиной СГ-3, проводимые совместно с отделом эндогенных месторождений.

Работы по второму направлению — изучение глубинного строения земной коры — проводятся совместно с петрографическим отделом ИГЕМ и Институтом физики Земли АН СССР. Целью их является установление зависимостей упругих свойств пород от минерального состава, пористости и степени деформированности. Результаты исследований на примере Кавказа позволяют объективно подойти к оценке глубин формирования и последующих тектонофизических преобразований пород.

Особое внимание было уделено петрографической интерпретации скоростей волн в породах. Для решения этого кардинального вопроса были определены, совместно с Институтом физики СО АН СССР, упругие константы главных породообразующих минералов и даны формулы расчета свойств пород по константам минералов. Сравнение упругих параметров малопористых пород, рассчитанных по минеральному составу и полученных для тех же пород, экспериментально показало вполне достаточное совпадение, граничащее с точностью эксперимента. Этим было доказано определяющее значение минерального состава на свойства пород.

Петрофизические исследования, проведенные Б.П. Беликовым на примере складчатой области Кавказа, показали значительное, иногда решающее влияние на упругие и плотностные свойства пород таких факторов, как тектоника и магматизм. Так, породы мезокайнозойского покрова субгерцинской платформы Предкавказья, слабо затронутые тектоникой, существенно отличаются от аналогичных по составу и возрасту складчатых частей Кавказа меньшей степенью консолидации и уплотнения.

Петрофизические колонки пород складчатой зоны Кавказа, построенные по данным большого числа лабораторных измерений, позволили увязать степень уплотнения пород (за счет уменьшения пористости) с историей их формирования. Выяснилось, что на свойствах пород Кавказа наиболее сказались Судетская фаза герцинской складчатости и связанный с ней магматизм: пористость досреднекарбонных пород, как правило, не превышает 1%, в то время как более молодые породы характеризуются обычно значительно более высокой и, главное, неоднородной пористостью. Естественно, что и другие свойства, зависящие от по-

ристости, такие, как плотность и скорость распространения упругих волн, претерпевают в этой связи значительные изменения.

Из методических работ следует отметить исследование пород при высоких гидростатических давлениях, выполненные на оригинальной установке (УВД-20) конструкции сотрудника Лаборатории Э.А. Тонковой. Показано аномальное упругое поведение вулканических стекол при гидростатических давлениях, заключающееся не в повышении, а в понижении скоростей распространения упругих волн при гидростатических давлениях до 10 кбар.

Из работ по строительному камню следует отметить исследования некоторых месторождений облицовочного камня (СССР, Куба).

Таким образом, результаты исследований Лаборатории получают все более широкое приложение в практике геологии как в СССР, так и за рубежом. Все большее число сотрудников ИГЕМ начинают применять в своих научных построениях количественные показатели физических свойств пород. Видимо, работы эти заслуживают расширения и углубления. Они позволяют произвести реконструкцию условий формирования горных пород.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на моделирование поведения пород на глубине путем одновременного воздействия высоких давлений и температур, а также на изучение влияния на свойства пород не только эндогенных, но и экзогенных процессов, связанных, в частности, с корой выветривания. Такие работы проводятся в последние годы совместно с нерудным и экзогенным отделами ИГЕМ во все возрастающем масштабе и приводят к интересным научным выводам по генезису месторождений.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Физико-механические свойства горных пород верхней части земной коры. "Наука", 1968.
- Роль физико-механических свойств горных пород в локализации эндогенных месторождений. "Наука", 1973.
- А.А. Пэк. О динамике ювенильных растворов. "Наука", 1968.
- Беликов Б.П., Александров К.С., Рыжова Т.В. Упругие свойства породообразующих минералов и горных пород. "Наука", 1970.
- Шипулин Ф.К., Рехарский В.И., Звягинцев Л.И. Интрузии, метасоматиты и медно-молибденовое оруденение. "Наука", 1975.

## РАЗВИТИЕ УЧЕНИЯ О МИНЕРАЛАХ И МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИИ

На современном этапе минералогия характеризуется ярко выраженными тенденциями углубления знаний о структуре минералов, природе их физических свойств, стабильности, условиях образования и преобразования. Развитие соответствующих исследований в существенной мере стимулировалось достижениями в разработке и освоении тонких методов изучения вещества, которые позволяют более успешно изучать структурные особенности минералов, характер химических связей атомов в них, изоморфные замещения, дефекты структур, ультратонкую морфологию минеральных выделений, их однородность и т.д.

Усилились связи минералогии со смежными областями геологических знаний, особенно с теорией рудогенеза, возросло ее влияние на поисковые и разведочные работы. Очевидно, что можно говорить о новом уровне состояния минералогии и более широком использовании ее достижений.

Минералогические исследования в ИГЕМ АН СССР за последнее десятилетие были направлены на решение следующих задач: развитие учения о типоморфизме минералов; разработка вопросов изоморфизма и однородности минералов; обобщение мирового опыта изучения минералов и их разновидностей — составление энциклопедического справочника "Минералы"; накопление новых данных по кристаллохимии минералов; совершенствование представлений в области физики минералов; выяснение специфики современного гидротермального минерало- и рудообразования.

### ТИПОМОРФИЗМ МИНЕРАЛОВ

Работы по типоморфизму минералов получили значительное развитие в шестидесятых годах. Понятие о типоморфизме как зависимости форм выделений, состава и свойств минералов от условий их образования было наиболее четко сформулировано в нашем Институте академиком А.Е. Ферсманом. По типоморфным признакам минералов и их ассоциаций можно судить о процессах минерало- и рудообразования, глубже понимать их особенности в разных геологических условиях, а также выявлять минеральные индикаторы промышленно ценной минерализации. В работах использовался большой комплекс тонких методов

изучения минерального вещества, в том числе электронография, электронная микроскопия, локальные лазерный спектральный и рентгеноспектральный анализы, прецизионные химические анализы, определение изотопного состава серы. В исследования были включены ультратонкие детали морфологии минеральных индивидов, неоднородность их состава и др. Следует отметить, что использование различных методов в ряде случаев сопровождалось их совершенствованием. Так, в электронно-микроскопической лаборатории А.И. Горшковым разработаны методы получения микродифракционных картин от загнутых краев чешуек минералов, К.Е. Фроловой предложены приемы прицельного репликования.

В результате работ выдвинут ряд новых положений в учении о типоморфизме и получены конкретные материалы, характеризующие некоторые промышленно ценные минералы.

Сформулированы представления о конвергенции в минералообразовании, основой которой является возникновение одних и тех же минералов при различных геологических условиях (Ф.В. Чухров). Возникновение определенных минералов как при эндогенных, так и при экзогенных процессах представляет конвергенцию первого порядка; под конвергенцией второго порядка понимается возникновение при разных условиях эндогенных или экзогенных минералов. Различаются также конвергенции в широком и узком диапазонах термодинамических условий. Одной из задач современной генетической минералогии является выяснение типоморфных особенностей конвергентных минералов.

*Самородное золото.* Работы выполнялись Н.В. Петровской при участии М.И. Новгородовой и К.Е. Фроловой. Их завершением явилось опубликование серии статей и монографии "Самородное золото" (1973 г.). Обобщение накопленных материалов, в большей части оригинальных, полученных с применением тонких современных методов исследования, позволило обосновать ряд новых положений об особенностях самородного золота, его спутниках, условиях образования золоторудных месторождений. Показано типоморфное значение морфологии золотин и самородков. Выделены новые морфологические разновидности, в том числе — расщепленного роста, дендритоидные, интерстициальные, гемипидиоморфные. Установлена конвергентность ряда форм, например кристаллов, росших в свободных полостях метасоматически и путем собирательной перекристаллизации. Установлено, что трещинные формы золотин, особенно самородков, возникали при синкристаллизационном развитии трещиноватости жильного кварца с его опережающим выщелачиванием. Преобладание тех или иных форм выделений золота в месторождении зависит от его принадлежности к определенной формации.

Применение электронной микроскопии, особенно методики прицельных реплик, впервые позволило охарактеризовать тонкий и ультратонкий рельеф поверхности золотин, характер которого зависит от степени пересыщения растворов золотом и механизма роста его кристаллических индивидов. Обнаружены ранее неизвестные проявления автопитаксии и признаки эндогенной коррозии выделений самород-

ного золота. Предложена первая полная систематика структур его индивидов и агрегатов, возникших при кристаллизации и последующих эндогенных преобразованиях (структуры распада, нарастаний, рекристаллизации и др.) Выводы о факторах, влияющих на состав самородного золота (окислительно-восстановительный потенциал среды, послерудные изменения, региональные геохимические особенности) дали основание выделить общие и локальные закономерности распределения в месторождениях золота разной пробности.

Детальное исследование медистого золота, проведенное М.И. Новгородовой, позволило уточнить состав и строение его выделений; открыты минералы состава:  $Cu_3Au$ ,  $CuAu$ ,  $CuAu_4$ ,  $Au_5Ag_{10}Hg$ .

Установлено широкое распространение существенно газовых включений в самородном золоте; экспериментально доказано, что их образование связано с избирательной сорбцией газов поверхностью растущих золотин. Получены объективные данные о формах тонкодисперсного золота в сульфидах и кварце (микроструктурики ультратонкого мозаичного строения). Развито представление о гетерогенности такого золота — сингенетического и эпигенетического по отношению к минералам-носителям.

В результате изучения золотых самородков, в том числе из коллекции Алмазного фонда СССР, Н.В. Петровская обосновала положение о росте самородков в процессе эндогенной перегруппировки золота с выносом металла из корневых частей жил и его преимущественной концентрацией в "головах" рудных столбов. Этим опровергается защищаемая рядом исследователей гипотеза образования самородков в зоне гипергенеза и создается основа для оценки глубоких горизонтов золоторудных месторождений. Отмечено большое значение для формирования рудных столбов внутрирудных перегруппировок минерального вещества. Охарактеризованы гипергенные изменения самородного золота и его новообразования в окисленных рудах и в россыпях.

Сделаны обобщения о типоморфных признаках золота, позволяющих судить о типе его месторождений и факторах, способствующих накоплению металла в рудах. Детальное освещение получили гипергенные новообразования золота, связанные с выщелачиванием серебра и перекристаллизацией в золотилах. В серии статей рассмотрено использование особенностей самородного золота как показателей формационной принадлежности месторождений, совмещения разнотипной минерализации, условий рудообразования и последующих изменений руд. Намеченные пути изучения типоморфных признаков золота используются как в исследовательских, так и в производственных организациях Советского Союза.

*Простые и сложные сульфиды.* Значительное внимание было уделено изучению халькопирита. В связи с недавним открытием ряда близких ему минералов Ю.К. Воробьевым проведено изучение фазовых соотношений в семействе халькопирита. Минералы, полученные путем пирсинтеза из смесей элементов, были изучены при 800, 600, 550 и 500°. Детально прослежено изменение минеральных ассоциаций в ходе медленного охлаждения до 20° при различных давлениях паров серы.

Диагностика фаз проводилась в порошковой фокусирующей камере КРФ. Установлено, что обнаруженный предыдущими исследователями при изучении системы Cu-Fe-S твердый раствор  $Cu_{1\pm x}Fe_{1\pm x}S_{2-y}$  ( $0,5 > x \geq 0$ ;  $0,4 \geq y > 0$ ) устойчив выше  $550^\circ$ , имеет примитивную кубическую структуру при  $Fe > Cu$  и, по-видимому, структуру моихукита или талнахита при  $Cu \geq Fe$ . Ниже  $550^\circ$  этот твердый раствор энергично поглощает серу и переходит в обычный халькопирит  $CuFeS_2$ . В системе с недостатком серы образуется халькопирит с некоторым ее дефицитом или же сохраняется исходный твердый раствор в виде моихукита, талнахита или фазы с примитивной кубической ячейкой. Халькопирит, образовавшийся путем сульфуризации высокотемпературного твердого раствора, может быть определен в рудах по характерным двойникам превращения, по сфалеритовым звездочкам, являющимся остатками исходной матрицы, и по своеобразным структурам сопровождающих его пиритовых агрегатов. Присутствие в рудах халькопирита, обладающего этими признаками, указывает на вполне подвижное поведение серы при рудообразовании. Если подвижность серы ограничена, образуются талнахит, моихукит, фаза с примитивной кубической ячейкой и халькопирит с дефицитом серы. Редкость находок этих минералов отражает необычность инертного поведения серы в природе. Полученные данные в совокупности с другими исследованиями позволяют реконструировать температурный режим и режим серы при формировании рудных месторождений.

М.И. Новгородовой изучены типоморфные особенности халькопирита из медноколчеданных месторождений. Установлено, что генерации этого минерала различаются по степени нарушения стехиометрических соотношений меди, железа и серы, по содержанию элементов-примесей, электрическим, оптическим и механическим свойствам. Заметный дефицит серы (около 9 атомн.%) обнаружен у халькопирита из руд, подвергавшихся термическому воздействию более поздних гранитоидных интрузий.

Т.Н. Шадлун и М.Г. Добровольская установили, что маложелезистые (обычно до 3 вес.% Fe) сфалериты типичны для стратиформных свинцово-цинковых руд в карбонатных породах, колчеданных руд в вулканогенных толщах, молибденовых и вольфрамовых руд в измененных гранитоидах; сильножелезистые сфалериты обычны в метасоматических свинцово-цинковых рудах в доломитах или в скарнах, а также в рудах кварц-касситеритовых, сульфидно-касситеритовых и оловянно-вольфрамовых месторождений, для которых типична ассоциация сфалерита с пирротинном. Для многих маложелезистых сфалеритов характерно повышенное содержание германия, ртuti и молибдена, а для обогащенных железом сфалеритов — индия, олова, марганца, иногда кобальта. В тесной связи с содержанием железа изменяются такие типоморфные особенности сфалерита, как плотность и твердость (обратная зависимость), параметр решетки и отражение (прямая зависимость).

Наиболее типичным типоморфным признаком галенитов является содержание сурьмы, серебра, висмута, иногда олова, обычно низкое

в галените месторождений с маложелезистым сфалеритом и более высокое в галенитах остальных месторождений.

Характерной особенностью месторождений, сформированных в несколько стадий (например, забайкальских свинцово-цинковых), является более позднее отложение галенита в ассоциации с сульфоантимонитами свинца, сопровождавшееся перекристаллизацией агрегатов сфалерита с обособлением пирита и отложением в пустотах выщелачивания его безжелезистой разновидности (мелкие почковидные образования).

Повышение окислительного потенциала растворов на более поздних стадиях вызвало замещение пирротина марказитом и пиритом в виде пластинчатых агрегатов с одновременным отложением сфалерита. Повышение кислотности растворов сопровождалось образованием метакристаллов кварца в массе сфалерита.

Н.Н. Мозговой при участии сотрудников Казанского государственного университета и Вильнюсского государственного университета исследованы типоморфные особенности основного промышленного минерала сурьмы — антимонита из месторождений, различающихся по вещественному составу руд и их генезису, главным образом из месторождений Средней Азии и Восточного Забайкалья. Установлено, что состав антимонита обнаруживает отклонения от стехиометрического. Для большей части образцов антимонита из монометалльных сурьмяных и существенно сурьмяных месторождений характерен избыток серы (до формулы  $Sb_2S_{3,46}$ ); в остальных месторождениях вариации состава минерала больше, для него характерен дефицит серы (до формулы  $Sb_2S_{2,60}$ ). Предполагается, что температура образования антимонита в монометалльных и существенно сурьмяных месторождениях была самой низкой, недостаточной для термической диссоциации  $Sb_2S_3$ ; при формировании месторождений остальных типов эта температура менялась в более широких пределах. Наиболее обычные примеси в антимоните — Pb, Cu, Ag, Zn, Fe и As (0,000n—0,n%). Ранее считалось, что подобные примеси большей частью обязаны механическим включениям. Изучение микротвердости и электрических свойств, а также использование ядерного квадрупольного резонанса позволяют сделать вывод об изоморфном характере указанных примесей. Статистическая обработка данных спектральных анализов показала, что в зависимости от типа месторождения изменяется общее содержание в антимоните халькофильных элементов при почти одинаковом их качественном составе. Наиболее высоко содержание примесей в антимоните существенно ртутных месторождений; оно уменьшается в ряду сурьмяно-вольфрамовые — свинцово-цинковые — золоторудные — монометалльные сурьмяные месторождения. С увеличением общего количества примесей возрастает микротвердость антимонита и уменьшается степень ее анизотропии, изменяются также электрические свойства. Фазовые переходы в природном антимоните, установленные при исследовании электрических свойств, подтвердили принадлежность этого минерала к недавно открытому классу соединений — полупроводниковым сегнетоэлектрикам, обладающим полупроводниковыми и сегнето-

электрическими свойствами. Сегнетоэлектрические свойства указывают на отсутствие у антимонита центра симметрии, следовательно, пространственная группа симметрии этого минерала должна быть  $C_{2v}^9$ , а не  $D_{2h}^{16}$ , как принималось ранее. Влияние примесей на электрические свойства указывает на возможность направленного их изменения в искусственном антимоните.

Впервые проведенное совместно с Т.А. Яковлевской изучение кристаллов антимонита из отечественных месторождений разных генетических типов позволило установить 23 простые формы из 170 известных для антимонита. Различия в облике кристаллов из разных месторождений сводятся к вариациям комбинаций простых форм и неодинаковому развитию отдельных граней на головках кристаллов. Изученные кристаллы отличаются по количеству примесей. Предполагается, что основное влияние на облик кристаллов антимонита оказал состав рудосных растворов.

*Титаномагнетиты.* О.В. Карповой изучались титаномагнетиты, генетически связанные с породами габбрового комплекса, которые характеризуются высоким содержанием двуоксида титана. В магнетите, возникшем за счет титаномагнетита в процессе метаморфизма, титан обнаруживается или устанавливается в небольшом количестве (зависимость от степени метаморфизма). Отношение титан-железо в титаномагнетитах из руд выше, чем в пороодообразующем и акцессорном титаномагнетитах. Микротвердость титаномагнетитов из сплошных руд выше по сравнению с титаномагнетитами, образующими вкрапленность. Максимальные значения микротвердости характерны для титаномагнетитов, содержащих повышенное количество хрома (2,7–4,3%  $Cr_2O_3$ ).

При гидротермальном метаморфизме, связанном с внедрением гранитной магмы, вещество магнетита в титаномагнетитах расходовалось на образование других минералов, а более устойчивый ильменит сохранился, что привело к обогащению им руд. В Цагинском месторождении (Кольский полуостров) в процессе регионального метаморфизма изменение титаномагнетита привело к образованию не содержащего титана магнетита и ильменита.

Для титаномагнетита из дифференцированных комплексов пород основного состава характерна ассоциация с ильменитом и апатитом. Состав окислов железа и титана является индикатором процесса рудообразования и зависит от температуры и парциального давления кислорода, а также от наличия в остаточном расплаве летучих компонентов. Пострудные преобразования титаномагнетитов приводили к формированию высококачественных ильменитовых и магнетитовых руд.

*Минералы щелочных пород Хибинского массива.* Детальное исследование состава и структурных особенностей минералов Хибинского массива, проведенное Б.Е. Боруцким, М.Н. Соколовой и З.В. Шлюковой, показало, что на них влияют многие факторы: состав исходного расплава или раствора, условия кристаллизации, а также воздействие последующих процессов. В щелочных полевых штатах существенно повышается содержание калия от приконтактных хибинитов к пироксеновым фойяитам, развитым в центре массива. В процессе пегматитооб-

разования содержание калия в полевых шпатах возрастает от ранних стадий к поздним, что сопровождается явлением Si/Al-упорядочения; в наиболее поздних ассоциациях сосуществуют уже два полевых шпата с максимально упорядоченной структурой — микроклин и альбит. В нефелиновых сиенитах явления фазового распада и Si/Al-упорядочения в полевых шпатах зависят от интенсивности их метасоматических изменений.

