

НОВОЕ
В ЖИЗНИ, НАУКЕ,
ТЕХНИКЕ

ЗНАНИЕ

тедереб

6/1974

Ф. И. Вольфсон

СЕРИЯ
НАУКА О ЗЕМЛЕ

ПРОИСХОЖДЕНИЕ
РУД МЕТАЛЛОВ



ПРОИСХОЖДЕНИЕ РУД МЕТАЛЛОВ

Ф. И. Вольфсон,

доктор геолого-минералогических наук,
лауреат Ленинской премии

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»
Москва 1974

Вольфсон Ф. И.

В 72 Происхождение руд металлов. М., «Знание», 1974.

64 с. (Новое в жизни, науке, технике. Серия «Наука о Земле», 6. Издается ежемесячно с 1966 г.).

В брошюре приводятся данные новейших исследований, существенно уточняющие имевшиеся ранее представления об образовании руд металлов. Рассмотрены вероятные источники рудного вещества, обусловившие возможность формирования месторождений, связанных с глубинными процессами развития земной коры, а также с процессами, протекающими на поверхности земли. Дана классификация этих процессов и охарактеризованы руды металлов. Рассмотрены закономерности размещения рудных месторождений всех основных генетических групп, формирующихся в различной геологической обстановке.

Брошюра рассчитана на широкий круг читателей и специалистов, интересующихся вопросами образования руд металлов.

30706

6 П1.7

СО Д Е Р Ж А Н И Е

ВВЕДЕНИЕ	3
ЭНДОГЕННЫЕ РУДНЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ	7
РУДООБРАЗОВАНИЕ КАК ЕСТЕСТВЕННЫЙ ПРОЦЕСС ГЕОЛОГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ	26
УСЛОВИЯ РАЗМЕЩЕНИЯ РУД	40
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	51

ВВЕДЕНИЕ

В НАСТОЯЩЕЕ время, в эпоху научно-технической революции, когда человечество широко использует атомную энергию в мирных целях, когда люди научились посылать в космос корабли, побывали на Луне и привезли лунный грунт, а автоматические станции достигли Венеры и Марса, нашли применение в технике почти все элементы таблицы Менделеева. Сейчас приобрели промышленное значение более 20 только новых редких элементов, которые еще каких-нибудь 30—40 лет назад в промышленности вообще не применялись. К ним помимо урана, основного элемента атомной промышленности, относятся литий, бериллий, тантал, ниобий, цирконий, гафний, цезий и др.

Человечество многие тысячелетия накапливало опыт по поискам и добыче минеральных богатств. Однако особенно большие успехи в изучении земных недр и выявлении всех тех многочисленных месторождений металлов, без которых не может развиваться современная техника, получены в современную эпоху. Археологи показали, что еще на заре развития человеческого общества стали известны и использовались людьми те металлы, которые находились в самородном состоянии. В настоящее время с применением методов изотопного анализа достаточно точно установлено, что медь была известна на территории Турции в начале седьмого тысячелетия до нашей эры, а в Европе, на Балканах, она широко использовалась за 5 тыс. лет до нашего летосчисления¹. Не менее 6 тыс. лет назад человечество узнало о золоте. Имеются достоверные сведения, что в Малой Азии искусство выплавки железа из руд было известно уже в XIV в. до нашей эры.

Очень давно добывалась в Китае и ртуть. Имеются сведения, что в Древнем Египте проводилась разработка железорудных месторождений, находящихся между Нилом и Красным морем. В первом тысячелетии до нашей эры индусы, арабы, финикийцы уже умели делать оружие из стали. В Греции, в Лавриуме, в то время были уже известны рудники серебряноцинковых руд. Знаменитые мореплаватели древних времен положили начало

¹ Наука и жизнь, 1968, № 7, стр. 33—37.

горному делу в Англии. Горный промысел получил большое развитие в рабовладельческих государствах Средней Азии и Закавказья, где с незапамятных времен проводилась добыча золота, драгоценных камней, серебра, свинца, олова, меди, ртути и некоторых других металлов. В период древнерусской культуры наши предки широко развернули горный промысел в Среднем Приднепровье, где добывались бурые железняки, из которых получали железо, шедшее на изготовление предметов домашнего обихода. Дальнейшее развитие добыча руд получила в России в XV—XVII вв. В это время значительно расширилось производство изделий из железа в центральных районах нашей страны, в Приладожье и Прионежье, и широко развернулись поиски руд меди и других металлов. Особенно больших успехов горная промышленность в России достигла в XVIII в., при Петре I. На Урале была создана мощная по тому времени металлургия. Однако в остальной крепостнической России XIX в. горное дело слабо развивалось вплоть до Великой Октябрьской социалистической революции.

Лишь после того, как в 1917 г. хозяином нашей страны стал рабочий класс, развитие горного дела и геолого-разведочных работ, обеспечивающих создание сырьевой базы, приобрело значительный размах. Особенно крупный объем геологопоисковых и разведочных работ в СССР производится в настоящее время, в эпоху строительства коммунистического общества. Да это и понятно. Ведь человечество еще не знало таких гигантских темпов развития промышленности, каких достигла наша социалистическая Родина. Это, в свою очередь, требует непрерывного и во все возрастающем масштабе наращивания запасов сырья для различных отраслей производства. В связи с этим в решениях XXIV съезда КПСС предусмотрено «расширить работы по геологическому изучению земных недр и разведке минерально-сырьевых ресурсов прежде всего в районах действующих горных предприятий, а также в районах, наиболее экономически выгодных для промышленного их освоения. Усилить разведку на нефть и газ, особенно в европейской части страны, коксующиеся и энергетические угли, высокосортные бокситы, важнейшие цветные, редкие и драгоценные металлы, алмазы, сырье для производства минеральных удобрений, особенно фосфатных... Развернуть поисково-разведочные работы в прибрежных шель-

фовых зонах морей и океанов с целью выявления перспективных подводных месторождений нефти и газа. Расширить исследования прибрежных россыпных месторождений золота, олова и других рудных полезных ископаемых»¹.

Поставленные XXIV съездом грандиозные задачи с большим подъемом выполняются отрядом советских геологов и геофизиков, общее число которых выросло с 500 человек в 1917 г. до 115 000 человек в 1972 г. Успешное решение этих задач осуществляется, с одной стороны, все большим усилением технических средств и методов проведения геологоразведочных работ, а с другой — ростом тематических геологических работ, направленных на выяснение условий образования и закономерностей размещения месторождений полезных ископаемых. В этой связи особое значение приобретают исследования, посвященные образованию руд металлов.

Человечество уже с незапамятных времен стремится понять, как возникли руды металлов. Первые научные основы по условиям образования рудных месторождений были разработаны Агриколой еще в XVI в. Металлоносные жилы, по мнению Агриколы, представляли собой «каналы» или отверстия, выполненные веществом, отложенным из подземных вод. Он предполагал, что образование таких «каналов» вызвано воздействием подземных вод на вмещающие породы. Воды же эти, по его данным, были нагреты за счет тепла, выделявшегося при горении угля.

В XVII в. по вопросу об условиях образования руд выступил Декарт. Он пришел к выводу, что земля имеет горячее металлическое ядро, из которого извлекаются рудные вещества в виде испарений — эманаций, отлагающих руды в трещинах каменной породы.

