

## THE MAIN TENDENCIES IN DEVELOPMENT OF THE ORE-FORMING THEORY

V. I. SOTNIKOV

*The ore formation theory, originated from the "mountain art", develops through the following successive stages: description of ore deposits; their systematical analysis with the recognition of related deposits; creation of parametric database; construction of geological-genetic models; elaboration of genetic models of ore-forming systems.*

*Развитие теории рудообразования, зародившейся в недрах "горного искусства", проходило следующие этапы: описание рудных месторождений; их системный анализ с выделением естественных групп родственных месторождений; создание банка параметрических данных; построение геолого-генетических моделей; разработка генетических моделей рудообразующих систем.*

© Сотников В.И., 1996

## ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ТЕОРИИ РУДООБРАЗОВАНИЯ

В. И. СОТНИКОВ

Новосибирский государственный университет

### ВВЕДЕНИЕ

Формирование и развитие теории рудообразования теснейшим образом связаны с возникновением и совершенствованием горного дела. Появление различных отраслей горнодобывающей промышленности (от древнего примитивного до современного уровня) не только основывалось на выявлении полезных минеральных ископаемых, но и являлось источником их познания. Накопление таких знаний, а также данные смежных наук и привели к формированию теории рудообразования.

В зависимости от масштабов проявления минерального сырья выделяются месторождения (промышленные и непромышленные), рудопроявления и рудные точки. Эти понятия в основе имеют экономическую сущность. Для получения информации о характере месторождения используют различные методы: детальную геологическую съемку поверхности, геофизические исследования, подземное геологическое картирование (горные выработки, скважины), минералогические исследования руд и вмещающих пород с привлечением химического, спектрального, рентгеноструктурного, термического, изотопного и других видов анализа. Важное значение имеют экспериментальные работы, воспроизводящие природные условия образования руд, и компьютерное моделирование развития рудообразующих процессов с учетом выявленных геологических, геохимических и физико-химических параметров. Широко привлекаются достижения других наук: физической химии, теплофизики, гидродинамики, металлургии, прикладной математики.

### ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ И ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ ТЕОРИИ РУДООБРАЗОВАНИЯ

В мире известно несколько тысяч рудных месторождений и еще больше рудопроявлений. Каждое месторождение в той или иной мере индивидуально. Даже если рассматривать месторождения, близкие по составу и находящиеся в одном регионе, то всегда найдется много специфических характеристик, отличающих одно месторождение от другого. Поэтому состояние рудной геологии в начальный период находилось фактически на уровне "горного искусства". В этой ситуации основная информация по месторождениям накапливалась специалистами, имеющими многолетний опыт работы с рудными

месторождениями. Большинство публикаций имеют описательный характер.

Количество открываемых, разведанных и вовлекаемых в эксплуатацию месторождений со временем все более увеличивалось. Резко возрос объем геологической информации. Все чаще публикуются монографии по наиболее детально изученным месторождениям и рудным районам. При исследовании рудных проявлений начинает широко привлекаться принцип аналогии. Отдельные месторождения (обычно наиболее крупные и лучше изученные) возводятся в ранг типовых, и с ними сравниваются изучаемые рудные объекты. Это сравнение обычно проводили по наиболее бросающимся в глаза характеристикам, которые далеко не всегда могли быть определяющими в формировании и размещении месторождений.

По мере увеличения числа месторождений информация начала захлестывать исследователей. В связи с этим назрела необходимость системного подхода к изучению рудных месторождений, выделению и исследованию их естественных групп, характеризующихся общими определяющими факторами формирования и размещения. Такие попытки предпринимались и ранее, когда рудные месторождения классифицировали по каким-то отдельным параметрам: глубинам образования, температурам формирования, связям с магматизмом, морфологии рудных тел, минеральному составу руд и т.д. Но эти отдельные параметры, фиксирующие только одну какую-то сторону процесса, не могут характеризовать всю сложность рудообразования.