В пойкилитовых нефелиновых сиенитах (рисчорритах), за исключением их приконтактных разностей, в которых сохраняются реликты микроклин-пертита, развиты существенно калиевые полевые шпаты, причем в породах сосуществуют морфологически несовершенные выделения неупорядоченного ортоклаза (низкого санидина) и максимально упорядоченного микроклина. Одновременное образование разных структурных форм полевых шпатов объясняется, с одной стороны, ионным обменом между микроклин-пертитами нефелиновых сиенитов и богатыми калием постагматическими растворами, а с другой — их перекристаллизацией и непосредственной кристаллизацией метастабильного санидина в полостях растворения. Показано, что состав нефелина также меняется в зависимости от состава кристаллизующихся пород, но эти изменения невелики, так как равновесному составу минерала отвечает отношение  $Na:K = 3:1$ . Наиболее обогащены калием нефелины рисчорритов, ювитов и апатито-нефелиновых пород. Исследования на микрозонде указали на присутствие в них собственной калиевой фазы — кальсилита.

Установлено, что состав щелочных пироксенов и амфиболов массива в разных геолого-петрографических комплексах существенно различается. В нефелиновых сиенитах состав первичного пироксена соответствует члену ряда салит — эгирин, а состав амфибола — арфведсониту; в ийолит-уртитах содержатся пироксен ряда диопсид — эгирин и магнезио-арфведсонит; в дайках щелочных габброидов наблюдаются диопсид-геденбергиты с небольшой примесью натриевой составляющей и амфиболы ряда керсутит — баркевикит. В ходе аутометасоматических изменений во всех породах состав пироксена смещается в сторону эгирина, а амфибол разлагается с образованием вторичного эгирина. В наиболее низкотемпературных ассоциациях кристаллизуются чистый эгирин и очень редко — амфибол состава рибекита.

Состав акцессорных минералов типоморфен для различных геолого-петрографических комплексов. Например, в нефелиновых сиенитах лампрофиллит стронциевый, а в рисчорритах и ийолит-уртитах — бариевый; эвдиалиты в нефелиновых сиенитах бурые, обогащены Fe, Mn, TR, в то время как в рисчорритах и ийолит-уртитах они красные и имеют более простой состав. Редкие земли, входящие в виде изоморфной примеси в апатиты, титанит и эвдиалиты, содержатся в большем количестве и имеют более цериевый состав в нефелиновых сиенитах, но заметно обогащены иттрием в рисчорритах и ийолит-уртитах.

В пегматитах ийолит-уртитов и рисчорритов, вмещающих апатитовое рудное тело, выявлены типоморфные ассоциации минералов, образование которых связано с процессом калиевого метасоматоза.

Эти ассоциации включают минералы, не свойственные нефелиновым сиенитам Хибинского массива и пегматитам нефелиновых сиенитов. Наряду с силикатами (микроклин, дельхайелит, канасит, фенаксит) развиты редкие титаносиликаты (щербаквит, ненадкевичит, лабунцовит, тинаксит, илимаусит), цирконосиликаты (вадеит, лозозерит), сульфиды (джерфишерит, расвумит). В рассматриваемые ассоциации входят также титаносиликаты — ломоносвит, беталомоносвит; характерно выделение многих минералов в виде метакристаллов, часто с образованием скелетных форм, развитие псевдоморфоз и коронито-подобных оторочек. Описаны метакристаллы щербаквита, беталомоносвита, ферсманита, лозозерита по кристаллам эвдиалита. Среди коронитов замещения впервые установлены корониты лозозерита вокруг зерен вадеита.

*Главные минералы оловорудных месторождений.* Е.И. Доломановой при участии сотрудников ИГЕМ АН СССР и других институтов проведено изучение различными методами типоморфных особенностей главных минералов оловорудных месторождений разных формаций — касситерита, кварца, турмалина, слюд, хлорита, полевых шпатов, некоторых сульфидов. Установлено, что химический состав является главным признаком, по которому можно отличать минералы разного генезиса. Его вариации влекут за собой изменение физических свойств и некоторые различия в структурных особенностях минералов. Изменение химического состава минерала по зонам роста и неравномерное распределение элементов в них свидетельствуют о гетерогенности растворов. Изучение химического состава газовой-жидких включений в минералах показало, что химический состав отлагавшихся их растворов был различен. В твердой фазе включений наиболее часто обнаруживаются силикаты, алюмосиликаты, галогениды, простые и сложные окислы, менее обильны сульфаты (или сульфиды), нитраты, фосфаты. К минералам-узникам относятся галит, сильвин, рутил, ильменит, титанит, слюды, корунд, сфалерит, ганит, висмутии, галенит, аргентит, гринокит, барит, сульфаты К, Na, Ca, колумбит-танталит, нитрат Al. При вскрытии вакуолей выброшенная под давлением жидкая фаза (при  $t \sim 20^\circ$ ) содержала хлориды и сульфаты щелочных металлов и их силикаты. Имеется сходство между химическим составом растворов в вакуолях и микроминералов-примесей в минералах-хозяевах.

Касситерит различных месторождений отличается формой кристаллов, структурами агрегатов и включениями (минералов, газовых и жидких фаз). В процессе перекристаллизации происходит очищение сфалерита от примесей с одновременным изменением параметров элементарной ячейки. Условия формирования руд олова влияют на вхождение в решетку кварца  $Al^{3+}$ ,  $Ti^{3+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Mn^{2+}$ . В каналах кварца обнаружены метан, уголекислота, группы  $OH^-$ .

*Гипергенные минералы железа.* Изучение окислов железа зоны гипергенеза показало, что в их образовании огромную роль играют железобактерии (Ф.В. Чухров, Л.П. Ермилова, А.И. Горшков, Б.Б. Звягин). Первичной формой выделения железа из растворов при каталитическом воздействии микроорганизмов является ферригидрит —  $2,5 Fe_2 O_3 \cdot$

$\cdot 4,5 \text{ H}_2\text{O}$  — неустойчивый коллоидный водный окисел железа, впервые описанный сотрудниками ИГЕМ в 1967 г. Доказано его весьма широкое распространение в отложениях холодных источников, в осадках термальных вод Челекена, Курильских островов, кальдеры вулкана Санторин, впадин Красного моря и т.д. Ферригидрит с течением времени самопроизвольно переходит в гематит, т.е. является протогематитовым веществом зоны гипергенеза. Образование ферригидрита предшествует возникновению гематита термально-осадочных стратиформных гематитовых руд. В корах выветривания тропических областей появление ферригидрита как промежуточного продукта объясняет замещение гетита гематитом в верхах латеритного профиля. Ферригидрит — минерал-индикатор отложения железа при окислении  $\text{Fe}^{2+}$  из растворов с реакцией, близкой к нейтральной, обычно с участием железобактерий. Образование ферригидрита было возможно по крайней мере 2 млрд. лет назад.

В отличие от ферригидрита гётит и лепидокрокит обычно образуются без участия бактерий. Выделение гётита непосредственно из растворов возможно в широком интервале значений pH — от самых низких до самых высоких. В коре выветривания гётит в огромных количествах образуется в результате непосредственного замещения обогащенных железом силикатов. Лепидокрокит — продукт трансформации гидроксида железа, которая выделяется из растворов при pH выше 4,5–5,0; он является обычным продуктом выветривания сидеритов, но в отличие от ферригидрита возникает при более низких значениях pH и без участия железобактерий.

*Типоморфное значение изотопного состава серы.* Проведенные исследования (Ф.В. Чухров, Л.П. Ермилова, В.С. Чуриков, Л.П. Носик) позволили обосновать представления о факторах, определяющих особенности изотопного состава сульфидной и сульфатной серы. Основные выводы заключаются в следующем.

1. Сера многих вулканических эксгальций, выделяющихся на дне моря, по значениям  $\delta^{34}\text{S}$  близка к сере мантии (пример — акватория у о. Вулкано). Это же характерно и для образующихся при участии глубинного сероводорода колчеданных руд.

2. Значительная часть серы, участвующей в рудообразовании, является биогенной. На морском дне она генерируется сульфатредуцирующими бактериями в илах, в которые поступают металлоносные растворы. В толще пород суши огромное количество сероводорода содержится в подземных водах; рудообразование является следствием их смешения с металлоносными водами.

3. В вадозной циркуляции участвует сера атмосферных осадков. Вариации ее изотопного состава относительно невелики. Значения  $\delta^{34}\text{S}$  поверхностных вод и вод верхней зоны поверхностного стока во многом зависят от изотопного состава серы атмосферного происхождения.

4. В зоне гипергенеза в геохимии изотопов серы несомненно первостепенное значение бактериальной сульфатредукции. Вместе с тем все более очевидным становится влияние на изотопный состав природной серы регенерации сульфата из сероводорода. Особенно велико значение

этого процесса в формировании изотопного состава серы сульфидов осадочных пород, что весьма наглядно иллюстрируется результатами определения  $\delta^{34}\text{S}$  в различных зонах пиритовых и баритовых конкреций. Общая тенденция к понижению  $\delta^{34}\text{S}$  сульфатной серы эвапоритов в истории Земли может быть объяснена усилением роли регенерации сульфата с развитием фотосинтеза.

5. Процессы бактериальной сульфатредукции в зоне гипергенеза руд приводят к образованию вторичных сульфидов, отличающихся резким повышением содержания изотопа  $^{32}\text{S}$  (например, гипергенный коллоидальный халькопирит из руд Дзержинского).

Исследование типоморфизма минералов в ИГЕМ способствовало общему развитию учения о зависимости состава и свойств минералов от их генезиса; уточнены теоретические основы этого учения и показана его эффективность на примерах типоморфизма ряда промышленно-ценных минералов. По инициативе ИГЕМ и при участии других институтов в 1970 г. состоялось первое совещание по типоморфизму минералов, на котором были освещены результаты разработки этой проблемы в СССР. Отмечена необходимость повышения уровня работы минералогических лабораторий предприятий и экспедиций; рекомендовано введение в курсы минералогии в вузах специального раздела по типоморфизму. В 1969 г. вышел из печати сборник работ ИГЕМ по проблеме ("Типоморфизм минералов", М., "Наука"), а в 1972 г. — сборник, подготовленный совместно с институтами Министерства геологии СССР ("Типоморфизм минералов и его практическое значение", М., "Недра").

Дальнейшее развитие учения о типоморфизме минералов, по-видимому, пойдет по двум взаимосвязанным путям. К первому должно относиться накопление материалов наблюдений над условиями локализации типоморфных минералов и их сообществ в разных геологических условиях. Второе направление включает теоретическое и экспериментальное изучение зависимости состава и свойств минералов от условий их образования, определение полей стабильности минералов и параметров физико-химических систем.

#### ОСНОВНЫЕ ВОПРОСЫ ИЗОМОРФИЗМА, ОДНОРОДНОСТИ И НЕОДНОРОДНОСТИ МИНЕРАЛОВ

Это направление заняло одно из центральных мест в минералогических исследованиях ИГЕМ с конца шестидесятых годов.

Выбор объектов изучения в известной мере определился результатами первого этапа работ по типоморфизму минералов. Применение новейших тонких методов исследования вещества, особенно электронографии, электронной микроскопии, электронного микрозондирования, локального лазерного анализа, привело к ревизии устоявшихся представлений об однородности выделений минералов. Выяснилось, что многие из них содержат ультратонкие включения, различимые при очень больших увеличениях, некоторые "минералы" оказались тонкими смесями. Возникла задача уточнения фундаментальных положений минералогии, относящихся к понятиям "минеральный вид", "разновид-

ность", и пересмотра конституции некоторых минералов. Одновременно разрабатывались основы интерпретации особенностей химизма минералов, которые важны для расчета формул природных соединений. От успехов в познании однородности минеральных индивидов и их агрегатов во многом зависит усовершенствование методов обогащения минерального сырья.

*Самородное золото.* Н.В. Петровской и К.Е. Фроловой при участии В.Г. Лютцау методами электронной микроскопии и микролауэграмм обнаружены ранее не известные проявления неоднородности выделений самородного золота в виде тонкой и грубой мозаичности индивидов; измерены углы дезориентировки блоков, доказана их зависимость от содержания в золоте серебра. Установлены переходы мозаичности к структурам расщепленного роста индивидов, особенно характерным для малых глубин минералообразования.

Новое освещение получили особенности распределения серебра в индивидах золота: наряду с синкристаллизационной (зоны роста) выявлена эпикристаллизационная зональность — следствие диффузионной перегруппировки серебра. Высказана мысль о связи этих явлений с действием периодически активизирувавшихся потоков глубинного тепла. Доказано существование ультратонкой "слоистости" и мозаичности кристаллов золота, связанных с неоднородностью его состава и строения, распределением дефектов. Обнаружены межблоковые и доменные обособления золота, отличающегося по составу от основной массы отдельных золотин.

Н.В. Петровской выдвинуто положение о метастабильности природных твердых золото-серебряных растворов и их распаде в течение геологического времени на несколько стехиометрических интерметаллических соединений ( $Au_3Ag$ ,  $AuAg$ ). Это положение подтверждено результатами изучения тех свойств самородного золота, зависимость которых от состава имеет многомодальную форму (М.И. Новгородова). Впервые установлена неоднородность ультратонкого рельефа поверхности золотин. В природных сульфидах обнаружены тончайшие монокристалльные включения самородного золота размерами от долей микрона до нескольких микрон; некоторые из них обладают ультратонким мозаичным строением (Н.В. Петровская, М.И. Новгородова).

*Сложные сульфиды.* Н.Н. Мозговой при участии Ю.С. Бородаева обосновано существование среди минералов этой группы гомологических рядов кристаллохимически родственных соединений, которые можно рассматривать как ряды и семейства упорядоченных фаз. Состав и свойства их закономерно изменяются при переходе от одного члена ряда — к другому. Гомологические ряды сложных сульфидов обладают следующими характерными признаками: 1) соединения ряда (за исключением некоторых крайних членов) имеют одинаковый качественный состав и различаются между собой лишь количественными соотношениями одних и тех же элементов; 2) увеличение относительного содержания определенного компонента сопровождается закономерным изменением одного из параметров элементарной ячейки соединений; 3) порошкограммы всех членов ряда характеризуются большим сход-

ством, незначительные отличия носят закономерный характер и зависят от содержания определенных компонентов; 4) изменение состава минералов гомологических рядов сопровождается закономерным изменением их физических и механических свойств; 5) наиболее хорошо изученные ряды представляются почти непрерывными; 6) характерны разнообразные закономерные срастания минералов — членов одного ряда — графические, решетчатые, полосчатые, зонарные и другие, что во многом обуславливает неоднородность сложных сульфидов.

Существование гомологических рядов упорядоченных фаз показывает, что изоморфизм со статистическим неупорядоченным распределением разных элементов в пределах одной системы точек в сложных сульфидовых при обычных условиях отсутствует и возможен лишь при повышенных температурах. Закономерные срастания различных минералов одного ряда, очевидно, представляют собой структуры распада, которые возникают при упорядочении твердых растворов, существовавших при высоких температурах. При достаточном накоплении экспериментальных данных подобные структуры могут использоваться в качестве геологических термометров.

Необходимость по-новому подойти к номенклатуре сложных сульфидов очевидна. Поскольку в пределах отдельного ряда происходит квазинепрерывное изменение не только химического состава, но и структуры, то в ряде случаев предлагается отказаться от понятий о видах минералов и использовать более широкое понятие рода, охватывающее все разнообразие составов и структурных изменений в рассматриваемых системах. Подход к сложным сульфидам как к минералам постоянного состава и строения без учета взаимосвязей, существующих в гомологических рядах, привел бы к выделению в качестве минеральных видов очень близких природных соединений и появлению излишних названий (например, ратит 1 и ратит 2).

На основе произведенных исследований выделены следующие гомологические ряды: висмутин — айкинит ( $Pb-Cu-Bi-S$ ); семсейит — фюльппит ( $Pb-Sb-S$ ); гунгаррит — лиллианит ( $Pb-Bi-S$ ); бенжаминиты ( $Pb-Ag-Cu-Bi-S$ ); рамдорит — андорит ( $Pb-Ag-Sb-S$ ). Кроме того, различаются семейства: кобеллит — тинтинаит ( $Pb-Bi-Sb-S$ ); висмутовых джемсонитов — сахароваитов ( $Pb-Bi-Sb-S$ ); цилиндритов — франкеитов ( $Fe-Pb-Sn-Sb-S$ ).

*Титаномагнетиты из рудоносных формаций пород основного состава.* Титаномагнетиты, генетически связанные с дифференцированными массивами основных пород, являются многофазными образованиями. Неоднородность их строения обусловлена разнообразными структурами распада твердых растворов (ульвёшпинель, ильменит и шпинель в магнетите). Наличие таких структур в титаномагнетите свидетельствует о формировании руд и рудоносных пород при высоких температурах и их медленном охлаждении.

Разнообразие структур индивидов титаномагнетитов в значительной мере зависит от условий их образования, последующего окисления и метаморфизма, вызвавшего перекристаллизацию рудного вещества. Большим разнообразием структур распада отличаются титаномагнети-

ты габброидов по сравнению с титаномагнетитами ультраосновных и щелочных пород. Для титаномагнетитов из пород ультраосновного и щелочного комплексов характерны структуры распада твердого раствора ульвёшпинель — магнетит, что свидетельствует об избытке закисного железа при его кристаллизации, а следовательно, об относительно низком парциальном давлении кислорода. Экспериментально установлено, что в процессе нагревания изменение структуры индивидов титаномагнетита начинается с растворения ульвёшпинели, затем исчезают пластинки ильменита и шпинели. В акцессорном титаномагнетите пластинки ильменита растворяются при более высоких температурах, чем пластинки ильменита в титаномагнетите рудного габбро и в сплошных рудах. Эти данные согласуются с представлением о кристаллизации титаномагнетита и образовании руд на заключительном этапе становления габброидных плутонов.

Титаномагнетиты содержат в различном количестве ванадий, хром, магний, алюминий, марганец и другие элементы. Наиболее высокие содержания элементов-примесей типичны для титаномагнетитов густо-вкрапленных и сплошных руд. Исследования с помощью электронного микроскопа показали, что почти весь магний и алюминий концентрируются во включениях шпинели, а ванадий — в магнетите.

*Окислы железа.* Проведено изучение природных выделений ферригидрита и окислов железа морских железо-марганцевых желваков (Ф.В. Чухров, Б.Б. Звягин, Л.П. Ермилова, А.И. Горшков и др.). Установлено, что в природе ферригидрит может замещаться гётитом, в некоторых случаях нацело. Эксперименты с природными и искусственными ферригидритами показали, что переход ферригидрита в гётит легко осуществляется, если бактериальное окисление железа прекращается, но в растворе имеются ионы двухвалентного железа. Сущность явления сводится к проникновению двухвалентного железа в решетку ферригидрита с его последующим абиогенным окислением; происходит распад неустойчивого ферригидрита, вместо которого кристаллизуется устойчивый гётит. При этом нередко образуются смеси двух названных минералов. В железо-марганцевых желваках со дна Белого, Карского и Балтийского морей и Тихого океана установлены смеси гётита с новой полиморфной модификацией  $\text{FeOOH}-\delta'-\text{FeOOH}$  (феноксигит).

*Минералы со структурой апатита.* Проведенное З.В. Васильевой изучение минералов со структурой апатита из различных месторождений Советского Союза позволило установить, что для ряда апатитов (из ультраосновных щелочных пород, некоторых фосфоритов и др.) характерен недостаток элементов группы (F, OH, Cl), который обычно объяснялся изоморфным вхождением в структуру кислорода с образованием оксиапатита. Однако такие апатиты оказались неоднородными. Наряду с апатитом состава  $\text{Ca}_{10}\text{P}_6\text{O}_{24}(\text{F}, \text{OH}, \text{Cl})_2$  они содержат тетракальциевый фосфат  $\text{Ca}_4\text{P}_2\text{O}_9$  (хильгенштокит), который ранее был известен только в фосфористых шлаках. Для возникновения фосфата кальция состава  $\text{Ca}_4\text{P}_2\text{O}_9$  необходимо преобладание в минералообразующей среде кальция, тогда как реакции синтеза апатита проте-

кают при более высоком содержании фосфора и летучих компонентов в среде минералообразования.

В результате изучения бритолита — силиката редких земель и кальция со структурой апатита — показано, что этот минерал не содержит бора. С помощью микрозонда установлено, что алюминий в бритолите и близких к нему кариоцерите, меланоцерите и тритомите встречается в виде включений, по-видимому,  $Al_2O_3$  или  $Al(OH)_3$ . Железо в бритолите лишь частично является изоморфной примесью, другая часть его входит в состав включений окислов  $Fe^{3+}$ . В бритолите установлены также включения урансодержащего минерала, по-видимому, ураноторита. Определен состав зон в зональном бритолите; изотропные зоны сильно обогащены редкими землями, водой и в меньшей степени — кремнием.