В XVIII в. условия образования руд изучал М. В. Ломоносов. Он пришел к выводу, что все жилы произведены «земным трясением», причину которого он усматривал в вулканических явлениях, обусловленных горением серы (в согласии с существовавшими тогда философскими взглядами).

В конце XVIII и начале XIX в. в Европе возникла ожесточенная полемика по вопросу об условиях форми-

¹ Материалы XXIV съезда КПСС. М., Политиздат, 1971, стр. 252—253.

рования рудных месторождений между немецким ученым Вернером и его последователями, которые получили наименование нептунистов¹, и английским исследователем Хетоном и его школой, называвшихся плутонистами. Первые высказывали мнение, что все рудные жилы образовались нисходящими поверхностными водами, берущими начало из «первобытного» Мирового океана. Последователи школы плутонистов утверждали, что рудные минералы в воде не растворимы и по своему происхождению связаны с глубинными процессами, протекающими в земной коре. Следует отметить, что упомянутый спор продолжался длительное время, но он не закончен для объяснения условий образования некоторых месторождений и в настоящее время. Позднее, в конце XIX и начале XX в. американскими учеными В. Линдгреном, В. Эммонсом, европейцами П. Ниггли, Г. Шнейдерхеном, а также русскими учеными К. И. Богдановичем, В. А. Обручевым, Н. К. Высоцким и другими была разработана теория магматогенного происхождения месторождений. Согласно этой теории источником металлов являются магматические расплавы. Кроме того, упомянутые исследователи выделяли вторую группу месторождений металлов, возникших на земной поверхности в результате разрушения горных пород или руд в коренном залегании и получивших название экзогенных.

В настоящее время все месторождения металлов также разделяют на две группы: эндогенные, включающие ранее упоминавшиеся магматогенные, а также другие минеральные месторождения, связанные с развитием внутренних процессов, протекающих в земле, и экзогенные, формирующиеся на земной поверхности. В связи с широким применением новых методов исследований, появившихся в эпоху научно-технического прогресса, удалось глубже познать многие из тех сложных процессов, которые ведут к формированию руд металлов, и в настоящий период наука о рудных месторождениях значительно больше базируется на данных точных наук, и прежде всего на законах физики, химии, физической химии и механики. Однако ряд важных моментов, связанных с рудообразованием, все еще не нашел окончательного решения. Ниже будут кратко

¹ Здесь и далее разрядку см. Словарь терминов в конце брошюры.

охарактеризованы научные представления об образовании руд как эндогенных, так и экзогенных месторождений и в сжатом виде проанализированы сами процессы, приводящие к их формированию.

ЭНДОГЕННЫЕ РУДНЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

В ЭНДОГЕННЫХ рудных месторождениях в большом количестве содержатся руды черных, цветных, благородных, редких и радиоактивных металлов. Соответственно выяснение вопросов, связанных с условиями их образования, представляет не только важное теоретическое значение, но имеет также прямое отношение к практике геологоразведочных работ. Происхождение же этих месторождений обусловлено целой серией взаимосвязанных и взаимообусловленных процессов и явлений, протекающих в земле. Из них прежде всего требует выяснения источник оруденения, от которого отщепляются соединения различных металлов и формы их переноса от источника оруденения к месту локализации руд. В зоне рудоотложения накапливаются руды металлов, и очень важно выяснить условия, сопутствующие их отложению. Необходимо, кроме того, хотя бы в первом приближении, рассмотреть возможный состав руд месторождений различных генетических типов. Большое значение приобретает также выяснение процессов, протекающих при становлении магматических масс и их дифференциации, обуславливающих формирование магматических, пегматитовых и гидротермальных месторождений. Формирование экзогенных месторождений в процессе выветривания горных пород, движения грунтовых вод и осаждение металлов в прибрежной зоне морей и озер представляют собой вопрос, требующий самостоятельного рассмотрения. То же относится к процессам, приводящим к формированию метаморфогенных месторождений.

Чтобы иметь полное представление о формировании руд, необходимо охарактеризовать и закономерности пространственного размещения, эндогенного и экзогенного оруденения в зависимости от геологического строения рудоносных площадей и истории их геологического развития.

Ниже будут кратко освещены все упомянутые явления и процессы, влияющие на формирование рудных месторождений и обуславливающие закономерности размещения оруденения.

ИСТОЧНИК ОРУДЕНЕНИЯ

ВОПРОС об источнике оруденения оказался спорным, и мнения исследователей существенно разошлись. Большая часть геологов¹ придерживается мнения, что источником металлов для образования эндогенных рудных месторождений являются магматические расплавы. При этом часть руд возникает внутри магматических пород при их остывании. Другая же часть обязана своим происхождением летучим компонентам, отделяющимся от магматических расплавов и проникающих в верхнюю часть земной коры. Некоторые² исследователи считают, что источником металлов для формирования эндогенных месторождений являются сами породы, слагающие земную кору и несущие в своем составе все элементы таблицы Менделеева. По их представлениям, металлы, входящие в состав пород земной коры, извлекаются из них в процессе регионального метаморфизма, вызванного погружением этих пород в области высоких температур и повышенных давлений.

В последнее время многие исследователи³ все больше склоняются к мысли, что источником многих металлов является верхняя мантия.

Рассмотрим подробнее эти точки зрения. С помощью всех имеющихся в настоящее время методов изучения глубинных уровней земли установлено, что она построена следующим образом.

Верхней оболочкой земли является земная кора. Мощность ее на континентах, особенно в горных областях, достигает 60—70 км. Средняя же мощность континентальной коры 30—35 км. В океанах мощность земной коры составляет лишь 6—8 км. Континентальная земная кора состоит из поверхностного слоя осадочных

¹ А. И. Заварицкий, С. С. Смирнов, Г. Д. Афанасьев и др.

² Н. Г. Судовников, В. С. Домарев и др.

³ В. И. Смирнов, В. Э. Поярков, Е. А. Радкевич и др.

пород; под ним гранито-метаморфический слой, в котором скорость распространения продольных сейсмических волн равна 5 м/сек. На глубине 15—20 км (а в некоторых районах на меньших глубинах) скорость продольных волн возрастает до 6—6,5 км/сек. Это возрастание скорости фиксирует поверхность Конрада, которая отделяет гранито-метаморфический слой от залегающего ниже его базальтового. На глубине 35 км (а под горами до 60—70 км) скорость продольных волн резко (скачкообразно) возрастает до 8 км/сек. Это нижняя поверхность земной коры, т. е. поверхность Моховичича (по имени открывшего ее югославского ученого), отделяющая земную кору от залегающей ниже ее мантии. Под океанами земная кора не имеет гранито-метаморфического слоя, и мантия начинается на глубине 6—8 км под базальтовым слоем. На глубине 100—200 км в верхней мантии находится зона, в которой скорость прохождения продольных волн оказывается несколько меньшей по сравнению со скоростью этих же волн, проходящих через вышележащую область. Это так называемая астеносфера, или волновод. Астеносфера представляет собой зону мантии, обладающую большой вязкостью, противостоящей в этом смысле относительно жесткой и хрупкой литосфере, обладающей слоисто-глыбовым строением, которая охватывает земную кору и самые верхние слои мантии. Астеносфера может рассматриваться в качестве вероятной области проявления подкорковых конвекционных течений, зарождения вертикальных и горизонтальных движений литосферы. Вещество, слагающее астеносферу, находится в состоянии, близком к расплавленному. Имеются основания предположить, что это вещество периодически плавится целиком или частично и на значительном пространстве, и, следовательно, магматические очаги, очевидно, в основном зарождаются в зоне астеносферы. Мантия простирается до глубины 2900 км и подразделяется на верхнюю и нижнюю. Под мантией залегает внешнее ядро земли, которое на глубине 5000 км сменяется внутренним ядром земли.