Многоплановым подходом к этой проблеме явилось введение понятия о рудной формации как о естественной ассоциации месторождений, сходных по вещественному составу руд, геологической обстановке и условиям образования [1]. Преобладание генетического принципа в формационной систематике стало значительным стимулом в развитии исследований по выявлению параметров рудообразования (температуры, давления, состава и агрегатного состояния рудообразующих растворов, форм переноса рудных элементов и сопутствующих компонентов, источников энергии и вещества, факторов и граничных условий отложения минералов), определяющих сущность конкретной рудной формации. Начался период интенсивного накопления параметрических характеристик рудообразующих процессов. Представления о процессах формирования месторождений получили хорошую количественную основу, научные выводы и заключения могли воспроизводиться. Геологи стали подходить к объектам исследования с "мерой и весом", о чем в свое время мечтал академик С.С. Смирнов [2]. Фактически в рудной геологии началось создание базы для проведения исследований на уровне точных наук.

При определении параметров геологи широко пользуются методами смежных наук, в частности

аналитической и физической химии, теплофизики, гидродинамики. Наряду с этим существуют и специфические геологические и геохимические методы. Широко используются термобарогеохимические методы, позволяющие оценивать температуру, давление, особенности агрегатного состояния и состав минералообразующих растворов, захваченных и законсервированных в минералах в виде флюидных микровключений. Обычный размер включений колеблется от 5 до 30 мк. Гетерогенные включения, состоящие из жидкой, газовой и твердой фаз, нагревают в специальных термокамерах до стадии их гомогенизации (наблюдения ведут под микроскопом). Температуру гомогенизации включения принимают за температуру образования минералохозяина с учетом поправок на существовавшее при этом давление. Один из методов определения давления расчетный, по характеру растворения и составу твердых фаз (солей), находящихся в этих включениях. Для оценки состава жидкостей и газов во включениях используются криометрические методы: замораживание отдельных соединений при разных температурах, а также традиционные химические методы.

Глубинное положение источника рудообразующего вещества в земной коре или верхней мантии Земли устанавливается путем анализа изотопного состава серы, свинца, углерода, стронция, кислорода, водорода и других элементов, входящих в состав образующихся на месторождениях минералов. Использование нестабильных изотопов дает информацию об абсолютном возрасте геологических образований (K–Ar-, Rb–Sr-, U–Pb-, Sm–Nd- и другие методы).

Для многих рудных формаций были созданы базы параметрических данных, характеризующих развитие рудообразующего процесса от инициирующего источника до области рудоотложения. С учетом экспериментальных данных о граничных условиях природного рудообразования это позволило приступить к разработке геолого-генетических моделей рудных формаций. Геолого-генетическая модель рудной формации — это некоторый образ, представляющий в упрощенной и удобной форме сведения об изучаемой группе месторождений. С учетом специфики объектов исследований в рудной геологии широко распространены понятийные, а также физические (аналоговые) и математические модели. Модели служат наглядной иллюстрацией особенностей месторождений, характеризуют обобщенную картину и специфику рудообразующих процессов. Модели не копируют оригинал, а отражают лишь наиболее характерные и значимые его черты. Важно, чтобы разработанная модель не вступала в противоречие с имеющимися наблюдениями, учитывала большинство выявленных фактов и давала возможность, объясняя причины природных явлений, предсказывать их следствия.

Дальнейшим развитием системного и модельного подходов явилось построение динамических моделей рудообразующих систем. Под рудообразующей системой понимают совокупность взаимосвязанных процессов и явлений, структур и пород, эволюция которых в пространстве и времени сопровождалась формированием месторождений.

### КАК ОБРАЗУЮТСЯ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ РУДНЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

По происхождению и условиям образования рудные месторождения различны [3]. Из всего многообразия типов рудных проявлений рассмотрим только одну группу гидротермальных месторождений, которые образуются из горячих минерализованных растворов (гидротерм) в результате отложения рудного вещества в дренирующих структурах (системы трещин в земной коре или толщи пород с высокой проницаемостью) по ходу движения гидротермального потока. Под гидротермальными растворами (гидротермами) понимают нагретые до 200–600°C многокомпонентные газопо-жидкие растворы, циркулирующие в земной коре и участвующие в перемещении и отложении минерального вещества.