Исследования, посвященные неоднородности минералов, показывают, что она может быть как первичной, так и обусловленной неустойчивостью многих природных веществ. Выдвинуты положения о существовании быстро исчезающих минералов-эфемеров (Ф.В. Чухров) и минералов, меняющих свои особенности за длительное время в связи с явлением "старения" (Н.В. Петровская).

Результаты исследований изложены в сборнике "Вопросы однородности и неоднородности минералов" (1971). Большое значение имело опубликование в 1964 г. книги И.Д. Борнеман "Расчеты формул минералов", использование которой важно для разработки вопросов изоморфизма.

Развитие рассматриваемого направления должно быть более тесно связано с работами по общей кристаллохимии; особого внимания заслуживают эксперименты, освещающие стабильность природных соединений, их фазовые превращения и изменения.

#### СОСТАВЛЕНИЕ ЭНЦИКЛОПЕДИЧЕСКОГО СПРАВОЧНИКА "МИНЕРАЛЫ"

Накопление в СССР и других странах огромного материала по составу, структурам, свойствам, морфологии и генезису минералов уже давно определило необходимость обобщения и систематизации данных, важных как для общего развития геолого-минералогических знаний, так и для их применения при поисках, разведке и оценке минеральных месторождений, в технологии минерального сырья. Зарубежные минералогические справочники устарели или не полны. Полные отечественные справочники по минералогии до пятидесятих годов отсутствовали. Минералогами ИГЕМ при участии сотрудников Минералогического музея АН СССР предпринята весьма трудоемкая работа по составлению многотомного справочника "Минералы" (главный редактор акад. Ф.В. Чухров).

За период с 1965 по 1974 г. вышли в свет: а) том II, выпуск 2 "Простые окислы" (1965); описаны 65 минералов; б) том II, вып. 3 "Сложные окислы, титанаты, ниобаты, танталаты, антимонаты, гидроокислы" (1967); описаны 187 минералов; в) том III, вып. 1 "Силикаты с одиноч-

ными и двоянными кремнекислородными тетраэдрами" (1972); описаны 180 минералов. Все опубликованные тома справочника "Минералы" являются настольными книгами для минералогов, петрографов, геохимиков, геологов различных специальностей и широкого круга специалистов, имеющих дело с изучением и использованием минерального сырья.

В 1974 г. серия таких справочников "Минералы" пополнилась двумя выпусками, содержащими диаграммы фазовых состояний; в их подготовке особенно велика роль В.И. Лапина и И.А. Островского.

С обобщением и систематизацией справочных материалов по минералам тесно связана работа по учету и апробации новых открытий минеральных видов. В этой работе активно участвовали Э.М. Бонштедт-Кушлетская, Н.Н. Смольянинова, И.Д. Борнеман-Старынкевич. Э.М. Бонштедт-Кушлетской систематически составлялись обзоры новых открытий. За 1965—1974 гг. в записках Всесоюзного минералогического общества опубликовано 12 таких обзоров. В 1974 г. издана книга "Новые минералы" (1954—1972), составленная Э.М. Бонштедт-Кушлетской в соавторстве с О.А. Арбузовой.

#### НОВЫЕ ДАННЫЕ ПО КРИСТАЛЛОГРАФИИ МИНЕРАЛОВ

Определение кристаллических структур и уточнение структурных особенностей минералов является важнейшим направлением современной минералогии. Структурные исследования необходимы не только для создания основ точной идентификации и создания правильной классификации минералов, но и для выяснения кристаллохимических и генетических факторов их существования в природе. Для развития этого направления в ИГЕМ АН СССР использовались как рентгеновский метод, так и методы дифракции электронов и, в частности, высоковольтная электронография.

Методом электронографии благодаря преимуществу электронограмм от текстур, в особенности снятых при напряжении 350 кВ, определены кристаллические структуры накрита, диоктаэдрических слюд  $2M_2$ ,  $1M$  (селадонита), парагонитов  $1M$ ,  $2M$ ,  $3T$ , чапманита  $SbFe_2Si_2O_8(OH)$  и бисмутоферрита  $BiFe_2Si_2O_8(OH)$ .

Существенно, что новые кристаллохимически важные структурные данные были получены для тонкодисперсных выделений минералов, в отношении которых рентгеноструктурный анализ мало эффективен. Так, выяснилось, что считавшийся ортосиликатом чапманит является впервые установленным представителем слоистых силикатов со структурой из каолинитоподобных слоев с атомами  $Fe^{3+}$  вместо алюминия в октаэдрах и атомами сурьмы в межслоевых положениях; показано, что бисмутоферрит изоструктурен с чапманитом. Были определены отличия двухэтажных слоев накрита по углу разворота тетраэдров от слоев того же состава у каолинита и диккита. В диоктаэдрических слюдах  $1M$ ,  $2M_2$  обнаружено упорядоченное распределение изоморфных замещений Si на Al в тетраэдрах, что проливает свет на общие закономерности изоморфизма, его влияние на симметрию слоев и устойчивость структур ми-

нералов. Изучение структуры слюды  $2M_2$  раскрыло роль плотнейшей кубической упаковки анионов в пределах отдельных слоев, условия и возможности формирования на первый взгляд энергетически невыгодных структур межслоевых промежутков. На примере селадонита, гакманита и бисмутоферрита оказалось возможным выяснить своеобразное влияние на структуры, которые вызывает вхождение катионов  $Fe^{3+}$  в октаэдры слоистых силикатов.

Рентгеноструктурный анализ позволил расшифровать кристаллическую структуру ашарита ( $MgHVO_3$ ) с определением возможных положений протонов.

При помощи метода микродифракции электронов в сочетании с высоковольтной электронографией и рентгеноструктурным анализом получены данные о природе галлуазита как политической модификации каолинита. Изучение цинковых глинок показало, что их главным минералом является цинальсит — силикат с серпентиноподобной структурой. Основным минералом медистых глинок оказалась хризоколла. Для этого минерала, несмотря на плохую окристаллизованность, была предложена структурная модель из слоев искаженных  $Cu$ -октаэдров, соединенных слоями  $Si$ -тетраэдров с попеременно обращенными в разные стороны вершинами.

Анализ картин дифракции электронов позволил уточнить природу плохо окристаллизованных гидроокислов железа и предложить приближенные структурные схемы для ферригидрита и дельта-гидроокислов. Теоретические и экспериментальные исследования политипии пирофиллитов и тальков, серпентинов, одноpacketных хлоритов, астрофиллита послужили основой идентификации природных и синтетических политипных модификаций этих минералов. Проанализирована относительная вероятность формирования политипов молибденита, зависящая не столько от абсолютных значений температур и давлений, сколько от степени стабильности этих параметров и их пространственных градиентов. Предложен универсальный метод описания политипных модификаций, получивший положительную оценку в Номенклатурной комиссии Международной минералогической ассоциации. Рекомендован метод описания и сопоставления триклинных решеток минералов и найдены закономерности отображения их геометрии в дифракционных картинах.

С помощью разработанной в Институте методики микродифракционной съемки базальных отражений выявлены элементы упорядоченности смешанослойных силикатов, что представляет собой детализацию их усредненной характеристики, получаемой рентгеновским методом. Найдены особенности ОД-структур титансодержащего хондродита, рустумита, илимаусита, ненадкевичита. Комплексом рентгеновских методов, включающих термодифрактометрию, изучен фазовый состав слоистых никелевых силикатов, получены новые диагностические критерии для двух разновидностей гиббсита, а также для нордстрандита и алюмогидрокальцита.

Сочетание рентгеноструктурного анализа и микродифракции электронов позволило изучить весьма интересный и кристаллохимически своеобразный класс минералов с так называемой гибридной структурой, сос-

тавленной из разнородных по химическому составу и строению слоев. Были изучены четыре разновидности гибридной структуры точилинита, состоящей из бруситовых и макинавитовых слоев, и новая разновидность однослойного валлерита.

В дальнейшем на более высоком уровне с применением электронно-вычислительных машин будут изучаться структуры слоистых силикатов, амфиболов, сульфидов, боратов. Точечные электронограммы монокристаллов будут расшифровываться с анализом интенсивностей; в практику рентгеновского исследования будет внедрен метод малоуглового рассеяния. Наряду с развитием работ по расшифровке структур отдельных минералов будет увеличиваться роль теоретических работ по структурной минералогии, включая вопросы полиптипии, упорядоченности структур и изоморфизма.

## ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ФИЗИКИ МИНЕРАЛОВ

Работы ИГЕМ положили начало особому направлению минералогических исследований в СССР, связанному с раскрытием природы физических свойств минерального вещества как функций его состава и строения. Основой исследований, которые были начаты в 1965 г., послужило применение современной аппаратуры и вычислительной техники. Эти исследования приобрели большой размах. В двух монографиях А.С. Марфунина — "Введение в физику минералов" (1974) и "Спектроскопия, люминесценция и радиационные центры в минералах" (1975) впервые подведены итоги и намечены дальнейшие перспективы применения теорий и методов современной физики твердого тела в минералогии. В этих монографиях на основании проводившихся в ИГЕМ исследований и литературных данных рассмотрены теории кристаллического поля, молекулярных орбиталей, зон в приложении к конкретным минеральным системам и охарактеризованы все виды спектроскопии твердого тела (мессбауэровская, рентгеновская, электронная, ЭПР, ЯМР, ЯКР, оптическая, люминесценция и термолюминесценция). На основании расчетов и спектроскопических измерений дано современное описание химической связи в силикатах, сульфидах, окислах и т.д. Рассмотрена оценка энергетических расчетов для минералов (упорядочение системы ионных и атомных радиусов) с учетом новейших теорий и расчетных возможностей. Охарактеризованы основные механизмы, определяющие природу окраски, люминесценции и термолюминесценции минералов. Рассмотрены электронно-дырочные центры в минералах.

Л.В. Бершовым и А.С. Марфуниным (совместно с М.И. Самойловичем) были открыты свободные радикалы и другие электронно-дырочные центры в структурах важнейших порообразующих минералов и показано их широкое распространение. Произведены детальные расшифровки моделей электронно-дырочных центров в полевых шпатах, кварце, ангидрите и других минералах. Намечены пути использования этих моделей при изучении оловорудных и вольфрамовых месторождений и пород метаморфических комплексов разных фаций глубинности.

Возможности дальнейшего развития рассматриваемого направления весьма велики. Очевидно, будут расширяться сферы применения мессбауэровской и инфракрасной спектроскопии, люминесценции и термолюминесценции. Наряду с дальнейшей разработкой фундаментальных положений усилится роль физики минералов в изучении минералогии рудных месторождений и рудоносных регионов. Развитие методов будет стимулироваться и применением минералов в новой технике (радиационно-устойчивые пьезоэлектрики, фотохромные экраны и т.д.), исследованием вещества Луны и других планет. Работы в области ЯМР позволят подойти к расшифровке форм вхождения воды в структуры минералов.

#### ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ СОВРЕМЕННОГО ГИДРОТЕРМАЛЬНОГО МИНЕРАЛО- И РУДООБРАЗОВАНИЯ

Исследования проводились Л.М. Лебедевым в пределах гидротермальных систем Челекена, о. Кунашира (Курильские о-ва) и Узона (Камчатка).

Исследования на Челекене явились продолжением ранее начатых работ. На опорных скважинах проводились систематические наблюдения над изменением уровней концентраций рудных компонентов (свинец, цинк, кадмий, медь и мышьяк) во времени. Они позволили выявить закономерное последовательное понижение концентраций тяжелых металлов с 1970 по 1975 г. По отношению к уровню 1968–1969 гг. концентрации свинца, цинка, кадмия, меди и мышьяка понизились на 1–1,5 порядка. В целом систематическое изучение Челекенских металлоносных рассолов с 1966 по 1975 г. позволило установить неизвестные ранее колебания содержания тяжелых металлов во времени вне связи с сезонными явлениями. Эмпирические данные показывают, что повышение концентраций металлов предшествует (1–1,5 месяца) повышению сейсмической активности в регионах.

Исследования новообразованных сульфидов железа показали, что вначале из раствора выделяется аморфный моносulfид железа, затем в течение года он путем последовательных превращений переходит в пирит по схеме: аморфный моносulfид железа → кубический моносulfид железа (канзит) → тетрагональный моносulfид железа (макинавит) → мельниковит ( $Fe_3S_4$ ) → пирит (стабильная фаза).

Изучение древних путей разгрузки металлоносных рассолов в пределах Челекенской антиклинальной структуры позволило установить значительное количество палеорусел, пески которых обогащены дисперсными оксихлоридами меди, свинца и серебра.

На о. Кунашир (Курильские острова) на вулканах Менделеева, Головнина и Руруй изучены особенности состава и металлоносности кислых сульфатно-хлоридных гидротерм. Установлены значительные концентрации в них цинка, свинца, меди и мышьяка (миллиграммы на литр) и повышенные — сурьмы и кадмия (0,0*n*–0,*n* мг/л). Детально изучена минералогия молодых колчеданных руд вулкана Менделеева. Показано, что помимо метасоматических руд здесь широко развиты отложения кипящих озер и котлов. Получены доказательства более позднего воз-

раста ртутных рудопроявлений в сравнении с колчеданными рудами. В последних, как следует из данных бурения, наблюдается увеличение роли медной минерализации на глубине 150–200 м с относительно широким развитием энаргита и люцитита.

На вулканах Алайд (о. Атласова) и Тятя (о. Кунашир) были получены данные по масштабам выноса халькофильных элементов в виде летучих соединений из кипящего лавового расплава. Количества цинка, свинца, меди и других элементов, вынесенных во время эруптивной стадии извержения вулканов (в течение 2–3 недель), определяются десятками тысяч тонн.

Дальнейшее развитие исследований должно идти по следующим путям: а) проведение стационарных наблюдений для накопления данных о металлоносных гидротермальных системах; б) физико-химический анализ процессов минералообразования; в) их экспериментальное моделирование.

## ВЫВОДЫ

Минералогические исследования в ИГЕМ направлены на изучение широкого круга вопросов теоретического и прикладного значения. К их решению привлечен комплекс современных методов изучения вещества. Наибольший вклад работы ИГЕМ внесли в развитие учения о типоморфизме минералов, их кристаллохимию (политипия, упорядоченность структур и т.д.). Полностью оправдал себя огромный труд по составлению справочника "Минералы", который способствует общему подъему уровня минералогических работ в СССР.

В ИГЕМ возникло и получило развитие новое фундаментальное направление минералогии — физика минералов с ее теоретическими и прикладными задачами. Весьма перспективными следует считать исследования по однородности минералов и изоморфизму в них. Для решения широкого круга вопросов минерало- и рудогенеза сохранит свое значение изучение современных гидротермальных систем.

Развитие главных направлений современной минералогии оказывает существенное влияние на изучение проблем, относящихся к другим областям геологических знаний. Типоморфизм, неоднородность и изоморфные замещения в минералах привлекают все большее внимание петрологов и литологов. От прогресса в познании "индикаторов" — типоморфных минералов и типоморфных особенностей минералов во многом будут зависеть дальнейшее развитие общей теории рудообразования и использование минералогических критериев при поисках и оценках месторождений различных типов.

# ГЕОХИМИЯ ЭНДОГЕННЫХ И ГИПЕРГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

## ВВЕДЕНИЕ

Геохимическими исследованиями в последние годы охватывается все больший и больший круг геологических процессов, протекающих на различных глубинных уровнях нашей планеты. Широким фронтом ведутся исследования в области геохимии мантии и земной коры, геохимии эндогенного и экзогенного рудообразования и его эволюции в истории развития Земли, геохимии отдельных элементов и их изотопов, геохимических методов поисков рудных месторождений. Большое внимание уделяется геохимическим исследованиям, направленным на выяснение роли различных источников рудного вещества в процессах рудообразования.

Для решения геохимических задач привлекается обширный фактический материал, накопленный как в геохимии, так и в смежных областях геологических наук, особенно в геологии рудных месторождений, петрографии и минералогии. Всемерно используются достижения химии, физики и математики, новейшие методы изучения природного вещества, включая термодинамический анализ и экспериментальное моделирование различных геохимических процессов.

В Институте геохимические исследования проводятся в различных отделах и лабораториях при решении научных проблем в области генезиса рудных месторождений, минералогии, петрологии, метаморфизма и метасоматизма. Разработка специальных геохимических вопросов выполнялась в отделе геохимии, организатором и руководителем которого в течение многих лет — с 1949 по 1964 г. был член-корреспондент АН СССР А.А. Сауков. Основными направлениями, которые традиционно развивались в отделе геохимии, являлись: общие теоретические вопросы геохимии, геохимия отдельных элементов, геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых.

Геохимия отдельных элементов развивалась в Институте со времен академика А.Е. Ферсмана. Продолжением и углублением этого направления явились монографии А.А. Саукова "Геохимия ртути" и "Радиоактивные элементы земли" (1961). А.А. Сауков являлся одним из первых исследователей радиоактивных элементов в Институте. В его работах рассмотрены и охарактеризованы распространенность радиоактивных элементов, тепловой баланс Земли и радиоактивные элементы, миграция радиоактивных элементов, месторождения урана, радиоактив-

ные элементы и абсолютный возраст Земли, поиски месторождений радиоактивных элементов. А.А. Сауков вместе с И.И. Гинзбургом — один из родоначальников разработки теоретических основ геохимических методов поисков. Обобщающая монография такого плана "Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых" написана А.А. Сауковым в 1963 г. Крупное общетеоретическое значение имеют исследования А.А. Саукова (1960, 1964) в области эволюции факторов миграции в геологической истории. Он предложил выделить специальный раздел геохимии, посвященный этой проблеме, и по аналогии с "исторической геологией" назвать его "исторической геохимией". Научные направления, разрабатывавшиеся А.А. Сауковым, продолжают успешно развивать его ученики и последователи.

После 1964 г. отдел геохимии возглавлял академик Д.И. Щербаков, а затем член-корреспондент АН СССР Ф.К. Шипулин. Важным новым направлением, которое внес Ф.К. Шипулин в тематику Отдела, являлась геохимия магматического процесса. Основные результаты исследований по этому направлению изложены ниже в соответствующем разделе. В 1973 г. отдел геохимии был преобразован в Лабораторию геохимии рудных месторождений.

Геохимические исследования, которые проводились в отделе геохимии, а затем и в лаборатории геохимии рудных месторождений, за последние 10 лет направлены на решение следующих главных проблем: геохимии эндогенных процессов, геохимии рудообразующих процессов на примере отдельных элементов, геохимии гипергенных рудообразующих процессов<sup>1</sup>.

## ГЕОХИМИЯ ЭНДОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Исследования по геохимии этих процессов были направлены на выяснение: особенностей связи повышенных концентраций рудных элементов с различными магматическими дифференциатами; кинетики магматических процессов и геохимии отдельных групп петрогенных и рудообразующих элементов в магматических процессах; магматических и внемагматических источников металлоносных растворов. Все эти вопросы были разработаны Ф.К. Шипулиным. В отдельных разделах исследований принимали участие В.П. Капсамун и В.И. Рехарский.

На основе анализа геологических и геохимических условий образования эндогенных месторождений различного генезиса (на примере Приморья, Алтая, Казахстана, Урала и других регионов) и их соотношений с магматическими породами Ф.К. Шипулин (1965, 1969) выделил собственно магматические месторождения, связанные с основной и ультраосновной магмами; послемагматические месторождения, связанные с

<sup>1</sup> Материалы по геохимии эндогенных процессов представлены В.И. Рехарским и В.П. Капсамуном, по геохимии молибдена — В.И. Рехарским, по геохимии ртути — Н.А. Озеровой, по изучению газовой-жидких включений — Ю.Н. Пашковым и по геохимии гипергенных процессов — А.И. Перельманом.

основной магмой, и послемагматические месторождения, связанные с кислой и субщелочной магмами. К первой серии отнесены хромитовые месторождения, являющиеся прямыми производными первичных ультраосновных магм, а также медно-никелевые, циркониевые, редкоземельные и другие месторождения, связанные с основными и щелочными магмами. Вторая серия включает колчеданные, полиметаллические, сульфидно-касситеритовые, сурьмяно-ртутные и другие месторождения, которые не всегда сопровождаются какими-либо интрузиями, но чаще всего связаны во времени и пространстве с дайками основных и средних пород, представляющими дифференциаты глубинных очагов основной магмы. К третьей серии относятся месторождения в пегматитах, грейзенах и высокотемпературные кварцевые жилы, содержащие вольфрам, молибден, олово, ниобий, тантал, бериллий, бор, редкие земли, литий, рубидий, цезий, цирконий, а также некоторые скарновые магнетитовые месторождения и рудопоявления сульфидов халькофильных элементов. Рассмотрены различные типы оруденения, связанного с ассимиляционным обогащением рудными элементами магматических расплавов, и оруденения, связанного с извлечением компонентов из рудовмещающих толщ.