Исследователи, придерживающиеся мнения, что источником металлов являются магматические расплавы, ранее считали, что эти расплавы находятся внутри земной коры, где они образуют магматические очаги. По мере остывания таких очагов возникают

остаточные расплавы, обогащенные летучими веществами, которые и представляют собой источник металлов. Однако уже давно было установлено, что месторождения ряда металлов, таких, как хром, титан, платина, ванадий, никель, частично кобальт и некоторые другие, пространственно тесно связаны с породами, поднявшимися в виде расплавленных масс по разломам из базальтового слоя, а может быть, даже из мантии. Среди этих пород выделяются разновидности, содержащие в своем составе анортит $\text{Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$ и пироксен $[\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})(\text{SiAl})_2\text{O}_6]$, именуемые габбро, либо только пироксен — пироксениты или оливин $(\text{Mg}_2\text{SiO}_4)$ — дуниты. Все эти породы, относящиеся к группе основных (габбро) и ультраосновных (пироксениты и дуниты), возникают в результате кристаллизации магматического расплава, протекающей при температуре 1300—1500°. В составе этих пород большую роль играют рудные минералы — магнетит (Fe_3O_4) , ильменит (FeTiO_3) и др., которые кристаллизуются почти одновременно с упомянутыми выше породообразующими минералами, и поэтому такие месторождения получают название магматических или собственно магматических. Об условиях их образования у исследователей особых разногласий не имеется. При формировании этих месторождений происходит разделение (ликвация) магматического расплава на две жидкости — рудную и силикатную, каждая из них в дальнейшем кристаллизуется отдельно, но руда обычно выделяется в средней, и особенно в донной, части залегающих почти горизонтально магматических тел. Правда, расслоение магматического расплава в отдельных горизонтах разделившихся пород приводит к тому, что рудное вещество кристаллизуется на месте своей ликвации. В этих условиях возникают преимущественно вкрапленные руды. Исследования, проведенные советским ученым В. К. Котульским (1948), показали, что формирование богатых медно-никелевых руд тесно связано с глубинной ликвацией. Другой советский ученый — Я. И. Ольшанский показал, что сульфидный рудный расплав-раствор обладает очень высокой смачиваемостью, и поднятие его в вышележащие горизонты, видимо, связано именно с этим процессом. Образование руд при остывании магматических расплавов может происходить и путем выделения капелек рудного материала между зернами уже затвер-

девших порообразующих минералов. Постепенно такие рудные капельки объединяются в значительные массы, которые при дальнейшем понижении температуры либо застывают на месте и образуют неправильные скопления руд, либо выдавливаются в трещины и здесь затвердевают в виде рудных тел плитообразной формы. Так образуется большая часть месторождений платины, хрома, титана, частично железа и некоторых других металлов, связанных с кристаллизацией основных и ультраосновных пород.

Когда магматический расплав на большой глубине остыл и превратился в кристаллические горные породы, начинают действовать остаточные магматические расплавы, накопившиеся под корой затвердевшей оболочки горных пород и обогащенные летучими компонентами. Благодаря сильному давлению газов эти расплавы проникают по трещинам в застывшие кристаллические породы и в вышележащие толщи и здесь кристаллизуются. Так образуются своеобразные горные породы, сложенные очень крупными кристаллами разных минералов и получившие название пегматитов. Особенно много пегматитов образуется при остывании гранитных магм. Гранитные пегматиты сложены из крупных зерен полевого шпата, кварца и темной слюды. При дальнейшем воздействии летучих веществ на пегматиты в них возникают светлая слюда, а также минералы лития, бериллия, олова, тантала, ниобия и некоторых других редких металлов. Появлением пегматитов заканчивается образование рудных месторождений, связанных непосредственно с кристаллизацией магматического расплава.

В дальнейшем рудные месторождения образуются путем выноса металлических соединений из глубинных частей земной коры в лежащие выше вмещающие толщи. И вот именно в отношении источника металлов для этих месторождений, возникающих из горячих водных растворов и именуемых гидротермальными, мнения ученых разделились. Ряд исследователей придерживаются мнения о генетической связи гидротермального оруденения с крупными массивами гранитных пород, именуемых баголитами. Существует и другая точка зрения, согласно которой оруденение возникает позднее времени кристаллизации упомянутых батолитов. Это второе представление подтверждается тем, что крупные

границные массивы к моменту рудообразования полностью остыли и уже в остывшем состоянии оказались пересеченными более поздними плитообразными телами изверженных пород (дайками), и лишь после этого формировалось гидротермальное оруденение.

Из упомянутого выше второго представления вытекает, что оруденение связано не с гранитными батолитами, а с глубинными магматическими очагами. Этого мнения в настоящее время и придерживается большинство геологов. Однако само понятие глубинный магматический очаг претерпело изменение в связи с новыми данными, полученными геологами, вулканологами и особенно геофизиками. Все эти данные мы охарактеризуем несколько позже, после рассмотрения роли метаморфогенных процессов в рудообразовании.

Впервые идею метаморфогенного рудообразования высказал немецкий ученый Г. Шнейдерхен. Он в основном проанализировал вопрос о возможном метаморфизме (интенсивном изменении под действием высокой температуры и давления) ранее возникших осадочных месторождений. Но вместе с тем он допускал возможность при метаморфизме мобилизации металлов, входящих в состав осадочных пород в кларковых количествах, и рассматривал эти металлы в качестве источника оруденения с последующим его переотложением на расстояние до 200 м от места мобилизации.

Позднее советский ученый Н. Г. Судовиков и другие пришли к выводу, что все эндогенные месторождения возникают в процессе регионального метаморфизма осадочных и других пород, обуславливающего мобилизацию металлов. Они находятся в небольших количествах в этих породах, и перенос их соединений происходит метаморфическими водами в виде минерализованных растворов в зону рудоотложения. Согласно этой точки зрения внедрение магматических расплавов в зону рудоотложения само по себе не приводит к рудообразованию, так как магматические расплавы не являются источником оруденения. Эти расплавы своим температурным воздействием на вмещающие породы лишь усиливают мобилизацию металлов из пород. Их роль в рудообразовании в этом и заключается.

По вопросу о заимствовании из вмещающих пород определенных компонентов, и в том числе металлов,

ряд исследователей¹ высказывают иное представление. Согласно их мнению при просачивании горячих водных растворов из более глубоких горизонтов земной коры в зону рудоотложения такие растворы прежде всего способны заимствовать петрогенные элементы, являющиеся составной частью самих пород, и в частности CaO, MgO, SiO₂ и др. Исследования показывают, что в ряде рудных районов рудоносные растворы заимствовали из вмещающих пород и металлогенные элементы, такие, например, как Zr, Ti, Ni, Co и др.

Однако основным возможным источником металлов, как уже отмечалось выше, очевидно, являются глубинные магматические очаги. О вероятном глубинном нахождении источников магмы можно судить на том основании, что цепи вулканов вытянуты вдоль глубоко проникающих разломов или фокальных зон, которые, судя по глубинному уровню нахождения гипоцентров землетрясений, распространяются от земной поверхности на глубину до 500—750 км, что намного превышает мощность земной коры. Естественно предположить, что при благоприятных соотношениях температуры и давления магма зарождается вдоль фокальных зон на значительной глубине.