Практическое значение гидротермальных месторождений весьма велико. В этих месторождениях сосредоточены почти все мировые запасы молибдена, 3/4 запасов коренных руд олова, около половины запасов вольфрама, меди, свинца и цинка, урана и других металлов. Из руд гидротермальных месторождений извлекается в качестве попутных компонентов большое число редких металлов: кадмий, индий, германий, рений, селен, теллур, галлий и др.

Основным компонентом гидротерм является вода. В зависимости от ее происхождения различают магматогенную и метаморфогенную воду, а также инфильтрационные воды глубокой циркуляции.

Магматогенная вода отделяется от силикатного магматического расплава (магмы) при его подъеме к поверхности и кристаллизации с формированием горных пород (гранитов, диоритов и др.). Наибольшее количество воды (до 10 мас. %) заключено в гранитных магмах, содержащих не менее 65 вес. %  $\text{SiO}_2$ . Поэтому большинство магматогенных гидротермальных месторождений связано с гранитами. При кристаллизации гранитных расплавов большая часть воды из магмы удаляется (в гранитах обычно остается около 1–2% воды).

Метаморфогенная вода образуется в результате высвобождения ранее химически связанной (в виде гидроксилсодержащих минералов) и поровой воды из горных пород под воздействием высоких давлений и температур. Так, например, если в осадочных породах содержание воды достигает 20–30%, то в интенсивно метаморфизованных породах ее количество часто сокращается до 1–2%.

Инфильтрационные воды глубокой циркуляции представляют собой нагретые подземные воды, проникшие на значительную глубину в земную кору. Формирование многих гидротермальных растворов происходит путем смешения вод из разных источников.

Кроме воды, компонентами гидротермальных растворов являются хлориды щелочей (главным образом  $\text{NaCl}$ ), углекислота и кремнезем. В значительно меньших количествах присутствуют сульфат- и сульфид-ионы, кальций, магний, железо, а из газовых компонентов – азот, метан, водород, фтор, хлор, окись углерода. Концентрация растворов обычно составляет 5–20 мас. %, но в ряде случаев достигает 50 мас. % и более. Содержание в растворах рудных элементов ( $\text{Cu}$ ,  $\text{Pb}$ ,  $\text{Zn}$ ,  $\text{Mo}$ ,  $\text{Sn}$  и др.) колеблется в широких пределах и чаще всего составляет  $10^{-1}$ – $10^{-3}$  г/л. Источником рудного вещества служат как магматические расплавы, так и вмещающие их породы, из которых это вещество экстрагируется на путях просачивания гидротермальных растворов.

Перенос рудных компонентов в гидротермальных растворах осуществляется преимущественно в виде комплексных химических соединений, в том числе хлоридных, фторидных, гидросульфидных и карбонатных. Разложение комплексов при снижении температуры, падении давления, нейтрализации растворов, а также в ходе эволюции их щелочности приводит к осаждению рудных компонентов.

При достаточно больших температурных интервалах гидротермального процесса для многих рудных минералов характерны относительно узкие диапазоны наиболее благоприятных температур формирования: для минералов  $\text{Sn}$  – 430–300°C,  $\text{Mo}$  – 370–300°C,  $\text{W}$  – 350–280°C,  $\text{Cu}$  – 300–150°C,  $\text{Au}$  – 220–180°C,  $\text{Hg}$  – 150–70°C.

Рудообразование осуществляется на глубинах от десятков метров до нескольких километров при давлениях от десятков до 2000 бар и выше; наиболее характерен диапазон давлений 250–1500 бар. Резкое падение давления нарушает равновесие в гидротермальной системе и приводит к отделению летучих компонентов, распаду комплексных соединений и отложению тех или иных минералов.