Геолого-петрографические исследования в сочетании с данными по физической химии сложных силикатных расплавов позволили осветить кинетику магматических процессов, основные особенности кристаллизации магматических расплавов и поведения в них петрогенных и рудных элементов.

Ф.К. Шипулин (1968<sup>1,2</sup>) установил, что решающее значение при внедрении интрузий имеет энергия структурных перегруппировок ионно-ассоциативных групп в самом расплаве, и выдвинул представление о механизме внедрения интрузий на основе конвекций магматического расплава с растворением, расплавлением и разрушением вмещающих пород в апикальных частях интрузий.

Показано, что особенности кристаллизации силикатных расплавов обусловлены рядом взаимодействующих факторов: энергетической выгодностью процессов кристаллизации, геометрическими факторами, в соответствии с которыми формы решеток минералов и размеры их ячеек определяются размерами входящих в их состав ионов, активностью компонентов, условиями кристаллизации расплава и другими.

По близости энергетических и геометрических характеристик петрогенные и рудные элементы разделены на две группы: первая, характерная для кислых магм, — Si, Al, K, Na, Li, Rb, Cs, Be, TR, P, Zr, Nb, Ta, W и вторая, свойственная основным магмам, — Fe, Mg, Mn, Co, Ni, Ti, Cr, Cu, Ag, Au, Zn, Cd, Hg, Pb, Ge, As, Sb, Bi. В этом случае находит объяснение генетическая связь месторождений многих редких элементов с гранитоидными, а месторождений халькофильных и сидерофильных элементов с базальтоидными магмами.

Ф.К. Шипулин (1969, 1975) выделил три главных типа источников рудного вещества эндогенных месторождений и дал их общую характеристику. К первому главному источнику отнесены первичные магматические расплавы: основные и ультраосновные магмы с их дифферен-

циатами, возникшие при плавлении базальтических слоев или пород верхней мантии, и самостоятельные гранитоидные магмы, образовавшиеся при плавлении сиалических толщ земной коры. Вторым источником являются магматические расплавы, контаминированные в результате ассимиляции разнообразных металлосодержащих горных пород, залегающих в верхних частях земной коры, и к третьему типу отнесены непосредственно рудовмещающие горные породы и насыщавшие их минерализованные подземные воды, часть веществ которых под влиянием магматических масс, ювенильных растворов или метаморфических процессов вовлекалась в рудообразование.

В зависимости от степени равновесности процессов кристаллизации отделение рудообразующих растворов может происходить из глубинных очагов в магматическую стадию и из гипабиссальных камер — в послемагматическую. Ф.К. Шипулин (1968<sub>1</sub>, 1969) отметил, что при кристаллизации магмы в относительно равновесных условиях растущие кристаллы включают микроэлементы, близкие по физическим и химическим свойствам к главным петрогенным элементам. Другая часть элементов из-за больших различий между ними и петрогенными элементами в радиусе ионов, зарядах, ионных потенциалах (B, Be, W, Nb, Ta, V и др.) или вследствие особенностей строения электронных оболочек катионов и высокой поляризующей способностью (Fe, Ni, Co, Cu, Ag, Au, Zn, Cd, Hg, Pb, Sn, Sb, Bi) в решетки силикатных минералов входят с трудом и по мере кристаллизации магмы в гипабиссальных камерах накапливаются в остаточном расплаве. Увеличение активностей компонентов к концу кристаллизации создает условия для их отделения. В глубинных очагах основной магмы может проявляться ликвационное отделение рудных элементов от силикатного расплава, сначала в виде тонкой эмульсии, а затем в результате коалесценции происходит образование более крупных обособлений.

На основе исследования условий возникновения металлоносных растворов, образующихся при вулканических извержениях, Ф.К. Шипулин (1968<sub>2</sub>) сделал важный вывод о формировании металлоносных растворов в результате взаимодействия нагретых вулканических, в том числе пирокластических пород, с проникающими в них метеорными и грунтовыми водами. В дальнейшем были исследованы процессы, протекающие в контактных зонах интрузий. При решении этих задач использован большой геологический материал, проведен его физико-химический анализ и выполнены оригинальные экспериментальные работы по термодиффузионным явлениям в водных растворах различных солей, моделирующие природные процессы в контактных зонах рудоносных интрузий.

Выявлены геохимические закономерности и дана количественная оценка особенностей накопления элементов в различных магматических дифференциатах вещества Земли. На основе величин коэффициентов накопления, отражающих преимущественную тенденцию к концентрации элементов в различных магматических дифференциатах, В.И. Рехарским (1966, 1973) составлены геохимическая таблица и ряды накопления элементов для изверженных пород. Установлена периодичность ко-

эффициентов накопления. Выделены три класса элементов: базитовый (Ni, Cr, Co, Mg, Pd, Rh, Sc, Pt, Ir, Fe, Ru, Os, Mn, Cu, V, Sb, Ca, Ti), мезитовый (Ag, Au, Se, Te, Zn, O, Re, Cd, Ce, P, Br, Po, Hg) и окситовый (Si, As, Mo, Sr, N, S, Y, I, Al, Hf, C, Na, Ga, Nb, In, Bi, Sn, Zr, W, Cl, F, La, B, Pb, Ba, Li, K, Rb, Cs, Pa, Ac, Ra, Fr, U, Th, Be, Tl, Ta), которые характерны соответственно для ультраосновных-основных, средних и кислых-ультракислых пород. Элементы базитового класса располагаются преимущественно в центральной, а окситового — в периферической частях периодической таблицы. Элементы мезитового класса занимают места между полями базитовых и окситовых элементов, а также небольшое поле в правой части таблицы.

На основе выполненных исследований и анализа обширных литературных данных составлена схема классификации и последовательности образования гидротермально-метасоматических формаций на рудных месторождениях. При этом под гидротермально-метасоматической формацией понимается парагенетическая совокупность метасоматитов, жил, прожилков и оруденения (Рехарский, 1970). В зависимости от преимущественной связи с различными сериями изверженных пород выделены три группы формаций. Для каждой формации определены характерные рудные элементы и отмечены некоторые виды неметаллических полезных ископаемых.

#### I. Гидротермально-метасоматические формации, преимущественно связанные с гранитоидными породами<sup>1</sup>

Магнезиально-скарновая —	<u>Fe, V<sup>2</sup></u> , флогопит.
Известково-скарновая —	<u>Fe, Cu, Co, V, Mn.</u>
Фельдшпатовая —	<u>Ta, Nb, TR, U, Th, Ti, Be, Li, Zr, Hf.</u>
Полевошпат-кварцевая —	<u>Mo, W, Sn, Cu.</u>
Грейзеновая —	<u>W, Mo, Sn, Be, Li, Bi.</u>
Турмалин-кварцевая (турмалин-хлоритовая) —	<u>Sn, Cu, W, Bi, Au, As.</u>
Пропитовая —	<u>Au, Ag, Cu, As, Pb, Zn.</u>
Вторично-кварцитовая —	<u>Cu, Zn, Pb, Au, Ag.</u>
Кварц-серицитовая —	<u>Cu, Mo, Zn, Pb.</u>
Березитовая (березиты, гумбеиты, эйситы) —	<u>Pb, Zn, Au, Ag, U, Mo, Bi, Sn, W, Be, Co, As, Sb, Hg.</u>
Аргиллизитовая —	<u>Hg, Sb, Sn, Au, Ag, As, U, Mo, Zr, Pb, Zn, Cu.</u>

#### II. Гидротермально-метасоматические формации, преимущественно связанные с ультраосновными — основными породами

Серпентинитовая —	<u>Cr, асбест.</u>
Уралитовая —	<u>Ni, Cu, Pt, флогопит.</u>
Тальк-карбонатная —	<u>Ni, Cu, Au, тальк, магнезит.</u>
Брусит-валлериитовая —	<u>Cu, Ni, Co, Pt.</u>
Листвениитовая —	<u>Hg (?) , Au, Cu, Zn, Pb.</u>

<sup>1</sup> Формации расположены сверху вниз от ранних высокотемпературных к поздним низкотемпературным.

<sup>2</sup> Главные рудные элементы.

### III. Гидротермально-метасоматические формации, преимущественно связанные с ультраосновными — щелочными породами

Альбитовая —	<u>Zr, Hf, Nb, Ta, TR, Th, U.</u>
Камафоритовая (апатит-магнетитовая) —	<u>Fe, Ti, P, Zr, Ta, Nb, Cu.</u>
Карбонатитовая —	<u>Nb, Ta, Zr, TR.</u>
Карбонат-флюоритовая (?) —	флюорит.

При сравнительной характеристике поведения элементов в магматических и постмагматических процессах отмечено, что рудные элементы базитового и окситового классов — полярные элементы, как правило, образуют промышленные концентрации, связанные с собственно магматическими месторождениями, пегматитами и высокотемпературными гидротермально-метасоматическими формациями. Главным источником полярных рудных элементов является магматический очаг: для элементов базитового класса — базальтоидная и окситового — гранитоидная магмы. Рудные элементы мезитового класса — неполярные элементы образуют промышленные концентрации, преимущественно связанные со средне- и низкотемпературными гидротермально-метасоматическими формациями. Наряду с магматическим источником здесь важную роль играет также немагматический источник. Это относится и к ряду полярных рудных элементов, которые изначально образуют повышенные концентрации, связанные с более ранними процессами.

#### ГЕОХИМИЯ РУДООБРАЗУЮЩИХ ПРОЦЕССОВ НА ПРИМЕРЕ ОТДЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Работы по выяснению геохимических особенностей рудообразующих процессов на примере отдельных элементов являются для Института традиционным направлением. Основные задачи по изучению геохимии отдельных элементов были всесторонне определены в нашем Институте академиком А.Е. Ферсманом и член-корреспондентом АН СССР А.А. Сауковым.

В течение последних лет получены также важные результаты при исследовании геохимии молибдена, ртути и сопутствующих рудных элементов в различных природных процессах и при выяснении физико-химических параметров рудоносных растворов на основе изучения газозо-жидких включений и экспериментальных данных.

#### *Геохимия молибдена*

Эти исследования направлены на выяснение особенностей поведения молибдена и сопутствующих элементов в различных эндогенных процессах. При этом основное внимание уделялось геохимии Мо и главных сопутствующих рудных элементов (Cu, W, U, Be) в процессах гидротермального рудообразования. Работы выполнялись В.И. Рехарским, А.А. Розбианской, Н.Д. Плят, Ю.Н. Пашковым.

В результате изучения распределения молибдена и сопутствующих рудных элементов в изверженных породах установлено, что при раз-

витии магматизма в пределах каждого тектоно-магматического цикла молибден и уран накапливаются в поздних магматических дифференциатах кислого состава, а медь — в ранних основных. В ряде случаев в поздних дифференциатах субщелочного состава наблюдается увеличение содержания молибдена, урана и меди. В процессе развития магматической деятельности интрузивные породы могут обогащаться молибденом, ураном и медью за счет осадочных пород, для которых характерны высокие концентрации этих элементов. К таким породам в первую очередь относятся сланцы, глины и органиогенные известняки, обогащенные органическим веществом и сульфидной серой. Кларки молибдена, урана и меди, вычисленные для изверженных пород земной коры, имеют следующие величины для кислых, средних, основных и ультраосновных пород: молибдена — соответственно 1,3; 1,0; 1,1 и 0,4 г/т, урана — 3,1; 1,6; 0,6 и 0,01 г/т; меди — 21; 28; 77 и 32 г/т. Средний кларк молибдена в изверженных породах земной коры составляет 1,2 г/т, урана — 2,1 г/т и меди — 36 г/т. Главная масса молибдена в гранитах (67%), гранодиоритах (55%) и диоритах (52%) приурочена к полевым шпатам, а в габбро — к темноцветным минералам (55%).

Физико-химический и термодинамический анализ поведения молибдена, сопутствующих рудных элементов, а также петрогенных элементов и галоидов в магме, как в существенно ионном силикатном расплаве, показывает, что в магматическом процессе для каждого элемента характерна строго определенная миграционная способность. Чем слабее энергетически связан элемент с кремнекислородными и алюмокремнекислородными каркасами, главными структурными мотивами магматического расплава, тем большей миграционной способностью он обладает. Ряды накопления элементов, составленные на основании энергетических характеристик и коэффициентов накопления, являются аналогичными друг другу. По увеличению (слева направо) миграционной способности и тенденции к накоплению в дифференциатах кислого состава элементы в рядах накопления располагаются в следующем порядке:  $\text{Cu} \rightarrow \text{Mo} \rightarrow \text{W} \rightarrow \text{U}$  и  $\text{Be}$ ;  $\text{I}$  и  $\text{Br} \rightarrow \text{Cl}$  и  $\text{F}$ ;  $\text{Mg} \rightarrow \text{Fe} \rightarrow \text{Ca} \rightarrow \text{Na} \rightarrow \text{K}$ .

По величине энергии разрыва химических связей  $\text{Me}-\text{O}$  молибден среди сопутствующих рудных элементов занимает промежуточное положение: уран и вольфрам обладают большей энергией связей  $\text{Me}-\text{O}$ , чем молибден, а медь — меньшей. Поэтому вполне закономерно, что медь характеризуется более низкой, по сравнению с молибденом, миграционной способностью в силикатном расплаве и преимущественно концентрируется в ранних дифференциатах основного состава, а вольфрам и уран, для которых характерна высокая миграционная способность, — в самых поздних дифференциатах кислого и субщелочного состава.

Показано, что на эндогенных месторождениях различных генетических групп промышленные содержания рудных элементов парагенетически связаны со строго определенными гидротермально-метасоматическими формациями. На молибденовых месторождениях высокие концентрации молибдена и сопутствующих рудных элементов парагенетически связаны со следующими гидротермально-метасоматическими формациями (от ранних высокотемпературных к поздним низкотемператур-

ным): с полевошпат-кварцевой — Mo, W и Cu, с грейзеновой — Mo, W и Be; с кварц-серицитовой — Mo и Cu, с березитовой и аргиллизитовой — Mo и U. Вертикальная зональность распределения молибдена и сопутствующих элементов выражается в увеличении с глубиной отношений Mo: Cu, Mo: W, Mo: Be и Mo: U. Эта зональность наблюдается при преобладающем развитии на нижних горизонтах метасоматитов и молибденовой минерализации ранних гидротермальных процессов, а на верхних — поздних. Такая же зональность устанавливается и при увеличении с глубиной интенсивности метасоматических процессов, характерных для каждой формации. При неоднократном наложении одних гидротермально-метасоматических образований на другие и при затухании на нижних горизонтах метасоматических процессов закономерности распределения молибдена и сопутствующих элементов являются более сложными. Горизонтальная зональность проявляется в том, что содержание Mo, Cu, W, Be и U по направлению от неизмененных пород к внутренним метасоматическим зонам увеличивается пропорционально интенсивности развития продуктов стадии отложения гидротермально-метасоматических формаций. Молибден, вольфрам, уран и бериллий накапливаются преимущественно во внутренних зонах метасоматитов, а медь — во внутренних и внешних. Нередко концентрация меди во внешних зонах метасоматитов представляет промышленный интерес.

Исследование парагенетических минеральных ассоциаций, привноса выноса петрогенных и рудных элементов в процессе рудообразования, фазового состава и термометрии газово-жидких включений в минералах, а также экспериментальные данные позволяют говорить о том, что для полевошпат-кварцевого процесса одной из важных форм миграции молибдена служат молибдаты и, возможно, окситиомолибдаты, для грейзенового — оксогалоидо-молибдатные и, по-видимому, кремнемолибденовые комплексы, для кварц-серицитовой — окситиомолибдаты и кремнемолибденовые комплексы, для березитовой и аргиллизитовой — молибден-урановые комплексы, а также молибдаты и уранилкарбонаты. В нейтральных и слабощелочных растворах не исключено присутствие сложных гидросульфидмолибдатных комплексов, а в кислых низкотемпературных — окисно-закисных соединений молибдена. Определены температуры формирования эндогенного оруденения на различных типах молибденовых месторождений (Рехарский и Пашков, 1973). На примере медно-молибденовых месторождений Малого Кавказа установлены физико-химические параметры рудоносных минерализующих растворов. Для молибденосодержащих растворов полевошпат-кварцевой формации характерны: температура 250–360°C, суммарная солевая концентрация 50–80 г/л, давление около 800 бар и близнеутральная среда, а для медьсодержащих растворов кварц-серицитовой формации температура равна 190–280°C, общая минерализация около 600 г/л, давление 800–850 бар и кислая реакция существенно хлоридных минерализующих растворов. Высказано мнение, что источником описанных молибденосодержащих растворов является главным образом магматический очаг, а медьсодержащие растворы имели смешанное магматическое и внемагматическое происхождение.

Установлено, что благоприятными условиями для осаждения молибдена являются следующие: увеличение кислотности минерализующих растворов и уменьшение отношения между концентрацией щелочных металлов и слабых оснований, повышение активности ионов молибдена и сульфидных форм серы и наличие соосадителей: кремнезема и сульфидов железа. Особенно велико значение кремнезема в соосаждении молибдена из слабокислых — слабощелочных сероводородных растворов. Обогащение молибденоносных растворов сульфидными формами во многом определяет образование высоких концентраций молибдена в земной коре, а также совместное и раздельное нахождение в природных условиях молибдена и сопутствующих рудных элементов. Молибденит на молибденовых месторождениях образуется в широком интервале температур 90—420°C. Благоприятными условиями для кристаллизации молибденита являются высокие температуры, наличие восстановителей и время (Рехарский, 1973; Розбианская, Рехарский, 1973). При температуре 350°C искусственный молибденит получается в течение нескольких часов, а при температуре 100—200°C — в течение длительного времени. Время является одним из определяющих факторов при образовании молибденита в природных условиях при низких температурах.

На основе выполненных исследований рекомендованы поисковые признаки молибденового оруденения. Перспективными для поисков молибденовых месторождений являются регионы, в которых интенсивно проявлена магматическая и тектоническая деятельность с образованием различных серий изверженных пород, поясов малых интрузий, глубинных разломов, линейных и кольцевых структур.

К благоприятным для нахождения молибденовой минерализации относятся районы, для которых характерны четко выраженная дифференциация изверженных пород в пределах тектоно-магматических циклов, образование поздних магматических дифференциатов кислого и субщелочного состава и наличие изверженных, осадочных и метаморфических пород, обогащенных молибденом и сопутствующими элементами. Важным показателем металлогенической специализации исследуемого района на молибден является широкое развитие в его пределах гидротермально-метасоматических образований полевошпат-кварцевой, грейзеновой, кварц-серицитовой, березитовой и аргиллизитовой формаций, с которыми на молибденовых месторождениях парагенетически связаны высокие концентрации молибдена и сопутствующих рудных элементов.

Геолого-минералогические и геохимические исследования закономерностей распределения рудных элементов (Mo и Cu) в различных гидротермально-метасоматических формациях с последующей математической обработкой полученных результатов, которая была выполнена совместно с А.В. Канцелем, позволили наметить пути использования статистик при рассмотрении вопросов, касающихся рудообразования, а также при решении прикладных задач, возникающих на различных этапах разведки и эксплуатации молибденовых месторождений.

Крупным обобщением по геохимии ртути явилась широко известная в Советском Союзе и за рубежом монография А.А. Саукова "Геохимия ртути" (1946), которая была удостоена Государственной премии. Впоследствии, в 50-е годы, А.А. Сауков руководит ртутьметрическими исследованиями в целях поисков гидротермальных сульфидных месторождений различного состава. Эти исследования были обобщены в монографии Н.А. Озеровой под редакцией А.А. Саукова "Первичные ореолы рассеяния ртути" (1962). Дальнейшие теоретические исследования в области геохимии ртути стали возможны благодаря разработке высокочувствительных и быстрых методов химического анализа на ртуть из малых количеств материалов. Большая заслуга в этом отношении принадлежит Н.Х. Айдиньян. Ею разработаны колориметрические методы позволяющие определять ртуть практически в любом объекте земной коры. Анализы на ртуть по этим методикам выполнялись химиками Н.Д. Шикиной, А.В. Волковой и М.А. Груздевой.