Советский вулканолог Е. К. Мархинин (1971) высказывает предположение, что в области Курильской островной дуги зоны магмаобразования находятся под вулканами на глубинах 100—150 км.

При благоприятных условиях они, очевидно, могут переместиться по фокальным зонам в более верхние горизонты земной коры, и именно эти очаги, очевидно, и являются глубинными.

Наряду с этим академиком А. П. Виноградовым (1961) высказана гипотеза, согласно которой дифференциация металлических элементов, находящихся в мантии, подчинена закону зонной плавки.

Естественно возникает вопрос, в каком виде могут выноситься в зону рудоотложения металлы из верхней мантии? Отвечая на этот вопрос, мы прежде всего должны отметить, что в связи с высокой температурой и давлением в верхней мантии не может существовать вода ни в жидком, ни в парообразном состоянии. Соответственно из мантии и глубинных магматических очагов

¹ А. В. Королев, В. Л. Борсуков, Ф. И. Вольфсон и др.

металлы не могут выноситься в виде гидротермальных растворов. Единственное возможное состояние воды на рассматриваемом глубинном уровне — это надкритическое состояние, которое наступает в чистой воде при температуре более 373° , а в минерализованной — при температуре, достигающей 450° и более. В мантии в надкритическом состоянии должно находиться не только некоторое количество воды, но и другие компоненты, и прежде всего углекислота, которые в совокупности образуют однородный гомогенный надкритический раствор, содержащий рудные и солевые компоненты. Такой раствор, именуемый флюидом, очевидно, и выносит металлы из верхней мантии. По мере понижения температуры и давления в процессе проникновения в более высокие горизонты земной коры флюид переходит в гидротермальный раствор.

Возможность поступления из глубин флюидов, сопровождаемых тепловым потоком, переходящих в гидротермальные растворы, вызывающие рудоотложение, можно проиллюстрировать на примере присутствия руд металлов над рифтовыми зонами. Эти зоны представляют собой крупные разломы, проникающие в глубь Земли до мантии. Вдоль некоторых из них проявляются магматические образования, которые по составу тождественны с продуктами, входящими в состав мантии. Рифтовые зоны можно наблюдать на Африканском континенте и в ряде пунктов на дне океанов в пределах подвижных срединных океанических зон. Одна из таких зон находится под Красным морем. Именно на дне Красного моря на глубине 2 тыс. м от поверхности воды обнаружены и разведаны достаточно крупные месторождения свинца, цинка и серебра. Сульфиды этих металлов (соединения металлов с серой) развиты в виде тончайших скоплений в иле, слагающем дно моря, а также в коренных породах, залегающих ниже морского дна. Процесс рудообразования происходил 100 тыс. лет назад. Но следы его проявления можно наблюдать и в настоящее время. Во впадине Красного моря над рифтовой зоной температура воды достигает $+50^{\circ}$. Минерализованные рассолы с повышенной температурой обнаружены и ниже морского дна и илов в уже окаменевших трещиноватых породах. В самой же рифтовой зоне, над которой возникают упомянутые сульфидные руды, установлен глубинный тепловой поток.

В КАКОЙ ЖЕ ФОРМЕ ПЕРЕНОСЯТСЯ МЕТАЛЛЫ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫМИ РАСТВОРАМИ?

ВОПРОС о выяснении состава и состояния гидротермальных растворов сложный, и в течение длительного периода оставался открытым. Вначале ученые предполагали, что в гидротермальных растворах металлы должны находиться в форме растворенных сульфидов. Однако термодинамические расчеты американского ученого Гаррельса (1944) показали, что в слабокислых и слабощелочных растворах, которые можно отождествлять с природными гидротермальными растворами, растворимость сульфидов настолько ничтожна, что для образования одной тонны медной руды требуется такое количество растворов, которое по объему равно Средиземному морю. После этих исследований была высказана гипотеза, что металлы переносятся не в истинных растворах, а в коллоидных высококонцентрированных растворах. Однако и эта гипотеза не нашла подтверждения. Академиком А. Г. Бетехтиным (1955) была выдвинута другая гипотеза, согласно которой металлы переносятся в гидротермальных растворах не в виде растворенных сульфидов, а в форме других соединений и, в частности, хлоридов, которые могут оказаться устойчивыми в сероводородной среде.

Аргументы А. Г. Бетехтина в пользу возможности одновременного присутствия хлоридов металлов и сероводорода базируются на том, что в химических реакциях с образованием сульфидов гидротермального происхождения принимают участие не сероводород (H_2S) как таковой, а продукты его электролитической диссоциации в водных растворах. В свете этой гипотезы осаждение сульфидов из гидротермальных растворов должно происходить не сразу, а по достижении некоторой определенной концентрации в них анионов серы. Приведенные данные позволяют заключить, что растворимость сульфидов в гидротермальных растворах является несколько большей по сравнению с той, которую принимал в своих расчетах Гаррельс. Однако учитывая, что если электролитическая диссоциация сероводорода является крайне незначительной, то и гипотеза А. Г. Бетехтина не устраняет основную трудность в

объяснении возможности переноса металлов в виде хлоридов в присутствии H_2S .

Рассматриваемый сложный вопрос в значительной мере был разрешен Я. И. Ольшанским и В. В. Иваненко (1958), применившими впервые при экспериментальных исследованиях меченые атомы.

Полученные Я. И. Ольшанским и В. В. Иваненко экспериментальные данные о суммарной растворимости серебра в растворе соответствуют данным, полученным при определении концентрации металлов, находящихся в составе газо-жидких включений в рудных минералах. Эти включения представляют собой захваченные при кристаллизации минералов капельки рудоносных растворов. Проведенные исследования показали, что концентрация отдельных металлов в упомянутых включениях колеблется от первых единиц до 20 мг/л, а в некоторых случаях и более.

Эксперименты Я. И. Ольшанского и В. В. Иваненко имели важное значение в решении вопроса об условиях переноса металлов в гидротермальных растворах. В настоящее время почти все исследователи пришли к единому мнению, что металлы переносятся в гидротермальных растворах в виде комплексных соединений. Это подтверждается результатами изучения естественных высокоминерализованных термальных горячих источников полуострова Челекен, выполненных советскими геохимиками Л. М. Лебедевым и Ю. Ю. Бугельским (1967—1968 гг.). Исследования показали, что термальные воды Челекена представляют собой иодо-бромное месторождение и приурочены к крупной антиклинальной складке, которая деформировала молодые раннечетвертичные осадочные породы. Складка эта разбита серией разрывных нарушений, ориентированных преимущественно в северо-восточном направлении продольно по отношению к оси складки и в северо-западном направлении перпендикулярно к ней. Среди этих нарушений выделяются глубинные разрывы, вдоль которых наблюдаются свинцовые и цинковые гидрохимические аномалии. Подземные воды всех водоносных горизонтов Челекена отличаются хлоридным кальциево-натриевым составом. Общая минерализация вод достигает 290 г/л. Содержание иода составляет 258 и брома 450 мг/л. Воды обладают относительно постоянным солевым составом. Гидрохимические исследования показали, что в