Таким образом, модель гидротермальной рудообразующей системы органично объединяет три главные области: 1) корневую область магмо- и флюидозарождения; 2) зону транспорта или тепло- и массопереноса; 3) область рудоотложения и формирования ореолов рассеяния рудного вещества. Соотношение и взаимосвязь этих главных областей в пространстве и времени создают общую структуру конкретных рудообразующих систем. Каждая из выделенных областей характеризуется специфическими параметрами, которые определяют генетическую сущность рудообразующей системы на данном глубинном уровне. Для корневой области

это источники энергии, рудообразующего вещества и флюидов, условия образования магматических расплавов, потенциальная рудоносность магм, формы первоначального нахождения элементов. Информацию об этой области, которая располагается на значительных глубинах, в основном получают геофизическими методами, а также путем исследования обломков глубинных пород (ксенолитов), выносимых на поверхность. Важное значение имеют определения изотопного состава минералов и пород, прямые эксперименты и компьютерное моделирование, изучение рудообразующих процессов в областях современного вулканизма.

Зона транспорта может быть охарактеризована элементами модели, рассматривающими формы тепло- и массопереноса, гидродинамический режим в недрах, особенности развития глубинных дренирующих структур — систем трещин в породах, по которым осуществляется движение рудоносных растворов. Эта зона часто приурочена к разломам, зонам трещиноватости и высокой пористости, по которым теплоноситель движется к земной поверхности в виде горячего флюидного потока относительно небольшого сечения. В данной зоне происходит транспортировка большого количества вещества и энергии. Преобладающая информация по зоне транспорта — геолого-структурный анализ глубинного строения рудного поля, данные физического и физико-химического эксперимента, термодинамический анализ.

Область рудоотложения (разгрузки) — зона резкого падения давления или температуры, а также геохимические барьеры, которые вызывают отложение рудного вещества из растворов. Для этой области информативными являются термобарогеохимические и изотопные исследования, анализ минеральных ассоциаций, текстурно-структурные исследования механизма отложения руд, анализ распределения рудных компонентов и минералов руд, математическое моделирование процессов рудоотложения.

В настоящее время параметрическими описаниями в достаточной степени обеспечены модельные построения области гидротермального рудообразования, наиболее доступной для наблюдения и изучения, и в меньшей степени зоны транспорта флюидов. Недостаточно разработаны элементы моделей, характеризующие глубинные уровни рудообразующих систем, практически недоступные для наблюдения.

## **РУДООБРАЗУЮЩАЯ СИСТЕМА МЕДНО-МОЛИБДЕНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

Особенности гидротермальных рудообразующих систем можно проиллюстрировать на примере хорошо изученных месторождений меди и молибдена. В настоящее время более 65 % мировых запасов и около 60 % мировой добычи меди, а также бо-

лее 60 % запасов молибдена и около 70 % его добычи приходится на так называемые медно-молибден-порфиновые месторождения, имеющие гидротермальное происхождение. Для этих месторождений характерны крупные скопления небогатых руд, представленных системами тонких рудных прожилков и мелкой вкрапленностью сульфидных рудных минералов, среди которых наиболее распространены халькопирит ( $\text{CuFeS}_2$ ) и молибденит ( $\text{MoS}_2$ ).

Руды залегают в разных вмещающих породах, но всегда обнаруживают тесную пространственную и хронологическую связь с магматическими телами определенного состава и строения, затвердевшими на небольшой глубине. Такие тела содержат  $65 \pm 5$  мас. %  $\text{SiO}_2$  и состоят из полевых шпатов, кварца и небольшого количества Fe—Mg-силикатов — роговой обманки и темной слюды (биотита). Породы подобного состава называют гранодиоритами и гранитами. Для рудоносных магматических тел характерны относительно крупные (до 1—2 см в поперечнике) кристаллы (вкрапленники, или порфиновые выделения) указанных выше минералов, которые резко выделяются на фоне мелкозернистой основной массы, образованной теми же минералами. Такую структуру магматических пород называют порфировой. Отсюда и название — медно-молибден-порфиновые месторождения (порфиновые магматические тела, которые сопровождаются медно-молибденовыми рудами).

В настоящее время разрабатываются месторождения этого типа, содержащие в среднем 1,5—0,5% меди и 0,01—0,1 % молибдена. Кроме того, в рудах содержится золото (0,01—1,0 г/т), серебро (1—10 г/т) и рений (0,01—1,0 г/т). Попутное извлечение этих металлов значительно увеличивает промышленную ценность месторождений. Общие запасы меди одного промышленного месторождения измеряются миллионами тонн, а молибдена — десятками и сотнями тысяч тонн. Крупные запасы меди и металлов-спутников, относительно простая форма рудных тел (прожилково-вкрапленное оруденение на больших площадях), позволяют создавать на базе этих месторождений мощные, длительно действующие горнорудные предприятия с максимальным уровнем механизации и автоматизации и высокой производительностью.