После смерти А.А. Саукова (1964 г.) исследования в области геохимии ртути были продолжены Н.А. Озеровой и Н.Х. Айдиньян. Итогом явилась монография "Очерки геохимии ртути" (А.А. Сауков, Н.Х. Айдиньян и Н.А. Озерова, 1972). Основные развиваемые положения касаются трех направлений: изучение поведения ртути в различных природных процессах, выяснение источников главных компонентов ртутных месторождений и практические аспекты изучения геохимии ртути. Выявлены особенности поведения ртути в осадочном, метаморфическом, магматическом и гидротермальном процессах; изучение метеоритов и глубинных пород, для которых в качестве первоисточников предполагается подкоровое вещество, позволило оценить порядок содержания ртути в верхней мантии.

Установлено, что в процессе современного осадкообразования в морских бассейнах ртуть концентрируется в осадках типа черноморских, что обусловлено значительным сероводородным заражением бассейна и осаждением ртути с сульфидами железа. В поверхностном слое всех осадков морей и океанов ртуть имеет тесную связь с глинистой фракцией, где она сорбируется глинистыми частицами и обогащает сульфиды железа. В раннем диагенезе (еще в рыхлом осадке) уже заметны процессы ее перераспределения, и связь с глинистой фракцией утрачивается.

В литифицированных осадочных породах содержание ртути зависит от количества присутствующего в них вулканогенного материала. Для пород нормально-осадочного литогенеза оно в среднем близко ее кларку (например, на Русской платформе), для пород вулканогенно-осадочного литогенеза, где вулканический материал резко преобладает, оно заметно повышается (в 3 раза в Восточно-Камчатском прогибе). В обоих типах литогенеза не наблюдается приуроченности ртути к какому-либо одному из типов осадочных пород: песчанистым, глинистым или карбонатным. Накопление ртути установлено в сульфидсодержащих осадочных породах и, в первую очередь типа мансфельдских, представляющих собой ископаемые аналоги черноморских осадков, а также в некоторых окисных марганцевых и железных рудах, горючих сланцах и т.д.

Процессы прогрессивного метаморфизма как регионального, так и локального в основных типах осадочных пород (песчанистых, глинистых и карбонатных) не приводят к заметному обеднению их ртутью. Но при этом происходят ее перераспределение и изменение прочности связи в породообразующих минералах. В том случае, когда исходными являлись обогащенные ртутью природные образования (в изученном нами случае — раннегеосинклинальные колчеданные руды Урала), происходит значительное выделение ртути, но только примерно 1/10 ее реализуется в ртутные руды, а остальная часть рассеивается.

Среди магматических пород не установлено заметной специализации каких-либо определенных петрографических разновидностей в отношении ртути. Известные случаи обогащения ртутью малых интрузий и даек хорошо объясняются структурным фактором — общими путями миграции магматических расплавов и более поздних по отношению к ним ртуть-содержащих эманаций.

Материалы о распределении ртути в магматических породах, для которых по геологическим и геохимическим данным в качестве первосточников предполагается подкоровое вещество (ультраосновные и генетически с ними связанные основные породы, океанические базальтоиды, включения перидотитов и эклогитов диатремовых трубок), свидетельствуют о низких содержаниях ртути в верхних горизонтах мантии. В то же время высокие (более чем на два порядка) концентрации ртути в каменных метеоритах позволяют допускать, что более глубокие части мантии обогащены ртутью, а верхние уже дегазированы. Кларк ртути на основании полученных нами данных оценивается несколько ниже, чем в предыдущих исследованиях; он равен  $4,5 \cdot 10^{-6}\%$ .

Собственно гидротермальный этап миграции ртути изучался на примере ртутных и ртутьсодержащих гидротермальных месторождений и современных гидротермальных систем.

При рассмотрении распределения ртути в минералах эндогенных ртутных месторождений (ртутных, сурьмяных, свинцово-цинковых, колчеданных, касситеритовых, молибденовых, медно-никелевых, карбонатитовых и др.) установлена общая тенденция увеличения содержания ртути в "сквозных" минералах — от высокотемпературных месторождений к низкотемпературным ртутно-сурьмяным. Изучены минералы — концентраторы ртути: среди сульфидов — сфалерит (до 35% Hg), блеклые руды (до 20% Hg), антимонит, пирит (до 2% Hg), галенит, реальгар, а из нерудных — барит. Показана зависимость содержаний ртути в минералах от наличия или отсутствия сосуществующих других минералов-концентраторов и соотношения между ними. Установлено изоморфное вхождение ртути в такие минералы, как сфалерит, блеклые руды, антимонит, реальгар, пирит и барит, методами расчета параметров ячейки, ядерно-квадрупольного резонанса, с помощью рентгеноспектрального микроанализатора и т.д.

Для современных гидротермальных систем определены состав рудообразующих растворов, концентрации в них ртути, описаны условия формирования и минералогические особенности современной ртутной минерализации. Последняя наиболее детально изучена на вулкане Мен-

делева (о. Кунашир), на Апапельских и Двухюрточных источниках (Камчатка).

Показано, что сульфидный комплекс ртути, ранее считавшийся основной формой ее переноса в гидротермальных растворах, не является определяющим, он может образовываться и существовать лишь в особых геологических условиях — при высокой концентрации сероводорода. Реально установлена ранее теоретически предполагавшаяся А.А. Сауковым ртутьсодержащая газовая атмосфера над гидротермальным раствором. Данные, полученные при изучении действующих термальных систем Камчатки и Курильских островов, а также поведение ртути в газовых месторождениях тектонически активных зон (Ставропольское поднятие на Северном Кавказе, система разломов Центральной Европы, разделяющих докембрийский и палеозойский фундаменты), позволяют считать, что ртутьсодержащие эманации не только сопровождают рудные растворы, но являются и самостоятельной формой переноса ртути из глубин Земли.

Полученные геохимические данные наряду с геологическими материалами позволили рассмотреть с новых позиций источники рудного вещества ртутных месторождений. Наиболее детально изучены главные элементы: ртуть и сера.

Данные о миграции ртути в различных природных процессах свидетельствуют о том, что источник ртути в гидротермальных растворах может быть полигенным в различных геологических условиях, но масштабы образующейся при этом ртутной и ртутьсодержащей минерализации будут различны.

Осадкообразование, литогенез и метаморфизм не могут рассматриваться как главные процессы, поставляющие ртуть в гидротермальные месторождения тех ртутных поясов, где сосредоточены основные промышленные концентрации этого металла. Отсутствие накопления ртути в каком-либо одном из главных типов осадочных пород — глинистых, песчаных и карбонатных — следует особо подчеркнуть, так как все построения сторонников осадочной или осадочно-метаморфогенной гипотез источника ртути в гидротермальных месторождениях обычно основывались на существовавшей ранее завышенной цифре кларка ртути в глинистых породах. При метаморфизме первично обогащенных ртутью природных образований лишь небольшая ее часть концентрируется в ртутном оруденении, а основная часть рассеивается; масштабы образующейся при этом ртутной минерализации незначительны (данные по Уральской колчеданосной провинции).

Известные проявления ртутной или ртутьсодержащей минерализации в разных по составу постагматических месторождениях наряду с широко известным фактом наличия ртутных ореолов вокруг различных месторождений (сурьмяных, свинцово-цинковых, золото-серебряных, колчеданных, касситеритовых, вольфрамовых, молибденовых, скарновых и пегматитовых) свидетельствуют о генетических связях ртути с самыми различными типами магм, но все эти проявления по масштабам несоизмеримы с теми основными концентрациями ртути, которые локализованы в пределах планетарных ртутных поясов.

Оруденение таких поясов имеет, по-видимому, своим источником верхнюю мантию. Ртуть здесь генетически не связана с каким-либо определенным типом магматических пород. Она, очевидно, выделялась по зонам глубинных разломов в период их активизации как продукт дегазации глубоких частей Земли. Это согласуется с реально наблюдаемыми процессами современной дегазации ртути и с предположением о повышенных содержаниях ртути в глубинах Земли (если верно, что каменные метеориты отражают состав глубоких геосфер). Следовательно, источник ртути в гидротермальных растворах может быть полигенным в различных геологических условиях, но значение ювенильного скорее всего преобладающее.

Источник серы ртутных месторождений рассмотрен с привлечением данных по изотопному составу серы в минералах ртутных месторождений. Эти исследования проводились совместно с В.И. Виноградовым. Установлено, что изотопный состав серы в ртутных рудах зависит от конкретной геологической обстановки и не связан с размещением ртутных месторождений в планетарных структурах Земли. В большинстве изученных случаев (ряд месторождений Средиземноморского пояса и азиатского сектора Тихоокеанского) сульфидная сера ртутных руд образовалась в непосредственной близости от места рудоотложения, при восстановлении сульфатов осадочного происхождения. При этом в одних случаях образование сероводорода совпадало по месту и времени с процессом рудоотложения, в других он возникал до процесса рудообразования. Для ряда месторождений удалось весьма определенно доказать первично сульфатный источник сульфидной серы (месторождения в обрамлении Колымского срединного массива, Иркутского амфитеатра, в Средней Азии, солянокупольные месторождения Днепрово-Донецкой впадины, Идрия в Югославии и др.), в других — лишь по ряду косвенных признаков и аналогии с подобными месторождениями (месторождения Северной Африки, Закарпатья, Никитовское в Донбассе). Важно отметить, что изотопный состав сульфидной серы, соответствующий метеоритному, сам по себе не может являться критерием ее глубинного происхождения; в этом отношении весьма показательны геологические и геохимические данные по месторождению Монте-Амиата. Для многих рассмотренных случаев можно утверждать, что сера не сопровождала ртуть из глубин Земли, а являлась ее осадителем в земной коре.

Из практических приложений изучения геохимии ртути важное значение имеет ртутнометрический метод поисков гидротермальных сульфидных месторождений, предложенный А.А. Сауковым. В основе этого метода лежит его представление о наличии ртутьсодержащей газовой атмосферы над гидротермальным рудным раствором. Благодаря высокой проникающей способности газообразной ртути и отчасти за счет гидротермальных растворов, содержащих в большем или меньшем количестве ртуть, вокруг сульфидных месторождений формируются первичные ореолы рассеяния ртути. Они являются более широкими и протяженными, чем для других халькофильных элементов, которые переносятся в основном в растворах.

Впервые первичные ореолы рассеяния ртути были установлены А.А. Сауковым в 1936 г. в коренных породах на ртутных месторождениях Дагестана — Хлеском и Казардикамском. Впоследствии такие ореолы выявлены на нертутных сульфидных месторождениях: монометаллических сурьмяных, полиметаллических и колчеданных (Озерова, 1962). В настоящее время они широко используются для поисков сурьмяных, свинцово-цинковых, колчеданных, золото-серебряных месторождений. Есть основания предполагать наличие таких ореолов и на других типах гидротермальных месторождений — касситерито-сульфидных, молибденовых и др. Эти ореолы распространяются от месторождений на сотни метров, иногда километры; вертикальный размах при благоприятных условиях составляет многие сотни метров. Ртутные ореолы обычно шире зон окolorудных изменений. Эти ореолы используются на различных стадиях геологического изучения площади как при мелкомасштабных, так и при крупномасштабных исследованиях.

В настоящее время ртутOMETрический метод поисков по первичным ореолам получил широкую известность и применяется не только в Советском Союзе, но и за рубежом — в США, Канаде, Японии, Великобритании, Югославии, ГДР, Турции, Австралии и других странах, при этом зарубежные исследователи всегда отмечают приоритет в этой области А.А. Саукова и его школы. Для примера укажем, что таким методом из ртутных месторождений открыты Карасу в Западном Узбекистане, а из нертутных — месторождение золота Кортеше в США, а на многих давно известных рудных полях, особенно ртутных, в частности на Никитовском и Хайдарканском, ртутOMETрический метод широко используется для выявления новых рудных участков и рудных тел.

Результаты изучения геохимии ртути широко используются для выявления новых видов минерального сырья — объектов попутной добычи ртути. Полиметаллические и колчеданные руды уже используются у нас и за рубежом для извлечения ртути. Следующая очередь, очевидно, за сурьмяными рудами, медистыми песчаниками и некоторыми баритовыми месторождениями. Еще одним типом сырья могут служить продукты зоны окисления сульфидных месторождений и, в частности, свинцово-цинковых и колчеданных. Среди осадочных образований могут быть использованы некоторые окисные марганцевые и железные руды, горючие сланцы и нефть. Сюда же относятся породы, зараженные ртутью вследствие первичных ореолов рассеяния, например угли, мергели, доломиты и другие, из которых ртуть можно попутно улавливать при получении цемента, флюса для металлургической промышленности при переработке углей и т.д. Ртуть в настоящее время уже извлекается в небольшом объеме из углей на некоторых коксохимических заводах Донбасса и из нефтей месторождения Цимрик в Калифорнии. В этом аспекте заслуживают самого серьезного внимания и газовые месторождения.

Практическим приложением результатов изучения геохимии ртути является также санитарный аспект. Ртуть выделяется в атмосферу и гидросферу при металлургической переработке самых различных руд, а также в химической, коксохимической, нефтеперерабатывающей, газовой

промышленности и т.д. На возможность хронического ртутного заражения рабочих при металлургическом переделе свинцовых руд впервые обратил внимание А.А. Сауков еще в 1946 г. В настоящее время ртутная опасность — серьезная проблема, которая привлекает самое пристальное внимание во всем мире.

*Газовые ореолы рудных месторождений  
и методы изучения газовой-жидких включений*

При проведении газовой съемки на медных и медно-молибденовых месторождениях Северного Прибалхашья и полиметаллических месторождениях Карамазара установлено, что в составе подпочвенного воздуха над рудными телами, перекрытыми наносами мощностью до 20–30 м, фиксируются повышенные содержания сернистых газов. Это позволило рекомендовать газовую съемку для использования при поисках и разведке медно-молибденовых и полиметаллических рудных тел в аридных климатических условиях.

Для исследования состава газовой-жидких включений в минералах разработан комбинированный полярографический метод определения  $\text{SO}_4^{2-}$  с чувствительностью  $10\gamma$  в  $10 \text{ см}^3$  и модифицирован с помощью потенциометрического титрования; Ag-метрический метод определения  $\text{Cl}^-$  (чувствительность  $2\gamma$  в  $20 \text{ см}^3$ ); экспериментально установлен оптимальный режим хроматографического разделения микроколичеств компонентов газовой смеси:  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  (Элинсон и др., 1970; Элинсон, Александрова, 1971).

Для термобарических исследований процесса минералообразования по реликтам минералообразующих сред во включениях в минералах разработаны следующие методики, аппаратура и теоретические положения. На основании анализа конструктивных особенностей термокамер различных систем разработаны конструкции и изготовлены термо- и криокамеры, позволяющие оценивать температуру фазовых превращений во включениях с точностью  $\pm 2^\circ\text{C}$  в интервале температур от  $-190$  до  $+900^\circ\text{C}$  (Пашков и др., 1969). Сконструирована и изготовлена декрепитационная установка с барическим способом регистрации эффекта декрепитации, позволившая снизить вес навески необходимого для анализа минерала до  $0,05 \text{ г}$ . Впервые применен способ декрептобарофонического анализа минералов и изготовлена декрептобарофоническая установка, позволяющая осуществлять контроль за процессом декрепитации одной навески одновременно по двум независимым каналам: декрептобарическому и декрептофоническому, что дает возможность однозначно выделить полезный сигнал. На основании теории упругости Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшица выведена зависимость между основными параметрами процесса декрепитации (Пашков, Пилоян, 1973):

$$P_{\text{кр}} = \frac{2\sigma(a^3 - 1)}{2 + a^3},$$

где  $a$  — отношение расстояния от центра до внешней стенки включения

к внутреннему радиусу включения;  $\sigma$  — критическое напряжение на разрыв,  $P_{кр}$  — критическое давление во включении. Анализ соотношения показывает, что включения каждого типа должны проявлять максимум декрепитации при достижении давления в них, равного  $2\sigma$  исследуемого минерала.

## ГЕОХИМИЯ ГИПЕРГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

С момента образования ИГЕМ в нем стали разрабатываться проблемы геохимии эпигенетических процессов зоны гипергенеза и геохимии ландшафта<sup>1</sup>. Истоки этих научных направлений связаны с именами академиков А.Е. Ферсмана и Б.Б. Польнова. Развивая идеи В.В. Докучаева о зонах природы и учение В.И. Вернадского о геологической деятельности живого вещества, Б.Б. Польнов в 40-х годах сформулировал основные положения геохимии ландшафта.

Теоретические исследования в области геохимии ландшафта, выполненные Б.Б. Польновым и его учениками, позволили уже в 1955 г. изложить в систематическом порядке основы этого направления (Перельман, 1955), позднее была опубликована монография "Геохимия ландшафта", выдержавшая три издания в СССР (1961, 1966, 1975) и одно в Польше (1973).

Процессы изменения горных пород под влиянием подземных вод А.Е. Ферсман предложил именовать катагенезом и гидрогенезом. Эти идеи стали развиваться в ИГЕМ с середины 50-х годов на новой методологической основе, главным образом с учетом геохимии ландшафта. Данное направление получило название "геохимии эпигенетических процессов зоны гипергенеза", его основные положения изложены в монографии "Геохимия эпигенетических процессов (зона гипергенеза)" (Перельман, 1961, 1965, 1968)<sup>2</sup>.

Основные результаты работ ИГЕМ в области геохимии ландшафта и геохимии эпигенетических процессов ниже рассмотрены совместно в связи с близостью методологической основы обоих направлений.

В исследованиях по геохимии гипергенных процессов помимо штатных сотрудников Лаборатории геохимии рудных месторождений — Е.Н. Борисенко и Н.А. Волоковых принимали участие также сотрудники других отделов ИГЕМ — А.И. Перельман, С.Г. Батулин, О.И. Зеленова, И.Б. Никитина, аспиранты В.Л. Кожара, Л.Г. Филимонова, А.Г. Назаров, Ю.Е. Сает, Г.С. Макунина, А.С. Досмаилов, Т.К. Иванова. С 1966 г. эти исследования проводятся при участии Центральной геохимической экспедиции Казахского института минерального сырья (г. Алма-Ата) и Географического факультета Московского университета (А.С. Досмаилов, М.И. Ковин, А.Г. Никитин, Н.С. Касимов, С.И. Сотникова, Р.С. Смирнова, Ю.В. Проскураков, Н.Б. Шамкова,

<sup>1</sup> Ранее, с 1946 г. эти работы проводились в ИГН АН СССР.

<sup>2</sup> В 1967 г. книга издана в Нью-Йорке на английском языке, в 1972 г. — в ГДР на немецком языке.

Н.А. Шмелькова и др.). Общее научное руководство все годы осуществлял А.И. Перельман.

К фундаментальным проблемам геохимии относится характеристика интенсивности миграции химических элементов в различных системах земной коры. В начале 30-х годов Б.Б. Польнов, применив особый пересчет, оценил интенсивность выноса петрогенных химических элементов из коры выветривания и построил на этой основе ряды миграции. Развивая эти идеи, в 1940 г. А.И. Перельманом получено уравнение интенсивности миграции:

$$P_x = \frac{1}{B_x} \cdot \frac{dB_x}{dt},$$

где  $P_x$  — интенсивность миграции элемента "x",  $B_x$  — его содержание в горных породах,  $t$  — время.

Преобразование этого уравнения с помощью ряда допущений позволило установить новую величину — коэффициент водной миграции  $K_x$ , представляющий собой отношение содержания элемента в минеральном остатке воды к его содержанию в горных породах. Чем больше  $K_x$ , тем интенсивнее элемент переходит из горных пород в воды. Значение  $K_x$  заключается в том, что он позволяет сравнивать по интенсивности миграции распространенные и редкие элементы.

В разных ландшафтных зонах от пустынь до высокогорий были изучены массивы, сложенные изверженными породами. Анализировались пробы пород и пробы вод из источников и ручьев, дренирующих эти породы. Эти исследования позволили установить  $K_x$  для многих рудных элементов. Например, выяснилось, что по подвижности в коре выветривания цинк, фтор, стронций, молибден, селен, уран аналогичны кальцию и магнию. В результате были построены новые ряды миграции для коры выветривания, значительно более полные, чем у Б.Б. Польнова (Перельман, 1965, 1966, 1968 и др.).