водах всех водоносных горизонтов, помимо нода и брома, присутствует ряд других металлов, максимальное содержание которых составляет: свинца — 30, цинка — 30, кадмия — 2,3 и мышьяка — 1 мг/л. Как уже отмечалось, аномальные содержания металлов выявляются вдоль разрывных нарушений. Площадь аномальных содержаний вдоль разрывов северо-западного направления составляет 4 км², а вдоль северо-восточного глубинного разлома 7,5—8 км². В пределах каждого участка максимальную площадь занимают повышенные аномалии цинка. Повышенное содержание металлов устанавливается в водах, нагретых до 70° и выше. Приуроченность аномальных содержаний металлов к высокотемпературным водам указывает на имевшую место разгрузку глубоких металлоносных и водоносных горизонтов по мощным зонам разрывных нарушений. Выпадение рудных компонентов происходит из растворов с повышенным содержанием металлов. В пределах выявленных гидрогеохимических аномалий в скважинах и магистральных трубах отлагаются современные рудные минералы, представленные самородным свинцом и сульфидами железа, цинка и свинца. Свинец накапливается как вблизи устьев скважин, так и на различных глубинах, образуя вместе с песчано-глинистым материалом пробки в стволах скважин. На внутренних стенах буровых труб свинец образует пористые коры толщиной до одного сантиметра. В ряде скважин происходит отложение жильных минералов — кальцита (CaCO₃) и барита (BaSO₄), которые за 1—2 года полностью закупоривают скважину. Подсчеты исследователей показывают, что минерализованные термальные воды Челекена ежегодно выносят свыше 100 т свинца. Не меньшее его количество отлагается ежегодно в эксплуатационных скважинах и магистральных трубах в виде корок, налетов, а иногда и пробок.

Отсюда можно сделать вывод, что челекенские термальные воды являются современными рудоносными гидротермальными растворами, которые в благоприятных условиях за относительно короткий срок могут формировать промышленные свинцово-цинковые месторождения.

В последнее время исследователям термальных вод Челекена удалось подойти к выяснению форм миграции рудных компонентов в этих водах. Подмечено, что сви-

нец и цинк, входящие в состав термальных вод, ведут себя по-разному при взаимодействии металлосодержащих вод с водами верхних горизонтов, обогащенных сероводородом. При смешении этих вод цинк из растворов выпадал в виде сфалерита. В то же время содержание свинца в термальных водах после их смешения с сероводородными водами снизилось с 4,17 до 3,95 мг/л. Галенит лишь в виде ничтожных мельчайших включений был установлен в сфалерите. То, что свинец не выпал из изучаемых вод в виде галенита при смешении металлоносных вод с сероводородными, заставило авторов, изучавших высокоминерализованные воды Челекена, предположить, что свинец в природных рассолах мигрирует не в виде простых положительно заряженных ионов Pb^{2+} , а в виде более сложных соединений или коллоидных форм. Была сделана попытка выделить коллоидную форму миграции свинца с применением анализа. Для этой цели в полупроницаемые мешки из целлофана заливали дистиллированную воду, а весь мешок погружали в исследуемую природную воду, обогащенную металлами. Исследуемую пробу и дистиллированную воду брали в отношении 1,5—2:1. Через 5 дней в растворах внутри мешка и за пределами его определяли свинец. Во всех экспериментах по истечении этого срока концентрации свинца в целлофановом мешке и исходной воде выравнивались. Эти опыты показали, что свинец в термальных водах Челекена мигрирует не в коллоидной форме, а в виде истинных растворов в простых или комплексных ионах. Учитывая данные проведенных экспериментов, авторы пришли к выводу, что свинец в исследуемых водах мигрирует в виде комплексных ионов с небольшим радиусом. По их предположениям, свинец переносится в виде хлоридного комплексного иона типа $PbCl_4^{2-}$. Это предположение в дальнейшем было подтверждено специально проведенными опытами по фильтрации изучаемых термальных вод через ионообменные смолы. Приведенные выше данные по исследованию термальных высокоминерализованных растворов Челекена имеют большое значение для развития учения о рудных месторождениях. Этими исследованиями не только был детально охарактеризован природный гидротермальный рудоносный раствор, но и показана форма переноса металлов в виде комплексных соединений.

ВОЗМОЖНЫЕ УСЛОВИЯ ОТЛОЖЕНИЯ РУД

ПОЧТИ на всех эндогенных месторождениях, кроме собственно магматических, рудные тела залегают в зонах гидротермально-измененных вмещающих пород. Среди них выделяются скарны (железисто-магнезиальные силикаты), возникающие на контакте карбонатных и алюмосиликатных пород; грейзена, формирующиеся в алюмосиликатных породах и сложенные кварцем, слюдой и минералами, содержащими в своем составе летучие соединения (гидроксильную группу ОН, фтор и бор); березиты, возникающие в алюмосиликатных породах и состоящие из кварца, серицита и пирита. Все эти измененные породы по времени формирования возникают задолго до оруденения, либо непосредственно перед процессами отложения руд, либо даже частично сопутствуют процессу рудообразования. Гидротермально-измененные породы, образующиеся задолго до оруденения, чаще всего возникают к концу вулканических извержений в связи с фумарольной деятельностью. В генетическом отношении с вулканизмом оруденение не связано, а руды, возникшие позднее, накладываются на продукты фумарольной деятельности после того, как они под воздействием тектонических усилий оказались раздробленными. Гидротермально-измененные породы, возникшие непосредственно перед оруденением, также обычно по времени отделены от рудоотложения тектоническим перерывом, но время формирования этих измененных пород оказывается близким к рудному процессу. В целом же гидротермально-измененные породы оказываются более благоприятными для оруденения, чем неизменные. Первые из них обладают значительно более высокой эффективной пористостью и более низкими прочностными свойствами по сравнению с породами, не подверженными изменению. Наряду с этим измененные породы обладают более низкими концентрациями водородных ионов по сравнению с неизменными. Все это говорит о том, что гидротермально-измененные породы оказываются хорошо проницаемыми, легко подвергаются тектоническим деформациям и, обладая кислой реакцией, способствуют нейтрализации слабощелочных рудоносных растворов, что, в свою очередь, приводит к разрушению комп-

лексных соединений и выпадению рудных минералов. Сам по себе рудоносный раствор при взаимодействии с окружающими породами вызывает в них лишь незначительные гидротермальные изменения, сопутствующие минерализации. Тем не менее эти взаимодействия имеют особо важное значение, поскольку именно с ними связана кристаллизация рудных минералов и формирование руд. При этом отчетливо наблюдаются два типа таких взаимодействий. Первое из них заключается в том, что рудоотложение сопровождается растворением и замещением окружающих пород рудными и сопровождающими их другими минералами. Процесс, приводящий к этим явлениям, именуется в науке о рудных месторождениях метасоматическим. Выражается он в том, что кристаллизующиеся из растворов минералы замещают объем за объемом вмещающие породы. Данный процесс наглядно можно сравнить со следующим. Представим себе, что мы имеем кирпичную стену, в которой последовательно один за другим изымаются кирпичи, изготовленные из обычной глины, а вместо них вставляются такого же размера и формы золотые кирпичи. В конечном счете вся стена вместо глиняных кирпичей превратится в стену, сложенную золотыми кирпичами. Также в процессе рудообразования пустая порода может превратиться в богатую руду.