Наиболее крупные медно-молибден-порфиновые месторождения находятся в Чили (Чукикамата — 35 млн т меди, Эль-Тениенто — 31 млн т, Эскондидо — 28 млн т). Много крупных месторождений обнаружено в Перу, Панаме, Мексике, США. В СНГ промышленные месторождения этого типа имеются в Казахстане, Узбекистане и Армении. В России подобные месторождения отрабатываются в Сибири (Сорское в Хакасии, Жирекенское и Бугдаинское — в Восточном Забайкалье). Имеются они и в экономически слабоосвоенных районах Северо-Востока России, где в настоящее время не разрабатываются.

Медно-молибден-порфиновые месторождения, общая характеристика которых дана в работах [4–6], в основном формируются на глубинах 0,5–2 км. Однако корни рудообразующих систем, производными которых являются эти месторождения, уходят в мантию. Об этом свидетельствуют данные по изотопному составу Sr, Nd, H, O, Pb и других элементов, входящих в минералы рудоносных порфириновых пород и руд. Проходя через земную кору, рудоносные расплавы и рудоносные растворы заимствуют из нее рудные элементы. В конечном итоге рудное вещество представляет собой смесь мантийных и коровых компонентов, находящихся в различных количественных соотношениях. Полагают, что Cu и Au связаны в основном с мантийным источником, а Mo – с коровым.

Под воздействием поднимающихся из мантии магматических расплавов, нагретых до температуры 1200°C и более под влиянием высокотемпературных водных или иных растворов на нижних уровнях земной коры (глубины 30–40 км), происходят разогрев и плавление коровых пород с образованием вторичных магм гранодиоритового-гранитного состава. Локальные участки плавления постепенно сливаются в один общий нижний магматический очаг.

Формирование подобной системы характеризуется всевозрастающей тенденцией магм к перемещению в верхние горизонты земной коры как за счет положительного объемного эффекта плавления (до 15% в зависимости от водонасыщенности магм), так и за счет гравитационной неустойчивости (менее плотные гранитные магмы “всплывают” в коре). Транспорт расплава на верхние уровни осуществляется по магмоводам – трещинным каналам различного происхождения. Перемещенный на верхние горизонты земной коры расплав на глубинах 5–10 км образует промежуточный магматический очаг. Кристаллизация расплава в этом очаге приводит к отделению избыточного водного рас-

твора, который перемещается по дренирующим разломам и поступает в область рудоотложения. В эту же область поступает и часть расплава. Его кристаллизация приводит к формированию небольших тел порфириновых пород, постоянно присутствующих на рассматриваемых месторождениях.

В области рудоотложения растворы активно взаимодействуют с вмещающими породами и вызывают их значительное изменение с образованием новых минералов: калиевого полевого шпата ( $KAlSi_3O_8$ ), светлой слюды – серицита ( $KAl_2Si_2O_{10}(OH)_2$ ), кварца ( $SiO_2$ ), пирита ( $FeS_2$ ). В измененных породах отлагается рудное вещество в виде прожилков, состоящих из кварца ( $SiO_2$ ), пирита ( $FeS_2$ ), халькопирита ( $CuFeS_2$ ), молибденита ( $MoS_2$ ) и рассеянной вкрапленности рудных минералов. Все эти новообразования в совокупности составляют рудное тело, называемое рудным штокверком. Рудные тела на этих месторождениях не имеют четких геологических границ. Контур их проводится по данным опробования с учетом содержаний рудных элементов, удовлетворяющих требования промышленности. В настоящее время такие оконтуривающие содержания меди составляют 0,25–0,30%.