Для зоны гипергенеза характерно огромное разнообразие природных систем, к ней относятся и коры выветривания, и почвы, и илы водоемов, и водоносные горизонты подземных вод, однако с геохимических позиций во всех этих природных телах устанавливаются общие черты и сравнительно небольшое число обстановок, определяющихся физико-химическими параметрами. После работ В.М. Гольдшмидта и А.Е. Фермана к таким параметрам в первую очередь относят окислительно-восстановительные и щелочно-кислотные условия вод. А.И. Перельманом эти параметры использованы при классификации основных типов геохимических процессов зоны гипергенеза. Особенно большое значение в ней придается окислительно-восстановительным условиям.

В современной зоне гипергенеза по окислительно-восстановительным условиям устанавливаются три основные обстановки: одна окислительная и две восстановительные — глеевая (восстановительная без  $H_2S$ ) и сероводородная. Глеевая и сероводородная обстановки, несмотря на близкие величины Eh, противоположны друг другу в геохимическом

отношении, так как первая благоприятна для миграции большинства рудных элементов, а вторая — нет.

Главное внимание уделялось глеевой обстановке, в геохимическом отношении ранее слабо изученной. Глеевые процессы, обусловленные деятельностью подземных вод, очень ярко выражены в породах красноцветной формации, с ними связано изменение красной окраски этих пород на зеленую. На большом фактическом материале по Русской платформе, Тянь-Шаню, Памиро-Алаю и Центральному Казахстану доказано региональное распространение глеевого катагенеза в красноцветных разного возраста, генезиса и принадлежности к геотектоническим структурам, единство морфологических и геохимических проявлений оглеения в безрудных и рудных (меденосных) районах. Е.Н. Борисенко установила, что глеевый катагенез сопровождается повышением дисперсности, уменьшением пористости и водопроницаемости оглеенных пород, что имеет значение при формировании рудных эпигенетических залежей меди и других элементов в красноцветных толщах. Оглеение способствует локализации рудоносных растворов в пределах горизонта песчаников, препятствуя растеканию их за пределы оглеенных контактов (Борисенко, 1971). Глеевый катагенез также способствует переводу рассеянных металлов в подвижное состояние и обуславливает возможность перемещения их из глинистых пород в песчаные. В оглеенных песчаниках происходит накопление рассеянной меди, которая при благоприятных условиях может мигрировать и принимать участие в формировании эпигенетических концентраций. В целом красноцветные толщи, претерпевшие глеевый катагенез, благоприятны для формирования месторождений типа медистых песчаников. В некоторых районах процессы оглеения столь сильно изменили облик красноцветной формации, что она превратилась в пестроцветную. Эпигенетическое оглеение также широко распространено и в других осадочных формациях. Проведенными исследованиями было доказано, что глеевый катагенез — процесс региональный, охватывающий огромные территории, сильно изменяющий осадочные толщи, мобилизующий содержащиеся в них металлы (А.И. Перельман, Е.Н. Борисенко). Наряду с окислительно-восстановительными условиями большое внимание уделялось и другому важному параметру гипергенных процессов — щелочно-кислотным условиям вод. Выделено четыре класса вод по величине pH: сильноокислые ( $\text{pH} < 3$ ), кислые и слабокислые ( $\text{pH} 3-6,5$ ), нейтральные и слабощелочные ( $\text{pH} 6,5-8,5$ ) и сильно щелочные (содовые) ( $\text{pH} > 8,5$ ). Воды каждой системы зоны гипергенеза можно характеризовать сочетанием окислительно-восстановительных и щелочно-кислотных условий (кислые глеевые, щелочные кислородные и т.д.). Всего выделено 12 типов геохимических обстановок и основных классов вод, в которых осуществляется миграция химических элементов.

Каждому классу соответствует определенная ассоциация элементов, которые в водах этого класса легко мигрируют, а также запрещенная ассоциация элементов, малоподвижная в данных условиях (например, Fe, Ca, Mo, Ba в кислородных содовых водах — IV).

В научном и практическом отношении особенно интересны участки резкой смены геохимических обстановок, где нередко происходит концентрация химических элементов. Такие участки в 1961 г. были названы "геохимическими барьерами". На барьерах образуются рудные тела месторождений полезных ископаемых, многие минералы, геохимические аномалии.

Барьеры возникают на дне озер и морей, в почвах и корях выветривания, горизонтах подземных вод, т.е. в разнообразных геологических обстановках, но геохимическая сущность их часто одинакова. Барьеры классифицируются, по типам концентрирующих агентов. Наиболее изучены кислородные, сероводородные, глеевые, щелочные, кислые, испарительные, сорбционные барьеры (Перельман, 1968, 1973, 1975).

На кислородных барьерах концентрируются железо, марганец, сера, кобальт, а при их совмещении с сорбционными барьерами также Cu, Ba, Ni, Zn и другие металлы. Глеевый барьер образуется в местах встречи кислородных вод с глеевой обстановкой. Здесь концентрируются Mo, Se, U, в некоторых случаях Cu.

В Казахстане установлены и изучены испарительные барьеры в зонах разломов, где образуются различные солончаки, местами несущие информацию о залегающем на глубине эндогенном оруденении. На испарительных барьерах концентрируются Ag, Mo, Sr, Zn, I, B, Cu и другие рудные элементы.

В степях Казахстана формируются также кислые геохимические барьеры, на которых концентрируются элементы, образующие растворимые карбонатные комплексы, — Be, Sc, Y и TR иттровой группы, Zr и др. Такие барьеры возникают, например, по периферии березовых колков и на участках окисления сульфидов. В последнем случае поровые растворы коры выветривания местами имеют pH 3,5–4, из окружающих щелочных поровых вод концентрируется молибден, что приводит к появлению приповерхностных литохимических аномалий молибдена, не связанных с рудой (С.Г. Батулин).

Большое влияние на процесс гипергенной миграции и концентрации рудных элементов оказывает дефицит реагентов: если при гипергенных процессах один из реагентов присутствует в количествах, не достаточных для реализации всех возможных реакций, то в действительности будут реализоваться лишь те, для которых характерны наименьшие изобарные потенциалы. Этот дефицит был назван принципом торможения химических реакций, он позволил объяснить преимущественное осаждение сульфидов меди на сероводородном барьере при дефиците осадителя и ряд других явлений гипергенной миграции (Перельман, 1968).

Изучение интенсивности и контрастности миграции химических элементов в зоне гипергенеза, основных обстановок миграции и геохимических барьеров позволило А.И. Перельману разработать геохимическую классификацию элементов по условиям гипергенной миграции.

## ВОЗДУШНЫЕ МИГРАНТЫ

Активные (образуют химические соединения)	Пассивные (не образуют химические соединения)
O, H, C, N, I	Ar, He, Ne, Kr, Xe, Rn

## ВОДНЫЕ МИГРАНТЫ

Катионогенные элементы	Анионогенные элементы
------------------------	-----------------------

*Очень подвижные* ( $K_x = 10n-100n$ )

С постоянной валентностью

Cl, Br

С переменной валентностью

S

*Подвижные с постоянной валентностью* ( $K_x = n-10n$ )

Ca, Na, Mg, Sr, Ra

F, B

*Слабоподвижные с постоянной валентностью*  $K_x = 0, n-n$

K, Ba, Rb, Li, Be, Cs

Si, P

*Слабоподвижные с переменной валентностью*

Tl

Ge, Sn, Sb, As

Подвижные и слабоподвижные в окислительной и глеевой обстановках ( $K_x = 0, n-n$ ) и инертные в восстановительной сероводородной обстановке ( $K_x < 0, n$ ), осаждаются на сероводородном барьере.

Хорошо мигрируют в кислых водах окислительной и глеевой обстановок и осаждаются на щелочном барьере

Zn, Cu, Ni, Pb, Cd

Мигрируют в кислых и щелочных водах окислительной обстановок

Hg, Ag

Подвижные и слабоподвижные в окислительной обстановке ( $K_x = 0, n-n$ ) и инертные в восстановительных (глеевой и сероводородной) обстановках, осаждаются на сероводородных и глеевых барьерах

V, Mo, Se, U, Re

Подвижные и слабоподвижные в восстановительной глеевой среде ( $K_x = 0, n-n$ ) и инертные в окислительной и восстановительной сероводородной средах осаждаются на кислородных и сероводородных барьерах

Fe, Mn, Co

Малоподвижные в большинстве обстановок ( $K_x = 0, n-0, 0n$  и менее). Слабая миграция с органическими комплексами.

Частично мигрируют в сильнокислой среде

Al, Ti, Cr, Ce, Nd, Y, La,  
Ga, Th, Sc, Sm, Gd, Dy,  
Tb, Er, Tu, Ho, Eu, Lu,  
Yb, In, Bi

Частично мигрируют в щелочной среде

Zr, Nb, Ta, W, Hf, Te

Не образуют или почти не образуют химических соединений (характерно самородное состояние)

Os, Pd, Ru, Pt, Au, Rh, Ir

Важное место в исследованиях ИГЕМ занимало изучение отдельных типов ландшафтов. Установлено, что в каждом ландшафте осуществляется как биологический круговорот, так и водная миграция. Они тесно связаны между собой и там, где много живого вещества, как, например, в тайге и во влажных тропиках, биологический круговорот играет решающую роль в гипергенной миграции большинства элементов. В ходе исследований было уточнено понятие "геохимический ландшафт", рассмотрены методы его изучения, состояние равновесия в ландшафте, ландшафт как кибернетическая система. Разработаны принципы геохимической классификации ландшафтов СССР и показана возможность их приложения для классификации коры выветривания, континентальных отложений, вод. Это позволило предложить новую геохимическую классификацию коры выветривания и других природных тел зоны гипергенеза.

В основу геохимической характеристики ландшафтов положены материалы исследований в различных районах СССР. Наиболее детально изучена геохимия сухих степей и пустынь, важнейшая особенность которых определяется слабым влиянием растительного покрова на водную миграцию. В связи с этим для пустынь характерны ионные формы элементов в растворах, низкие энергетические характеристики ионов, малые энергии решеток минералов, большая роль испарительных и малая сорбционных барьеров (работы А.И. Перельмана, С.Г. Батулина, Е.Н. Борисенко, Н.С. Касимова, Ю.В. Проскурякова, Р.С. Смирновой, Н.А. Шмельковой, С.И. Сотниковой и др.).

В ландшафтах тайги и влажных тропиков, напротив, растительный покров оказывает огромное влияние на водную миграцию, с чем связаны малая роль ионной миграции, вхождение рудных элементов в состав органических коллоидных комплексов, малая роль радиусов ионов в миграции, огромная роль восстановительных и сорбционных барьеров в концентрации металлов (работы А.И. Перельмана, В.Л. Кожары, И.Б. Никитиной, Ю.Е. Саета, Л.Г. Филимоновой и др.).

На основе геохимической классификации ландшафтов была разработана методика ландшафтно-геохимического картирования и районирования. Важное место в этих исследованиях заняло составление "Карты геохимических ландшафтов" в масштабе 1:4 000 000, которая в уменьшенном виде опубликована в 1964 г. в Физико-географическом атласе мира. Всего на территории СССР выделено около 200 геохимических

ландшафтов. Каждый из них отмечен особыми условиями гипергенной миграции элементов и может быть охарактеризован различными геохимическими показателями.

Для решения практических вопросов необходимы ландшафтно-геохимические карты более крупных масштабов, вплоть до 1:10 000—5 000 (например, для рудных полей месторождений полезных ископаемых). Методика составления таких карт разработана в ИГЕМ в содружестве с МГУ и КазИМС. Для отдельных районов Казахстана составлялись ландшафтно-геохимические карты масштаба 1:50 000, а для аномальных полей — 1:5 000 — 1:10 000.

Проведенными исследованиями установлено, что в различных ландшафтах вторичные ореолы рудных месторождений образуются по особым законам, в связи с чем и методика геохимических поисков должна быть дифференцирована по отдельным типам ландшафтов, т.е. поиски месторождений одного и того же типа в тайге, тундре, пустыне надо вести по-разному, с учетом законов миграции элементов в данных ландшафтах.

На базе геохимии ландшафта в 1961 г. А.И. Перельманом и Ю.В. Шарковым проведено районирование территории СССР по условиям ведения геохимических поисков в масштабе 1:4 000 000. В его основу кроме геохимии ландшафта положены современные представления о методах поисков полезных ископаемых и условиях образования месторождений.

На карте районирования территории СССР разделена на три типа областей по степени выраженности ореолов рассеяния. Первый тип — это хорошо обнаженные местности с расчлененным, обычно горным рельефом и широким развитием ореолов на поверхности. Это Кавказ, Карпаты, горы Средней Азии, Южной Сибири и Дальнего Востока, наиболее расчлененные районы Центрального Казахстана, Карелии, Кольского полуострова. Руды здесь местами залегают почти с поверхности; эти районы наиболее благоприятны для геохимических поисков.

Второй тип областей характеризуется плохой обнаженностью рудоносных толщ, преобладанием ослабленных и неглубоко погребенных ореолов рассеяния. Это большая часть Центрального Казахстана, Карелии и Кольского полуострова, Восточной Сибири и другие районы. Рудные тела здесь нередко перекрыты маломощными плохотонными отложениями (до 100 м). Искать полезные ископаемые в этих местах значительно труднее. Здесь еще много перспективных площадей и поэтому геохимические методы могут оказаться особенно эффективными.

Наконец, к третьему типу областей относятся равнинные районы с ореолами, погребенными очень глубоко. Это Западно-Сибирская, Прикаспийская, Кубанская, Полесская и другие низменности, сложенные мощной толщей четвертичных отложений. Геохимические поиски рудных месторождений в большинстве случаев малоэффективны, а возможные рудоносные толщи залегают столь глубоко, что их эксплуатация пока не выгодна. Здесь возможны эффективные поиски нефти, солей и других ископаемых.

В пределах первых двух областей на карте показаны основные тектонические структуры, определяющие типы месторождений. На карте

также показаны: тундра, тайга, степи, пустыни и другие типы ландшафтов. Сочетания ландшафтных и геолого-тектонических условий представляют геохимический ландшафт, который характеризуется особыми условиями миграции элементов и закономерностями формирования ореолов рассеяния. Это определяет специфику методики поисков; в каждом типе ландшафта геохимические поиски должны проводиться с учетом природных особенностей. Карта дает представление о большом разнообразии условий геохимических поисков на территории СССР.

Методика, разработанная в ИГЕМ, используется в геологических организациях Казахстана, Урала, Сибири, Средней Азии, Кавказа, Украины, Дальнего Востока при детальном ландшафтно-геохимическом картировании и районировании территории по условиям поисков в масштабе 1:1 000 000—1:50 000.

Прогресс аналитической техники, особенно спектрального анализа, позволил проводить в СССР в большом объеме геохимические поиски рудных месторождений по вторичным литохимическим ореолам рассеяния. Так, например, только в Казахстане литохимическими поисками в масштабе 1:50 000 охвачено свыше 600 000 км<sup>2</sup>, получена грандиозная геохимическая информация (миллиарды данных), выявлены многие десятки тысяч геохимических аномалий. Главная проблема, которая сейчас стоит перед геохимическими поисками, заключается в оценке этих аномалий, так как часть аномалий относится к безрудным, часть фиксирует непромышленное оруденение и минерализацию и лишь незначительное их число соответствует месторождениям. При этом нередко крупная и интенсивная аномалия не представляет практического интереса, а слабая и неконтрастная связана с промышленным месторождением.

Для решения этой задачи необходимо знать законы образования и размещения геохимических аномалий, которые зависят не только от типа рудного месторождения, но и от геохимических особенностей ландшафтов.

Как показал опыт наших работ в Казахстане, для оценки аномалий следует составлять ландшафтно-геохимические карты масштаба 1:10 000 и крупнее. Большинство геохимических аномалий в ландшафтах образуется на геохимических барьерах, а своеобразие аномалий зависит от состава вод, поступающих к барьеру, и класса барьера. При встрече вод определенного класса с определенным классом барьера возникают рудные тела месторождений, гипергенные минералы, аномалии. Они возникают в почвах, илах, корках выветривания, водоносных горизонтах, зонах разломов и т.д. Поэтому морфология аномалий и их количественные экстенсивные параметры могут быть различными, а геохимическая сущность — близкой.

Принцип сочетания класса вод и класса барьера положен в основу разработанной в 1974 г. в форме таблицы-матрицы классификации типов концентрации рудных элементов (таблица). Этот принцип позволил систематизировать типы экзогенных месторождений, различать рудные аномалии от безрудных, а также, что особенно важно, прогнозировать типы месторождений, характерные для конкретных регионов, намечать новые генетические типы месторождений.

Типы солевых аномалий, образующихся на геохимических

Геохимический барьер	Кислородные воды			
	I	II	III	IV
Кислородный	A1	A2	A3	A4
Сульфидный (сероводородный и др.)	B1	B2	B3	B4
Глеевый	C1	C2	C3	C4
Щелочной	D1	D2	D3	—
Кислый	—	E2	E3	E4
Испарительный	F1	F2	F3	F4
Сорбционный	G1	G2	G3	G4
Термодинамический	H1	H2	H3	H4

Примечание. Значения pH: I — < 3, II — 3–6,5;

барьерах зоны гипергенеза

Глеевые воды				Сероводородные воды			
I	II	III	IV	I	II	III	IV
A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12
B5	B6	B7	B8	—	—	—	—
C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12
D5	D6	D7	—	D9	D10	D11	—
—	E6	E7	E8	—	E10	E11	E12
F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12
G5	G6	G7	G8	G9	G10	G11	G12
H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12

III — 6,5–8,5; IV — > 8,5.

В качестве примера рассмотрим аномалии, образующиеся на кислородном и сорбционном барьерах. Совмещенные аномалии А5–G5 характерны для таежных и тундровых ландшафтов, влажных тропиков, в которых в кислых болотных глеевых водах легко мигрируют Fe, Mn, многие металлы. В местах выхода таких вод на земную поверхность, на дне рек и озер возникает кислородный барьер, на котором образуются железо-марганцевые конкреции, латериты (в тропиках), пленки красного, желтого, бурого цвета (A5). Нередко за счет сорбции они обогащены Ni, Co, Cu, Pb, Zn, V, Ag и другими рудными элементами (G5). Аномалии типа А5–G5 могут быть рудными и безрудными.

Аномалии А6–G6 образуются в карбонатных почвах и породах, где воды имеют нейтральную или щелочную реакцию: в болотах и лугах лесостепей и степей, в лесных ландшафтах, сложных карбонатными породами, в зонах разгрузки подземных вод, связанных с красноцветной и другими формациями. В нейтральной и щелочной глеевой среде железо мигрирует плохо, марганец лучше. На кислородном барьере в этом случае нередко осаждаются только марганец, возникает марганцевый барьер (A6). Гидроокислы марганца сорбируют В, Со, Ni, Cu, Zn, Мо и др. (G6).

Аномалии А7 возникают в краевых зонах болот лесостепных и саванных ландшафтов, в зонах разгрузки глубинных глеевых вод.

Аномалии А8, А9 и А10 формируются в местах разгрузки сероводородных вод, для них характерны аккумуляции серы.

Формирование вторичных ореолов рассеяния во многих рудных районах СССР началось сотни и десятки миллионов лет назад. За это время неоднократно менялись климатические и тектонические условия, формировались геохимические барьеры и зоны выщелачивания (например, в древних корах выветривания), ослаблялись рудные аномалии и возникали безрудные. Поэтому оценка геохимических ано-

малий должна основываться не только на анализе современной зоны гипергенеза, но и учитывать историю ее развития. Например, нашими работами в Казахстане установлено, что древние коры выветривания во многих рудных районах подверглись засолению в ландшафтах неогена. С этими процессами связано накопление Zn, Мо, Y, Sr и других рудных элементов. Отсюда следует важный принцип использования геохимии ландшафта и геохимии эпигенетических процессов при поисках — историзм. Исследования в этом направлении проводились в Тянь-Шане, Мугоджарах, Центральном Казахстане (А.И. Перельман, Е.Н. Борисенко и др.). В 1970 г. А.И. Перельманом составлена "Историко-геохимическая ландшафтная карта СССР" в масштабе 1:4 000 000, анализ которой позволил рудные провинции СССР по условиям развития гипергенных процессов и образований вторичных геохимических аномалий разделить на две группы.