Руды, заместившие вмещающие породы, в сущности, и представляют собой приведенные для сравнения золотые кирпичи. При этом важно отметить, что в метасоматических рудах сохраняются форма залегания и внутреннее строение вмещающих пород. В результате агрегаты рудных и сопровождающих их жильных минералов, заместившие тонкослоистые породы, приобретают тонкослоистое строение, а руды, заместившие раздробленные, брекчированные породы, также состоят из обломков руд, сцементированных рудными минералами. Наблюдая такие руды, создается ложное впечатление, что как будто бы сами руды подверглись дроблению. Однако в дальнейшем после более детальных исследований удастся установить, что руды не подвергнуты дроблению, а метасоматически заместили ранее существовавшие раздробленные вмещающие породы. Агрегаты рудных минералов, заместившие ранее существовавшие минеральные образования или окаменелую фауну, приобретают форму и внутреннее строе-

ние, соответствующие этим минеральным образованиям или окаменелой фауне. Унаследование формы замещенных образований вновь образованными минералами получило название в минералогии и науке о рудных месторождениях псевдоморфоз. Наличие таких псевдоморфоз в рудах является важным признаком, позволяющим различать эндогенные месторождения, возникшие в связи с развитием метасоматических процессов. Рудные тела, возникшие путем замещения вмещающих пород, характеризуются, кроме того, сложным очертанием их границ, или зальбандов, с вмещающими породами.

Второй тип взаимодействий растворов с вмещающими породами характеризуется тем, что эти взаимодейст-

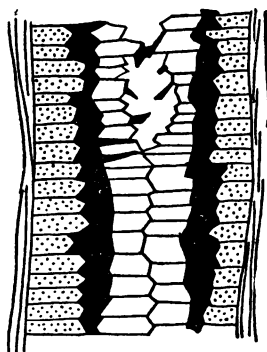


Рис. 1. Друзовое строение рудной жилы. Схема в плане: 1 — вмещающие породы; 2—голубой кварц; 3—сфалерит, 4 — белый кварц; 5 — родохразит ($MnCO_3$).



вия являются не активными и не сопровождаются метасоматическими явлениями, либо последние проявляются очень слабо и выражаются в возникновении маломощных ореолов вкрапленных руд. Кристаллизация рудных и сопровождающих их минералов происходит на стенках полостей трещин. В этом случае первые порции выделившихся минеральных образований нарастают на стенках этих трещин, последующие агрегаты минералов нарастают на первых вплоть до заполнения всей полости. Возникшее при этом рудное тело обладает симметрично-полосчатым, либо друзовым (рис. 1) строением, что позволяет легко отличить его от рудных тел, возникающих метасоматическим путем. В тех случаях, когда рудоотложение протекает не в протяженных по-

лостях, а в пустотах, сохранившихся между обломками пород, агрегаты рудных минералов обычно нарастают на обломках. При этом каждый обломок с каемкой выросшей на него руды очень напоминает кокарду на фуражке военнослужащих. В результате подобные текстуры руд получили название кокардовых. Таким образом, условия отложения руд влияют на пространственное расположение минеральных агрегатов, что и соответствует текстурам руд. Вместе с тем условия отложения руд определяют и их внутреннее строение или структуру. Чаще всего структура руд является зернистой. Однако в тех случаях, когда отложение руд происходит из коллоидных растворов, которые обычно возникают перед самым рудоотложением в связи с пересыщением последних, руды также приобретают коллоидную структуру, которая чаще всего оказывается концентрически скорлуповатой.

В зависимости от того, возникает ли эндогенное оруденение путем метасоматического замещения вмещающих пород или выполнением открытых пустот, возникает различная форма рудных тел. В первом случае часто образуются линзы, пластообразные или седловидные (рис. 2) залежи, либо более сложные по форме рудные тела. К ним, например, относятся штоки, представляющие изометрические тела, сложенные богатыми рудами, гнездообразные залежи (рис. 3) и трубообразные тела

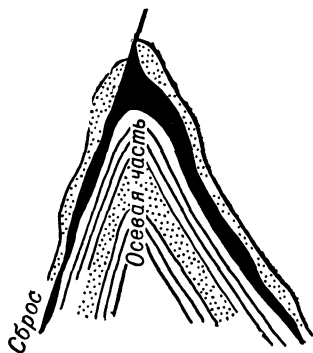


Рис. 2. Седловидная кварцево-золоторудная залежь в слонстых породах, смятых в антиклинальную складку (разрез),

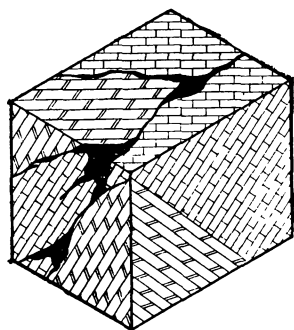


Рис. 3. Гнездообразные залежи свинцово-цинковых сульфидных руд в карбонатных породах (блок-диаграмма),

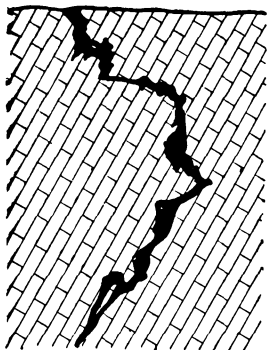


Рис. 4. Трубообразное тело мышьяково-свинцово-цинковых сульфидных руд в известняках (разрез).

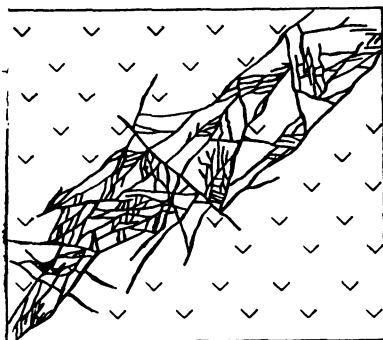


Рис. 5. Штокверковая зона медных сульфидных руд в вулканогенных породах (в плане).

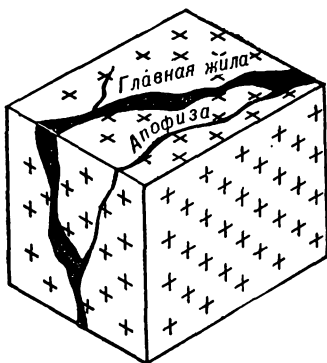


Рис. 6. Трещинная кварц-золоторудная жила с апофизами в гранитах (блок-диаграмма).

(рис. 4). При условии одновременного проявления метасоматических процессов и выполнения пустот часто возникают штокверки, представляющие собой прожилково-вкрапленные руды, сформировавшиеся в достаточно большом массиве раздробленных пород, часто обладающих изометрической формой, либо вытянутые вдоль зон дробления и именуемые штокверковыми зонами (рис. 5). Рудные тела, возникшие путем выполнения полостей трещин, называются трещинными жилами, простыми в случае развития одиночной жилы (рис. 6), либо сложными, когда образована серия па-

раллельных жил (рис. 7). В пределах рудных жил часто образуются обогащенные участки или рудные столбы. Они возникают в районах искривления рудоносного разрыва, пересечения минеральной жилы дорудными трещинами другого направления либо в местах пересечения жилой породы, благоприятных для рудоотложения.

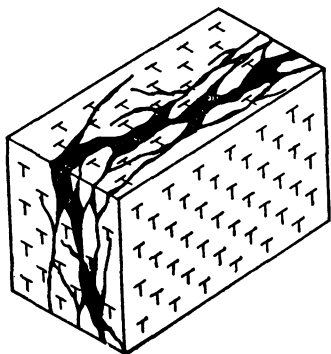


Рис. 7. Сложная кварц-золото-серебряная жила в вулканогенных породах (блок-диаграмма).