Как формируются многочисленные мелкие трещины и как рудоносные растворы поступают в них? Можно предложить следующее объяснение. Рассматриваемые месторождения формируются в участках повышенной тектонической активности, которые сопоставимы с сейсмоактивными зонами. Разрешение напряжений приводит к разуплотнению пород и увеличению их объема за счет массового образования мельчайших трещин и пор. Это явление неупругого расширения вещества, известное в физике как дилатансия, создает предпосылки для миграции растворов из окружающей среды.

Физико-химические условия рудообразования (табл. 1) оцениваются по результатам исследования

**Таблица 1.** Физико-химические параметры формирования медно-молибденовых месторождений (по данным изучения расплавных и флюидных включений)

Геологические образования	Температура гомогенизации, °C	Фазы во включениях	Тип гомогенизации	Концентрация солей NaCl, %	Давление, атм
Рудоносные магматические тела	1100–800		Расплав		3000–2000
Кварц-калишпатовые жилы и гнезда	730–450	Газ + жидкость	Газ		2000–1400
Кварц-молибденитовые жилы	470–390	Газ + жидкость + NaCl	Жидкость	18–12	1500–600
Кварц-халькопиритовые жилы	350–250	Газ + жидкость + CO <sub>2</sub>	Жидкость	15–10	800–300
Кварц-пиритовые жилы	250–180	Газ + жидкость + CO <sub>2</sub>	Жидкость	8–5	300–100
Кварц-карбонатные жилы и гнезда	180–100	Газ + жидкость + CO <sub>2</sub>	Жидкость	< 5	80–30

газово-жидких включений в минералах. Рудообразующий процесс развивается в широком температурном диапазоне от 700–600°C на ранней стадии до 400–200°C (основное концентрированное рудообразование) и ниже. Давление изменяется от 1500 до 100–80 бар. Рудоносные растворы имеют щелочно-хлоридный состав, а при понижении температуры становятся щелочно-хлоридно-углекислыми. Ранние высокотемпературные растворы находятся в надкритическом состоянии и содержат много растворенных галоидов. Содержание Си и Мо в растворах составляет  $0,0n - 0,1n$  г/л, где  $n$  – числа от 1 до 9. Отложение рудных минералов происходило в условиях высоких градиентов температур, давлений и кислотно-щелочных свойств растворов. Формирование руд на верхних уровнях рудообразующей системы завершает сложный цикл глубинной генерации вещества, его транспортировки и изменения в структурах земной коры.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Достигнутый уровень теории рудообразования и накопленная обширная параметрическая информация по многим рудным формациям дают возможность для разработки количественных генетических моделей рудообразующих систем, что позволит переходить от гипотетических предположений к более обоснованным генетическим построениям. Открываются новые возможности в познании причинно-следственных взаимосвязей процессов рудообразования с геологическим развитием литосферы. Решение многих генетических вопросов и повышающаяся степень научного обоснования принципиальных теоретических проблем все больше приближают нас

к уверенному прогнозированию месторождений полезных ископаемых.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов В.А., Дистанов Э.Г., Оболенский А.А. и др. В кн.: Рудообразование и генетические модели эндогенных рудообразующих систем. Новосибирск: Наука, 1988. С. 5–10.
2. Смирнов С.С. Избранные труды. М.: Изд-во АН СССР, 1955.
3. Синяков В.И. Геолого-промышленные типы рудных месторождений. СПб.: Недра, 1994.
4. Сотников В.И., Берзина А.П., Никитина Е.И. Медно-молибденовая рудная формация. Новосибирск: Наука, 1977.
5. Попов В.С. Геология и генезис медно- и молибденпорфировых месторождений. М.: Наука, 1977.
6. Кривцов А.И., Мигачев И.Ф., Попов В.С. Медно-порфировые месторождения мира. М.: Недра, 1986.

\* \* \*

Виталий Иванович Сотников, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры месторождений полезных ископаемых Новосибирского государственного университета, зав. лабораторией рудно-магматических систем Объединенного института геологии, геофизики и минералогии Сибирского отделения РАН, действительный член Международной академии минеральных ресурсов. Лауреат Государственной премии СССР. Автор 7 монографий и более 250 научных статей. Область научных интересов: рудообразование и металлогения.