Для первой группы характерен этап неотектонических поднятий, где сформировался расчлененный рельеф и зона гипергенеза в основном находится в соответствии с современными климатическими и другими поверхностными факторами (Кавказ, Тянь-Шань, Саяны и другие горные районы). Рудные поля здесь отмечены сравнительно простыми условиями формирования вторичных геохимических аномалий и, следовательно, более просты для геохимических поисков и оценки аномалий.

Вторая группа районов и полей не пережила этап неотектонических поднятий или он проявился в слабой степени (Зауральский пенеппен, Северный Казахстан и т.д.). Здесь, как правило, развиты пенеппены, равнинный или волнистый рельеф, рудоносные формации перекрыты маломощным аллохтоном, районы пережили сложную историю континентального развития в различных климатических условиях, смену гумидных и аридных режимов. Начало гипергенных процессов в некоторых рудных провинциях датируется мезозоем и даже палеозоем.

Все это обусловило исключительную сложность истории развития зоны гипергенеза, ослабление рудных аномалий, существование многочисленных безрудных аномалий на геохимических барьерах и как следствие этого трудности при геохимических поисках и оценке аномалий.

Во второй группе районов нередко бедная неконтрастная аномалия соответствует богатому оруденению, а крупная контрастная — не промышленному оруденению. Поэтому правильная оценка аномалий здесь должна проводиться с учетом истории геохимического развития ландшафтов, типов геохимических барьеров, характерных для рудных полей. В Казахстане особенно большую роль играли мезозойские процессы кислого выщелачивания металлов из поверхностных выходов и неогеновые процессы засоления, приводящие к испарительной концентрации элементов и образованию безрудных аномалий.

Итак, за 1957—1975 гг. в ИГЕМ разработан ряд положений общей теории эпигенетических процессов, протекающих в верхней части земной коры — в зоне гипергенеза. Показано, что осадочная оболочка за время геологической истории в значительной степени переработана подземными водами. С данными процессами связано формирование месторождений меди, ванадия, урана и других металлов. Разработана геохимическая классификация данных процессов. Подробно охарактеризованы окислительные и восстановительные процессы зоны гипергенеза, сформулировано понятие о двух типах восстановительной среды — сероводородном и глеевом. Подробно изучен глеевый катагенез в породах красноцветной формации.

Определено понятие о геохимических барьерах, охарактеризованы их главнейшие типы — кислородные, испарительные, сорбционные, глеевые и прочие, показано их рудообразующее значение. Разработана систематика процессов эпигенетического рудообразования и процессов формирования геохимических аномалий.

По геохимии ландшафта разработаны принципы геохимической классификации ландшафтов СССР, законы биогенной и физико-химической миграции, методика составления детальных ландшафтно-геохимических карт, приложение теории информации к геохимии ландшафта, геохимия отдельных элементов в ландшафтах, историческая геохимия.

Все это обеспечило ИГЕМ лидирующее положение в этих двух важных направлениях геохимии не только в СССР, но и в мировой науке. Об этом свидетельствует издание трудов сотрудников ИГЕМ в США, ГДР, Польше и других странах. Геохимия ландшафта получила признание как одна из теоретических основ геохимических методов поисков и внедрена в практику поисков многих геологических управлений. Интересно, что этот процесс наблюдается и за рубежом, например в Канаде, причем канадские геохимики отдают должное приоритету советской науки<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Например, профессор геологического факультета университета провинции Онтарио (Канада) Фортеск рассматривает геохимию ландшафта как "стратегию геохимических поисков" (точнее, с наших позиций, — геохимия ландшафта является существенной частью этой стратегии).

**Вопросы внедрения.** Помимо публикаций внедрение результатов исследований по геохимии гипергенных процессов проводилось путем консультаций геологических организаций, семинаров и совещаний, подготовки кадров геологов на местах, совместных работ. Наибольший объем работ в этом направлении проведен в Казахстане, где с 1966 г. ИГЕМ по просьбе Министерства геологии Казахстана проводит соответствующие исследования, консультирует работы, выполняемые производственными организациями.

Так, в 1968 гг. и 1973 гг. в Алма-Ате были проведены семинары по геохимии ландшафта для геохимиков-поисковиков Казахстана, на которых читались лекции, проводились практические занятия, была организована экскурсия.

В 1966–1968 гг. консультировались работы по составлению ландшафтно-геохимической карты Казахстана в масштабе 1:1500 000 в Центральной геохимической экспедиции (ЦГХЭ) Казгеофизтреста (Алма-Ата). При составлении карты была использована методика ИГЕМ. В 1966–1974 гг. геохимия ландшафта была внедрена в практику работ Центрально-, Восточно- и Южно-Казахстанского геологических управлений, где на ее основе проведены районирование территории по условиям поисков рудных месторождений (1:200 000 – 1:500 000) и оценка аномалий (1:10 000).

При консультации ИГЕМ геохимия ландшафта и геохимия эпигенетических процессов в эти годы также внедрялась в работу Бурятского, Грузинского, Приморского, Узбекского, Азербайджанского геологических управлений, начинаются эти работы в Геологическом управлении центральных районов.

Большое значение приобретает геохимия эпигенетических процессов при поисках перекрытых месторождений. Наиболее интересные результаты в этой области были получены на барито-полиметаллическом месторождении Жайрем в Центральном Казахстане (работы аспирантки ИГН им. Сатпаева Л.Д. Кудериной под руководством А.И. Перельмана).

Значительные работы проведены по подготовке научных кадров высшей квалификации: за 1965–1974 гг. по геохимии гипергенных процессов защищено 9 кандидатских диссертаций (в том числе 8 через аспирантуру).

С 1964 г. лекции по курсу "Геохимия ландшафта и геохимия эпигенетических процессов" ежегодно читаются на курсах повышения квалификации геологов Министерства геологии РСФСР (лекции прослушало свыше 300 работников геохимических партий).

Систематически ведется работа по популяризации геохимии гипергенных процессов путем публикации в научно-популярных изданиях Академии наук СССР, журнале "Наука и жизнь", советских журналах, издающихся для зарубежного читателя на арабском, хинди, немецком и других языках.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Краткий обзор геохимических исследований, выполненных в ИГЕМ, свидетельствует об их актуальности для развития геохимии и решения народнохозяйственных задач. В первую очередь это относится к исследованиям геохимии эндогенных и экзогенных процессов рудообразования.

Дальнейшие направления исследований определяются развитием теоретических основ геохимической науки и растущей потребностью нашей страны в полезных ископаемых. Первостепенное значение приобретает количественная оценка геохимических явлений на основе использования достижений физической химии, математики и эксперимента.

В области геохимии эндогенных процессов большого внимания заслуживают исследования, направленные на выяснение общих закономерностей поведения отдельных групп химических элементов при дифференциации вещества мантии и формировании различных серий изверженных пород в пределах тектоно-магматических циклов. Значительный интерес представляет сравнительная характеристика физико-химических особенностей образования повышенных концентраций рудных элементов в процессе магматической дифференциации и выяснения взаимосвязи и возрастных соотношений между магматическими дифференциатами и оруденением в геологических районах, отличающихся по своей геохимической специализации.

Исследования по геохимии гидротермальных процессов будут направлены главным образом на развитие теории гидротермального рудообразования. Необходимо углубление исследований по закономерностям миграции и концентрации рудных элементов, связанных с различными генетическими типами эндогенных месторождений — молибдена, вольфрама, меди, ртути, сурьмы и др. Наряду с главными рудными элементами следует детально изучить геохимию сопутствующих элементов и элементов-примесей, которые должны попутно извлекаться при комплексной переработке руд. Важно выявить особенности парагенетической связи промышленных концентраций различных групп рудных элементов со строго определенными гидротермально-метасоматическими формациями и установить главные физико-химические параметры процессов рудообразования на основе познания закономерностей поведения петрогенных и рудных элементов при формировании метасоматитов и руд, изучения фазового состава газовой-жидких включений, экспериментальных исследований и термодинамического анализа гидротермальных систем.

Особое место принадлежит выяснению источников рудного вещества эндогенных месторождений. Следует отметить, что при успешном развитии общих вопросов источников рудного вещества проблема источников для отдельных групп эндогенных месторождений остается все еще слабо разработанной. Необходимы дальнейшая разработка и усовершенствование комплексных методов исследований, среди которых одно из ведущих мест принадлежит геохимическим методам (включая изотопные).

В связи с тем, что с каждым годом в балансе рудных месторождений СССР возрастает роль невоскрытых, перекрытых, глубокозалегающих

и прочих труднооткрываемых месторождений, увеличивается научное и практическое значение геохимии гипергенных процессов.

К наиболее актуальным теоретическим проблемам относится развитие теории геохимических барьеров и на ее основе геохимии эпигенетических рудообразующих процессов, протекающих в водоносных горизонтах артезианских бассейнов и гидрогеологических массивов. С этих позиций следует продолжить изучение месторождений типа медистых песчаников, некоторых свинцово-цинковых месторождений (спорного генезиса) и т.д. Особенно важно изучение эпигенетического оглеения и глеевых барьеров.

Видное место должно занять геохимическое изучение ландшафтов рудных провинций СССР — как, например, таежно-мерзлотных ландшафтов, которые в ближайшую пятилетку в связи со строительством БАМ и освоением ряда рудных районов севера Сибири станут ареной интенсивной хозяйственной деятельности. За последние годы накопился большой фактический материал по условиям геохимических поисков в этих районах, который нуждается в обобщении.

Необходимо продолжать также исследования гипергенных процессов в рудных провинциях аридной зоны — в степях и пустынях Центрального и Южного Казахстана, Мугоджар, Южного Урала, ряда районов Средней Азии, Азербайджана, Армении, Южного Забайкалья, Тувы, Украинского щита и т.д., охарактеризовать историю развития зоны гипергенеза, процессы формирования древней коры выветривания и их влияние на рудные аномалии, процессы континентального литогенеза и связанные с ними вторичные аномалии (рудные и безрудные), важнейшие геохимические барьеры (испарительный, сорбционный и т.д.), методы оценки аномалий. В этих провинциях уже существует развитая горнодобывающая промышленность, в связи с чем особую остроту приобретают поиски глубоководных месторождений в районах действующих предприятий. Здесь особенно важное значение имеют методы геохимии эпигенетических процессов.

Таким образом, всесторонний геохимический анализ особенностей эндогенных и экзогенных процессов на примере отдельных рудных и сопутствующих элементов, с учетом регионального геохимического материала по отдельным провинциям и месторождениям, будет способствовать развитию теории эндогенного и экзогенного рудообразования и геохимических методов поисков рудных месторождений.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Батулин С.Г.* О типах исторического развития пустынь и факторах соле-накопления в геохимическом ландшафте. — В кн. "Очерки геохимии эндогенных и экзогенных процессов". — Труды ИГЕМ. "Наука", 1966.
- Бекжанов Г.Р., Досмаилов А.С., Перельман А.И.* Геохимия ландшафта и поиски рудных месторождений в Казахстане. — Сов. геол., 1974, № 1.
- Борисенко Е.Н.* О поведении химических элементов при катагенезе в верхнепермских красноцветах Приуралья. — Геохимия, 1971, № 6.
- Борисенко Е.Н., Никитина И.Б.* Миграция и концентрация меди при глеевом катагенезе в породах красноцветной формации. — В сб. "Очерки геохимии отдельных элементов". "Наука", 1973.

- Вернадский В.И.* Избранные сочинения, т. I–V. Изд-во АН СССР, 1954–1960.
- Вернадский В.И.* Химическое строение биосферы Земли и ее окружения. "Наука", 1965.
- Вопросы применения геохимии ландшафта при поисках рудных месторождений. Алма-Ата, 1973.
- Геохимия ландшафтов и процессы гипергенеза. М., 1973.
- Глазовская М.А., Макунина А.А., Павленко И.А., Божко М.Г., Гаврилова И.П.* Геохимия ландшафтов и поиски полезных ископаемых на Южном Урале. Изд-во МГУ, 1961.
- Есенов Ш.Е., Мухамеджанов С.М., Перельман А.И.* Задачи изучения геохимии гипергенеза в Казахстане. – Вестник АН Каз ССР, 1972, № 1.
- Использование геохимии ландшафта при литохимических поисках в степных и пустынных районах Казахстана (методические указания). Алма-Ата, 1973.
- Красников В.И., Перельман А.И., Шарков Ю.В., Фокин А.Н.* Районирование изучаемых территорий по условиям ведения поисковых работ. – В кн. "Геологические предпосылки поисков месторождений урана". Атомиздат, 1964.
- Кудерина Л.Д.* Эпигенетические процессы в мезозой-кайнозойских отложениях месторождений Атасуйского рудного района. – Изв. АН Каз ССР, серия геол., 1973, № 3.
- Никитина И.Б.* Геохимические особенности ультрапресных вод северотаежных мерзлотных ландшафтов Южной Якутии. – В сб. "Геохимия ландшафтов и процессы гипергенеза". М., 1973.
- Озерова Н.А.* Первичные ореолы рассеяния ртути. – Труды ИГЕМ АН СССР, 1962, вып. 72.
- Озерова Н.А., Айдиньян Н.Х., Добровольская М.Г.* Современное ртутное рудообразование на вулкане Менделеева (Курильские острова). – Геол. рудн. месторожд., 1969, т. XI, № 5.
- Озерова Н.А., Виноградов В.И., Млакар И.* Изотопный состав серы в рудах некоторых месторождений западной части средиземноморского ртутного пояса. – В сб. "Очерки геохимии отдельных элементов". "Наука", 1973.
- Озерова Н.А.* Ртуть в газовых месторождениях Центральной Европы. – Сов. геол., 1975, № 6.
- Пашков Ю.Н., Тимофеев А.В., Котов Е.И., Хотеев А.Д.* Анализ возможных ошибок при измерении температур гомогенизации. – В сб. "Минералогическая термометрия и барометрия". "Наука", 1969.
- Пашков Ю.Н., Пилюян Г.О.* К вопросу теории метода декрепитации. Тезисы докл. IV регионального совещания по термобарогеохимии процессов минералообразования. Ростов-на-Дону, 1973.
- Перельман А.И.* Очерки геохимии ландшафта. Географгиз, 1955.
- Перельман А.И.* Геохимия эпигенетических процессов (зона гипергенеза), 1-е изд. М., 1961, 2-е изд. М., 1965, 3-е изд. М., 1968.
- Перельман А.И.* Детальные ландшафтно-геохимические исследования и поиски рудных месторождений. – В кн. "Вторичные ореолы рассеяния и их использование при поисках рудных месторождений на территории Сибири". Улан-Удэ, 1973.
- Перельман А.И.* Геохимия ландшафта. 1-е изд. М., 1961, 2-е изд. М., 1966, 3-е изд. М., 1975.
- Перельман А.И., Зеленова О.И., Батулин С.Г.* Эпигенетические процессы в осадочных породах и их роль в рудообразовании. – В сб. "Геохимия осадочных пород и руд". "Наука", 1968.
- Польнов Б.Б.* Современные задачи учения о выветривании. – Изв. АН СССР, серия геол., 1944, № 2.
- Польнов Б.Б.* Учение о ландшафтах. – В сб. "Вопросы географии". Изд-во АН СССР, 1953.
- Польнов Б.Б.* Избранные труды. Изд-во АН СССР, 1956.
- Рехарский В.И.* Периодичность коэффициента распределения и закономерности накопления элементов в изверженных горных породах. – В сб. "Очерки геохимии эндогенных и гипергенных процессов". "Наука", 1966.

- Рехарский В.И.* Гидротермально-метасоматические формации и оруденение молибденовых месторождений. — Геол. рудн. месторожд., 1970, т. 12, № 6.
- Рехарский В.И.* Геохимия молибдена в эндогенных процессах. "Наука", 1973.
- Рехарский В.И., Пашков Ю.Н.* К вопросу о температуре образования эндогенного молибденового оруденения. — Геол. рудн. месторожд., 1973, т. 15, № 4.
- Розбианская А.А., Рехарский В.И.* Экспериментальное исследование условий миграции и концентрации псевдивалентного молибдена. — В сб. "Очерки геохимии отдельных элементов". "Наука", 1973.
- Свет Ю.Е., Изумнов Н.Я., Несвижская Н.И.* Геохимические поиски эндогенных месторождений бора. "Наука", 1973.
- Сауков А.А.* Эволюция факторов миграции в геологической истории. — Изв. АН СССР, серия геол., 1960, № 5.
- Сауков А.А.* Радиоактивные элементы Земли. Изд-во АН СССР, 1961.
- Сауков А.А.* Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых. Изд-во МГУ, 1963.
- Сауков А.А.* Историзм в геохимии. — В сб. "Взаимодействие наук при изучении Земли", "Наука", 1964.
- Сауков А.А.* Геохимия. Изд-во МГУ, 3-е изд. 1965, 4-е изд. 1975.
- Сауков А.А., Айдиньян Н.Х., Озерова Н.А.* Очерки геохимии ртути. "Наука", 1972.
- Сауков А.А., Перельман А.И., Шарков Ю.В., Борисенко Е.Н.* Современные проблемы теории геохимических поисков полезных ископаемых. — В сб. "Очерки геохимии эндогенных и гипергенных процессов". "Наука", 1966.
- Смирнов В.И., Кузнецов В.А., Озерова Н.А., Федорчук В.П.* Новое в геохимии ртути. — Геол. рудн. месторожд., 1972, т. 14, № 4.
- Тайсаев Т.Т.* Роль ландшафтно-геохимического районирования при литохимических поисках в Бурятии. — В сб. "Литохимические поиски рудных месторождений". Алма-Ата, 1972.
- Ферсман А.Е.* Геохимия России. 1922.
- Ферсман А.Е.* Геохимические проблемы Союза. Очерк первый. — Основные черты геохимии Союза. Изд-во АН СССР, 1931.
- Филимонова Л.Г.* Геохимия фтора в северотаежных мерзлотных ландшафтах Алданского нагорья. — В сб. "Геохимия ландшафтов и процессы гипергенеза", 1973.
- Шипулин Ф.К.* Отщепленные и самостоятельные малые интрузии и их металлогеническое значение. — В сб. "Критерии связи оруденения с магматизмом применительно к изучению рудных районов". "Наука", 1965.
- Шипулин Ф.К.* Об энергии интрузивных процессов. — В сб. "Проблемы петрологии и генетической минералогии". "Наука", 1968<sub>1</sub>.
- Шипулин Ф.К.* Интрузии и рудообразование (на примере Дашкесана). "Наука", 1968<sub>2</sub>.
- Шипулин Ф.К.* Об источниках веществ при эндогенном рудообразовании. — В сб. "Проблемы геологии минеральных месторождений, петрологии и минералогии". "Наука", 1969, т. 1.
- Шипулин Ф.К., Рехарский В.И., Розбианская А.А., Пашков Ю.Н., Капсамун В.П., Звягинцев Л.И., Ланге Е.К., Каницель А.В., Аветисян Г.Г., Сухоруков Ю.Т.* Интрузии, гидротермально-метасоматические образования и медно-молибденовое оруденение. "Наука", 1975.
- Элинсон М.М., Александрова Э.С.* Исследование состава газов во включениях в малых образцах минералов и горных пород с применением газовой хроматографии. — Труды ВНИИСИМС, 1971, т. 16.
- Элинсон М.М., Пашков Ю.Н., Агабабов Г.М., Игнатьева И.Б.* Исследование газовых ореолов вокруг медно-молибденовых рудных тел. — В сб. "Очерки геохимии ртути, молибдена и серы в гидротермальном процессе". "Наука", 1970.

# АНАЛИТИЧЕСКИЕ ЛАБОРАТОРИИ ИГЕМ АН СССР

## ЛАБОРАТОРИЯ АБСОЛЮТНОГО ВОЗРАСТА

Исследования в области геохронологии были начаты в нашем Институте Г.Д. Афанасьевым еще в начале 50-х годов. Широкий размах они получили после того, как Г.Д. Афанасьев в начале 1955 г. организовал в отделе петрографии Лабораторию абсолютного возраста, возглавляющуюся И.Г. Гурвичем, талантливым физиком, много сил отдавшим ее становлению, вплоть до своей безвременной кончины в конце 1956 г.