Изучая рудные жилы, имеющие плитообразную форму, следует учесть, что не всегда они возникают только путем выполнения открытых пустот. В тех случаях когда зона дробления ограничена с двух сторон плоскостями трещин, сопровождающихся тектонической глиной, она может оказаться целиком замещенной рудными минералами, проникновение которых в сторону нераздробленных пород ограничивалось упомянутой глиной. В этом случае возникнет плитообразное рудное тело с четкими границами (зальбандами), которое возникло не путем выполнения пустот, а метасоматически.

Руды эндогенных месторождений обычно обладают сложным составом и слагаются несколькими минеральными ассоциациями. Одни из них сформировались в близких физико-химических условиях и являются **парагенетическими минеральными ассоциациями**, другие же возникли при резко различной концентрации растворов и при разных температурах, а иногда и давлении. При этом минеральные ассоциации часто образуются в различное время. Те из них, которые возникли позднее, пересекают более ранние. Период времени, в течение которого в близких физико-химических условиях кристаллизовалась одна или несколько парагенетических мине-

ральных ассоциаций, именуется стадией минерализации. Каждая из стадий отделена от предыдущих и последующих тектоническим перерывом. Руды многих месторождений часто слагаются совокупностью минеральных ассоциаций разных стадий. Детальное изучение ряда рудных полей и месторождений в то же время показывает, что каждая из проявленных стадий минерализации получает развитие не во всех рудных телах и не во всех частях каждого из них. В их пространственном размещении нередко наблюдается вертикальная и горизонтальная зональность. Она выражается в том, что во многих случаях продукты более поздних стадий развиты на флангах и в верхних частях рудных тел, сложенных минералами ранних стадий. В других же случаях ассоциации минералов различных стадий пространственно разобщены и развиты в разных рудных телах.

Ранее предполагали, что зональность оруденения гидротермальных месторождений возникает в связи с последовательным выпадением минералов из единого потока растворов, выделяющихся остывающими массивами изверженных пород. Этим объяснялось наблюдаемое закономерное размещение отдельных зон, включающих определенный список минералов по отношению к упомянутым массивам.

Руды олова, вольфрама и молибдена, согласно излагаемой точки зрения, в основном накапливаются внутри массивов изверженных пород; по периферии в породах, прорванных этими массивами, развиваются минеральные ассоциации, образующие руды раннего золота, меди, цинка и свинца, а на максимальном удалении от рассматриваемых массивов находятся минеральные ассоциации, имеющие в составе серебро, ассоциирующее с поздним низкотемпературным золотом, а также руды сурьмы, ртути и некоторых других минеральных образований. Академик С. С. Смирнов (1955) показал, что отмеченная выше зональность полностью почти никогда не проявляется. Чаще всего наблюдаются одна-две зоны, проявленные как по горизонтали, так и по вертикали. Анализируя имеющиеся данные, этот исследователь пришел к выводу, что зональность эндогенного оруденения обусловлена прерывистым (пульсационным) поступлением порций растворов разного состава на фоне вспышек трещинообразования. В процессе кристаллизации каждой из таких порций растворов возникают

минеральные ассоциации соответствующей стадии минерализации, которые выполняют раскрывшуюся часть рудоносной трещины. Этим и объясняется зональность оруденения, наблюдаемая в рудных телах и месторождениях. Дальнейшими исследованиями¹ эти идеи С. С. Смирнова были подтверждены и получили развитие. В настоящее время установлено, что зональность оруденения развита не только в рудных телах и месторождениях, но также в рудных полях, районах и рудоносных провинциях. Отдельные рудные зоны располагаются не только вокруг массивов изверженных пород, но следуют также крупным разрывным нарушениям, а иногда и складчатым сооружениям и, располагаясь преимущественно параллельно одна относительно другой, вытягиваются вдоль этих нарушений. В результате в рудоносных провинциях возникают рудные пояса, которые можно проследить на сотни километров. В пределах каждого такого пояса находится серия месторождений металлов, например, олова и вольфрама, свинца и цинка, золота и др. Отдельные рудные пояса чаще всего приурочены к самостоятельным тектоническим блокам, имеющим различную историю геологического развития. Учет выявленных закономерностей приуроченности оруденения ряда металлов к соответствующим рудным поясам способствовал открытию многих промышленных рудных месторождений.

РУДООБРАЗОВАНИЕ КАК ЕСТЕСТВЕННЫЙ ПРОЦЕСС ГЕОЛОГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ

РАЗВИТИЕ земной коры складывается из проявления различных эндогенных и экзогенных процессов. К первым из них относятся собственно магматические, пегматитовые, контактово-метасоматические и гидротермальные процессы. Экзогенные процессы включают развитие кор выветривания и связанных с ними остаточных инфильтрационных и осадочных, а также возникающих за счет изменения последних метаморфогенных месторождений.

¹ Д. И. Щербакова, А. В. Королева, Ю. А. Билибина, В. И. Смирнова, Е. А. Радкевич и др.

ЭНДОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ

СОБСТВЕННО МАГМАТИЧЕСКИЕ. С развитием магматических процессов связано возникновение разнообразных, нередко крупных месторождений ряда металлов. Образуются эти месторождения в различные этапы становления магматических масс, причем в зависимости от состава последних существенно меняется состав руд интересующих нас месторождений. Как уже упоминалось ранее, наиболее тугоплавкими являются основные и ультраосновные породы. Они слагаются плагиоклазом и цветным минералом или даже только цветным минералом — пироксеном, роговой обманкой или оливином. В процессе кристаллизации этих пород в них в виде вкрапленности или отдельных скоплений концентрируются рудные минералы. Из таких минералов, возникших в начале кристаллизации магматических расплавов, промышленное значение имеет лишь один алмаз, который входит в состав своеобразных пород, именуемых кимберлитами, поднимающимися из глубинных частей земной коры по ее разрывам в результате извержений. Накопление ряда металлов происходит при дальнейшем развитии магматических процессов в позднемагматическую стадию, в период которой происходит кристаллизация рудных минералов. При этом имеет место либо полное разделение магматического расплава на две фракции — рудную и силикатную в связи с явлениями ликвации, либо рудной фракцией обогащается остаточный силикатный расплав. В дальнейшем рудная составляющая часть кристаллизуется на месте своего отделения либо внедряется в трещины, где и остывает в форме жильных тел. В эту позднемагматическую стадию в связи с остыванием ультраосновных пород возникают месторождения хрома, представленные хромитами $[(\text{Fe}, \text{Mg})\text{OCr}_2\text{O}_3]$, платиной и металлами ее группы (палладий, осмий, иридий и др.). В связи с кристаллизацией основных пород возникают месторождения титано-магнетитов $[\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{FeTiO}_3]$, ассоциирующие иногда с минералами фосфора и меди, а также медно-никелевых руд, состоящих главным образом из пирротина $[(\text{Fe}_n\text{S}_{n+1})]$, пентландита $[(\text{FeNi})_7\text{S}_8]$ и халькопирита (CuFeS_2) . В составе этих руд содержится еще некоторое количество кобальта, входящего в пентландит, а также платины и металлов ее группы. В процессе кри-

сталлизации щелочных пород — нефелиновых сиенитов (порода, отличающаяся повышенным содержанием натрия, входящего в состав не только полевых шпатов, но и цветных минералов) частично в ранний, но преимущественно в поздний этап происходит накопление минералов, содержащих в своем составе цирконий (эвдиалит), ниобий и редкие земли (лопарит). Однако эвдиалит промышленного значения не имеет и лишь после его окисления в субтропических условиях в бадделейт ZrO_2 возникает циркониевая руда¹. В связи с остыванием кислых гранитных пород в ранний и поздний магматический этап рудные месторождения промышленного значения не возникают.