В настоящее время Лаборатория абсолютного возраста ИГЕМ является одной из крупнейших в стране, геохронологические методы широко применяются в работах сотрудников Института, а методические исследования, ведущиеся в Лаборатории, получили признание не только в нашей стране, но и за рубежом.

В лаборатории разработан и освоен комплекс основных методов геохронологии — калий-аргонового, уран-свинцового и рубидий-стронциевого, а также возникшего несколько лет тому назад метода датирования по отношению  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ . Разработка аналитических методик с самого начала опиралась на наиболее точный и чувствительный (из применяемых для этой цели сегодня) метод изотопного разбавления. Для ряда задач эта работа впервые в стране была выполнена в ИГЕМ. Так, для наиболее распространенного в СССР К-Аг метода в Институте во всех деталях разработаны метод определения радиогенного аргона изотопным разбавлением моноизотопом  $^{38}\text{Ar}$ , методика промышленного получения его нейтронным облучением хлоридов, проведена коренная реконструкция серийного масс-спектрометра МИ-1305 применительно к К-Аг геохронометрии. Были созданы специальные установки для выделения, очистки и последующего измерения радиогенного аргона, позволившие расширить пределы применения метода от 1 млн. лет до 3,5 миллиардов лет. Опыт ИГЕМ был широко использован в ряде других геохронологических лабораторий страны. Не меньшая работа проделана лабораторией в области U-Pb метода геохронологии, а также Rb-Sr метода. Здесь особо важны работы по повышению точности масс-спектрометрических методик, переходу на цифровую регистрацию, автоматизации управления процессом измерения, применение ЭВМ на выходе масс-спектрометра, разработке локальных методов анализа, повышению чувствительности методики за счет разрабо-

танного в ИГЕМ метода ионизации свинца в масс-спектрометре на поверхности окисленного вольфрама.

Институт курировал разработки (в СКБ АП АН СССР) двух последних моделей изотопных масс-спектрометров МИ-1330 и МИ-1320. Эти приборы с успехом прошли в 1975 г. Государственные испытания и переданы для серийного изготовления на один из заводов Минприбора СССР. Опытные образцы, изготовленные в СКБ, переданы ИГЕМ для проведения эксплуатационных испытаний. Первые положительные результаты работы на этих приборах свидетельствуют об их высоких качествах.

С момента организации лаборатории выполнены калий-аргоновые измерения возраста по более чем десяти тысячам проб (около 25000 измерений, включая параллельные опыты, методические работы, измерения стандартов и т.д.). Для того чтобы весь этот материал был доступным геологам, все измерения возраста занесены на многоаспектные перфокарты, позволяющие анализировать эти данные с позиций географии мест взятия проб, их состава, геологической обстановки, соотношения с геологическими представлениями о возрасте и т.д. По сути дела сейчас в большинство геологических работ ИГЕМ геохронологические данные в той или иной мере входят как обязательный элемент.

Важной стороной работы лаборатории является постоянное внимание, уделяемое проблемам надежности геохронологических данных, т.е. аналитическая и геологическая их надежность, правильность отображения этими данными конкретных моментов геологической истории изучаемых образований. С этой целью лаборатория ведет большую работу по созданию серии стандартных образцов с известным содержанием радиоактивного элемента и радиогенного изотопа, по созданию синтетических стандартов изотопного состава и изотопного сдвига. Систематически проводится контроль правильности всех измерений.

Одновременно ведется разработка надежности с геологических позиций — пригодности тех или иных типов проб применительно к конкретным геологическим условиям, изучение методики постановки геохронологических исследований в сложной геологической обстановке, на специально выбранных природных "полигонах" (Юго-Западный Памир).

Такой комплексный подход к проблемам геохронологии на всех этапах — от совершенствования методики и аппаратуры, включая контроль надежности, до организации широкого применения этого комплекса — представляется наиболее эффективным.

#### ЛАБОРАТОРИЯ РАЗДЕЛЕНИЯ МИНЕРАЛОВ

Лаборатория разделения минералов образована на базе Кабинета дробления и разделения при экзогенном отделе в 1953 г. В 1959 г. лаборатория выделена в самостоятельное подразделение, перед которым было поставлено две группы задач: определительская работа по выде-

лению мономинеральных и обогащенных фракций из горных пород и руд и методическая работа по усовершенствованию и освоению методов выделения мономинеральных фракций.

В лаборатории развиты методы гравитационной, магнитной, электростатической сепарации, ультразвуковая очистка минеральных зерен от примазок и поверхностных включений и флотация, а также производится дробление и истирание проб.

Освоены методы и созданы комплексные схемы, позволяющие получать мономинеральные фракции более чем 120 различных породообразующих, аксессуарных и рудных минералов. Разработана и внедрена в практику лаборатории методика выделения магнетита (размером зерен 0,05 мм) из свежих и выветрелых горных пород с помощью созданного сепаратора с бегущим магнитным полем. Освоена методика центрифугирования в тяжелых жидкостях минеральных зерен. Освоена ультразвуковая установка УЗГ-ЮМ и разработана методика очистки минеральных зерен от примазок и поверхностных включений, позволившая избавляться от гидроокислов железа и марганца и части тонкодисперсных глинистых минералов.

На основе метода страт, предложенного М.Я. Кацем, разработана методика выделения мономинеральных калиевых и натриевых полевых шпатов 98–100% чистоты.

Получены авторские свидетельства на гидродинамический разделитель и диэлектрический сепаратор, которые изготовлены в лаборатории.

Изменена схема первичной обработки (рассева) проб. Вместо отсева пыли, приводящего к потере аксессуарных и рудных минералов размером меньше 0,1 или 0,05 мм, применено отмучивание на конусе, изготовленном и внедренном в практику работы, что позволяет сохранить аксессуарные минералы размером от 0,1 до 0,03 мм и резко увеличить производительность дробления, так как основное время уходило на отсев пыли.

Лаборатория в основном оснащена современным дробильным и обогащательным оборудованием, выпускаемым отечественными предприятиями: щековыми дробилками, дисковым истирателем и лабораторным дисковым истирателем, валковыми дробилками для измельчения проб от 0,5 до 60 кг, конусом и концентрационным столом для отмывки проб и получения концентрата, роликовыми и изодинамическими электромагнитными электрическими и диэлектрическими сепараторами, центрифугами, флотомашинами, ультразвуковой установкой.

#### ЦЕНТРАЛЬНАЯ ХИМИЧЕСКАЯ ЛАБОРАТОРИЯ (ЦХЛ)

В ЦХЛ в настоящее время проводятся исследования химического состава различных минеральных объектов: минералов, руд, горных пород, природных вод, искусственных минералов и других веществ.

Разработка и внедрение в практику лаборатории новейших эффективных химических и физико-химических методов выделения (разделения), концентрирования и контроля позволяют вести определения

72 химических элементов. Это несомненно способствует расширению и углублению геолого-геохимических исследований не только в ИГЕМ АН СССР, но и в других научных учреждениях, где используются методы, разработанные в ЦХЛ.

В ЦХЛ разработан и внедрен в практику комплекс химических и физико-химических методов для микроанализа силикатных минералов, позволяющий выполнять полный анализ из навесок 50–200 мг вещества. В последние годы начата разработка комплекса методов для микроанализа сульфидных минералов.

До 1960 г. в лаборатории определяли только сумму редкоземельных элементов (РЗЭ), или иногда разделяли их на две группы длительными химическими методами. В настоящее время отработан и используется комплекс физико-химических методов, позволяющий хроматографически разделять и титриметрически определять индивидуально все 15 редкоземельных элементов в интервале  $10^{-4}\%$ – $n\%$  в любых минеральных объектах.

Разработаны и внедрены в практику новые чувствительные, надежные спектрофотометрические методы определения микроколичеств элементов (Nb, Ta, Zr на уровне  $10^{-3}\%$  и более, а также Ag, Au, Se на уровне  $10^{-3}$ – $10^{-5}\%$ ) и макроколичеств элементов (Al, Ti, P, F, Cl, S, Fe и др. на уровне  $10^{-2}\%$ – $n\%$ ).

Освоен и внедрен метод эмиссионной пламенной спектрофотометрии — современный физико-химический метод — характеризующийся большой точностью, экспрессностью и чувствительностью. Этим методом определяются в любых минеральных объектах K, Na, Li, Rb, Cs, Ca, Sr, Ba на уровне  $10^{-3}$ – $10^{-4}\%$  (для Li, Cs —  $10^{-5}\%$ ).

В последние годы освоена методика атомно-абсорбционной спектрофотометрии, отличающаяся высокой чувствительностью, экспрессностью и точностью определения; 14 элементов определяются данным методом в любых объектах на уровне  $10^{-4}$ – $n\%$  (Cu, Zn, Co, Ni, Pb, Mn, Ag, Cd, Au, Fe, Ca, Mg, Ba, Sr).

В 1974 г. внедрен в практику комплекс фотометрических методов определения породообразующих элементов (Al, Si, Ti, Fe, P, Ca, Mg) в минералах, породах и рудах. По экспрессности выполнения комплекс этих методов превосходит классический анализ в 1,5–2 раза, не уступая в точности.

В лаборатории синтезированы, исследованы и введены в аналитическую практику других лабораторий страны новые эффективные органические аналитические реагенты: антразохром, хромазол-КС, (на Al), нитхромазо (на S,  $\text{SO}_4^{2-}$ ), тихромин (на Ti, Mo, Nb), трифенилгуанидиний хлорид для экстракции анионных форм элементов, родазол-ХС (на Ag, Au, Pt, Pd), полистиролазороданин (для выделения и концентрирования  $\Sigma\text{Pt}$  элементов, Ag и Au) и другие реактивы. С использованием этих реактивов разработаны новые эффективные (по чувствительности, экспрессности, надежности) методы определения указанных элементов. Выпуск упомянутых новых реагентов внедрен в промышленность химических реактивов сотрудниками ЦХЛ. Некоторые реагенты, разработанные впервые в ЦХЛ ИГЕМ АН СССР,

выпускаются за рубежом: нитхромазо (Англия, Япония), карбоксиарсеназо (Япония), дихлорхромотроповая кислота (Польша).

На синтез и применение новых реагентов в аналитической практике за период 1961–1975 гг. сотрудниками ЦХЛ получено 17 авторских свидетельств. Разработан комплекс методик термометрического определения рудообразующих элементов (Si, Al, Mn, Ca, Mg, Fe, Ti) в природных объектах. Термометрический метод анализа является современным физико-химическим методом, отличающимся экспрессностью определения, но уступает по точности классическому методу (относительная погрешность составляет 5–6%). Новый метод перспективен в анализе однотипных пород, когда необходимо проследить на большом количестве объектов за изменением соотношения отдельных компонентов.

## ЛАБОРАТОРИЯ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Лаборатория спектрального анализа основана академиком В.И. Вернадским в 1927 г. Ее непосредственным организатором и первым руководителем был доктор технических и физических наук, профессор С.А. Боровик. Лабораторией за долгие годы ее существования (в качестве аналитической ячейки отдела геохимии, затем самостоятельной лаборатории) выполнен большой объем аналитических работ.

Результаты опыта ЛСА в области полуколичественного анализа руд, минералов и горных пород обобщены в известном руководстве по расшифровке спектрограмм (Л.Н. Индиченко, 1960).

За последнее десятилетие основное внимание уделялось повышению чувствительности, точности, правильности и производительности методов количественного анализа, в том числе были разработаны и внедрены.

1. Методы прямого спектрального многоэлементного анализа рудных и породообразующих минералов — галенитов, сфалеритов, пиритов, антимонитов, касситеритов, вольфрамитов, хромитов и хромшпинелидов, магнетитов и титано-магнетитов, кварцев и др., а также метод "приближенно-количественного" анализа магматических горных пород на 35–40 элементов.

2. Методы высокочувствительного многоэлементного спектрального анализа природных маломинерализованных вод и высокоминерализованных рассолов.

3. Методы спектрохимического прецизионного анализа горных пород на 15–20 микрокомпонентов, микрометод анализа особо-сложных минералов на главные компоненты, а также совместно с рентгеноспектральной и химической лабораториями — уникальный комплекс высокочувствительных и экспрессных спектрохимических методов определения благородных металлов в медно-никелевых рудах, минералах, горных породах и промышленных материалах.

4. Методы микроспектрального и локально-лазерного анализа минералов (гранатов, вольфрамит-гюбнеритов, касситеритов и др.) и сложных минеральных ассоциаций.

5. Специальные методы чувствительного спектрального определения рения в молибденитах, фтора в породах и породообразующих

минералах, рубидия, таллия, стронция и бария в гранитоидах и слюдах и др.

Большое научное и практическое значение имеют проводимые ЛСА обследования (1964/65, 1967/68, 1974 гг.) качества анализов горных пород по 50–60 химическим элементам, выполняемых в 80–120 химических и спектральных лабораториях, на основе которых обобщается представительный материал о величинах и природе аналитических ошибок.

Коллективом ЛСА в 1965 г. организованы межлабораторное исследование и аттестационный анализ вещества серий естественных стандартов горных пород, в результате чего в 1969 г. аттестованы и переданы десяткам организаций первые 4 аналитических стандарта — гранодиорит "Рыжик", миаскит МИВ-1, диабаз ДИМ-1 и перидотит ПИМ-1. В 1974 г. аттестовано еще 14 стандартов габброидов, базальтов и анортозитов. В общей сложности разрабатываемая ЛСА по оригинальной методологии система аналитических и геохимических стандартов насчитывает не менее 40 наименований пород и руд и не имеет аналогов по своей полноте, единству и надежности характеристик.

Существенное значение для повышения чувствительности, точности, правильности и производительности спектрального и спектрохимического анализа имеет разработка и активное внедрение в ЛСА и в других организациях приставки к спектрографу полуавтомата АИ-3, предназначенного для массового количественного определения с высокой точностью и экспрессностью благородных металлов и других компонентов. Полуавтомат АИ-3 удостоен высших наград ВДНХ (диплома I степени и золотой медали) на тематической выставке "Применение полуавтоматов АИ-3 в народном хозяйстве", посвященной 250-летию Академии наук СССР (1975 г.).

Дальнейшее повышение производительности труда и качества исследований, в том числе методических и аналитических, может основываться: 1) на проведении более полной автоматизации анализа за счет включения в схему автоматизации этапа интерпретации спектрограмм на базе ЭВМ и разработки и получения соответствующей аппаратуры математического обеспечения, 2) на дальнейшем преимущественном развитии экономически выгодных многоэлементных методов анализа, 3) на более интенсивном завершении разработки системы опорных и производных стандартов и расширения такой системы, 4) на более тесной координации деятельности всех аналитических лабораторий и особенно на основе кооперирования с рентгеноспектральными квантометрическими и зондовыми методами, 5) на расширении и дальнейшей специализации спектрохимического направления работ и усилении исследований по органическим групповым осадителям.

#### ЛАБОРАТОРИЯ РЕНТГЕНСПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Лаборатория рентгеноспектрального микроанализа создана в ИГЕМ АН СССР в апреле 1969 г. Лаборатория оснащена двумя микроанализаторами М-46 французской фирмы "Камека".

Методическая работа в лаборатории осуществлялась в основном в направлении повышения чувствительности и правильности локального рентгеноспектрального анализа минералов, а также расширения круга объектов исследования.

В лаборатории выполнена большая работа по установлению оптимальных условий анализа элементов-примесей, что позволило создать высокочувствительные методы анализа микроконцентраций палладия и благородных и редких элементов в сульфидах и породообразующих минералах с чувствительностью до 0,003–0,005 вес.%.

Развитие и совершенствование методов количественного анализа основных элементов в рудообразующих сульфидах, минералах платиноидов, минералах группы блеклых руд, минералах золота, породообразующих минералах осуществлялось в направлении повышения правильности анализа. С этой целью изучены источники ошибок, связанные как с условиями проведения анализа, так и с применением различных способов расчета, что позволило значительно повысить правильность и точность анализа многих групп минералов.

Создана и внедрена программа дисперсионного анализа и расчета поправок при количественном рентгеноспектральном микроанализе для ЭВМ БЭСМ-6 на языке АЛГОЛ-60. Разработана специальная программа "Платиноид" для расчета состава минералов благородных металлов с относительной ошибкой определения концентраций главных элементов менее 5%. Созданы программы расчета отдельных поправочных коэффициентов на языке "Аналитик" для ЭВМ МИР-2 и на языке "Бэйсик" для компьютера 9830А.

Проводились работы по статистическому анализу и оптимальному планированию рентгеноспектрального микроанализа негомогенных геологических объектов.

Выполнены методические работы, позволившие провести изучение состава твердой и жидкой фаз газовой-жидких включений в различных минералах. Разработана методика количественного анализа минералов, распадающихся под зондом. Для определения концентрации элементов в рудообразующих сульфидах по данным ЭВМ построены калибровочные кривые, что позволило, не снижая точности, существенно повысить экспрессность анализа.

Создан и пополняется запас внутрилабораторных эталонов — простых и сложных окислов, сульфидов, интерметаллоидов, силикатов.

Все разработанные методики апробированы на синтетических минералах, при исследовании большого количества многокомпонентных минералов и использовались при изучении состава минералов и форм нахождения элементов в рудах.

За период с 1970 по 1975 г. в лаборатории проанализировано около 5000 образцов, установлен состав 15000 фаз (минералов) с количественной оценкой содержания, около 5000 фаз с полуколичественной оценкой, кроме того, в 2000 образцов изучено распределение элементов по площади.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ОТ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ. . . . .	3
ИНСТИТУТ ГЕОЛОГИИ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ, ПЕТРОГРАФИИ, МИНЕРАЛОГИИ И ГЕОХИМИИ АКАДЕМИИ НАУК СССР (Ф.М. Чухров, В.И. Рехарский, Ю.Г. Сафонов) . . . . .	5
ГЕОЛОГИЯ И УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ЭНДОГЕННЫХ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ (Г.А. Соколов, В.И. Казанский) . . . . .	16
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКЗОГЕННЫХ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ (Д.Г. Сапожников) . . . . .	41
ГЕОЛОГИЯ И УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ (В.П. Петров) . . . . .	59
ПРОБЛЕМЫ МЕТАСОМАТИЗМА И МЕТАМОРФИЗМА (Д.С. Коржинский) . . . . .	76
ОСНОВНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ПЕТРОЛОГИИ (Г.Д. Афанасьев) . . . . .	111
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЯ (И.Д. Рябчиков, В.В. Лапин, Г.О. Пилоян) . . . . .	139
ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД В СВЯЗИ С ПРОБЛЕМАМИ РУДО- И ПЕТРОГЕНЕЗИСА (Б.П. Беликов) . . . . .	149
РАЗВИТИЕ УЧЕНИЯ О МИНЕРАЛАХ И МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИИ (Ф.В. Чухров, Н.В. Петровская) . . . . .	154
ГЕОХИМИЯ ЭНДОГЕННЫХ И ГИПЕРГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ (В.И. Рехарский) . . . . .	173
АНАЛИТИЧЕСКИЕ ЛАБОРАТОРИИ ИГЕМ АН СССР. . . . .	204
Лаборатория абсолютного возраста (Л.Л. Шанин) . . . . .	204
Лаборатория разделения минералов (К.К. Никитин) . . . . .	205
Центральная химическая лаборатория (ЦХЛ) (Н.Н. Басаргин) . . . . .	206
Лаборатория спектрального анализа (В.Г. Хитров) . . . . .	208
Лаборатория рентгеноспектрального анализа (Г.Д. Гладышев) . . . . .	209

ГЕОЛОГИЯ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ,  
ПЕТРОГРАФИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ

*Утверждено к печати*

*Институтом геологии рудных месторождений,  
петрографии, минералогии и геохимии*

Редактор *Н.В. Знаменская*  
Художественный редактор *В.А. Чернецов*  
Технический редактор *И.В. Голубева*

Подписано к печати 28/X 1976 г. Т — 18621  
Усл.печл. 13,25. Уч.-изд.л. 15,7. Формат 60 х 90 1/16  
Бумага офсетная № 1. Тираж 1900 экз. Тип. зак. 1478  
Цена 1 р. 10 к.

Книга издана офсетным способом

Издательство "Наука",  
103717 ГСП, Москва, К-62, Подсосенский пер., 21  
1-я типография издательства "Наука",  
199034, Ленинград, В-34, 9-я линия, 12

1 р. 10 к.

2108