Пегматитовый процесс связан с накоплением в остаточных магматических расплавах летучих веществ. Такие расплавы, внедряясь по разрывным нарушениям в верхние части земной коры, обычно остывают в условиях проявления эвтектики, возникающей в гранитных магмах из смеси расплава (74% калиевого полевого шпата и 26% кварца), и при этом образуется порода, именуемая пегматитом или еврейским камнем. В дальнейшем имеет место замещение полевого шпата слюдой и другими минералами. А. Е. Ферсман (1940) высказал мнение, что процессы замещения в пегматитах вызваны летучими компонентами и минерализаторами, находящимися в самом пегматитовом расплаве, таким образом, минерализация пегматитов происходит в закрытой системе без поступления летучих извне. А. Н. Заварицкий (1944) придерживался другого мнения. Согласно его данным минерализация пегматитов происходит в условиях открытой системы за счет растворов, поступающих из магматического очага по трещинам после того, как сами пегматиты, сложенные только породообразующими минералами, в результате тектонических явлений будут подвержены дроблению и в них возникнут трещины. Эти точки зрения об условиях образования пегматитов дискутируются и в настоящее время.

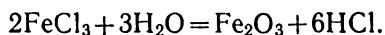
В гранитных пегматитах концентрируются минералы различных редких металлов и, в частности, лития (сподумен — $LiAl[Si_2O_6]$), бериллия (берилл — $Be_3Al_2[Si_6O_{18}]$),

¹ Основная масса циркония добывается из минерала циркона ($ZrSiO_4$), который в виде небольшой примеси входит в состав различных пород и накапливается в россыпях.

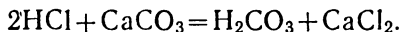
тантала (танталит — $(\text{Fe}, \text{Mn})(\text{Ta}, \text{Nb})_2\text{O}_6$), ниобия (колумбит — $(\text{Fe}, \text{Mn})(\text{NbTa}_2\text{O}_6)$), цезия (поллуцит — $\text{CsAlSi}_2\text{O}_6$), частично олова (касситерит — SnO_2) и некоторых других металлов — Y, TR, Zr, Th, U и др. В пегматитах концентрируются промышленные пластины слюд — мусковита и биотита — и собственно гранитные пегматиты, сложенные кварцем и калиевым полевым шпатом и представляют собой керамическое сырье.

Контактово-метасоматические процессы протекают в области контакта кристаллических изверженных пород с вмещающими карбонатными толщами, в которые они внедрились. В связи с температурным воздействием на вмещающие породы магматических расплавов последние вызывают контактовый метаморфизм, приводящий к замещению карбонатных пород, в контакте их с алюмосиликатными, кальций-магний-алюминий-железистыми силикатами, или скарнами, сложенными гранатом, пироксеном, везувитом и некоторыми другими минералами.

Ранее предполагалось, что контактово-метасоматические процессы, приводящие к формированию скарнов и связанных с ними руд металлов, возникают в ранние стадии остывания магматического расплава, из которого металлы выносятся в виде галлоидных соединений при взаимодействии с карбонатами. Рудные минералы при этом образуются по следующей схеме:



При этом соляная кислота нейтрализуется карбонатом



А. Н. Заварицкий на примере изучения контактово-метасоматических железных руд горы Магнитной доказал, что скарны и связанные с ними магнетитовые руды возникают не в момент проникновения магматического расплава во вмещающие породы, а позднее, после внедрения даек основных пород, когда массы внедрившегося магматического расплава закристаллизовались и оказались пересеченными разрывными нарушениями, в которые и внедрились упомянутые дайки.

Исследования других отечественных геологов пока-

зали, что в момент внедрения магматического расплава скарны также возникают, и в этом отношении подтверждается мнение исследователей, высказавшихся по данному вопросу ранее. Но в магматическую стадию возникают лишь магнезиальные скарны в условиях воздействия магматического расплава на доломиты $[(Ca, Mg)CO_3]$, и при этом формируются лишь месторождения минералов бора и частично магнетитов. Ранее же предполагалось, что в магматическую стадию возникают все скарновые месторождения, включая известковые скарны, которые в действительности в это время не образуются. Известковые скарны, по данным Д. С. Коржинского, возникают на контакте карбонатных и алюмосиликатных пород любого состава (гранитоидов, эффузивов, сланцев, аркозовых песчаников и др.), вдоль которого проникают горячие минерализованные растворы. При этом происходит встречная диффузия главных компонентов входящих в состав пород. Окись кальция (CaO) диффундирует из карбонатных пород в сторону силикатных, а кремнезем (SiO_2) и окись алюминия (Al_2O_3) — со стороны алюмосиликатных в сторону карбонатных. При взаимодействии всех этих компонентов и возникают скарны. Металлические же компоненты, соединения которых приносятся в зону рудоотложения растворами из глубин, связываются в рудные минералы, образующиеся путем замещения ранее возникших скарнов.

Скарны, с которыми в контактово-метасоматических месторождениях ассоциируют руды, относятся к группе известковых и концентрируют в своем составе разнообразные месторождения железных магнетитовых руд, а также месторождения вольфрама (шеелит — $CaWO_4$), меди (халькопирит — $CuFeS_2$), свинца, цинка и некоторых других металлов.

Гидротермальные процессы протекают при различных температурах — высоких ($300—500^\circ C$), средних ($200—300^\circ C$) и низких ($75—200^\circ C$). С этими процессами связано формирование подавляющего большинства, а в некоторых случаях практически всех месторождений цветных (свинца, цинка, меди, сурьмы, олова), благородных (золота и серебра), редких (никеля, кобальта, вольфрама, молибдена, ртути, бериллия, висмута, селена, теллура, кадмия, галлия, германия, скандия, рения и др.) и радиоактивных металлов (урана и тория).

Высокотемпературные гидротермальные растворы в самом начале обладают щелочной реакцией, затем они приобретают кислую реакцию и, воздействуя на вмещающие породы, изменяют их. Этому процессу обычно подвержены полевые шпаты, разлагающиеся на слюду и кварц. Как уже упоминалось, возникающая при этом порода именуется грейзеном. Рудные минералы олова (касситерит — SnO_2), вольфрама (вольфрамит — FeMnWO_4), молибдена (молибденит — MoS_2) в небольшом количестве выделяются в конце формирования грейзенов, но в главной своей массе отлагаются в кварце, заполняющем трещины. В высокотемпературных условиях формируется, кроме того, часть бериллиевых месторождений. Главная же их масса образуется в слюдяных грейзенах с флюоритом, преимущественно в карбонатных породах. В подобной обстановке формируются и некоторые золоторудные месторождения, представляющие кварцево-турмалиновыми жилами, содержащими в своем составе небольшое количество сульфидов.

Наибольшее количество месторождений различных металлов возникает в связи с проявлением среднетемпературных гидротермальных процессов. Ранние порции гидротермальных растворов, воздействуя на алюмосиликатные породы, подвергают их березитизации, характеризующейся замещением полевых шпатов кварцем и серицитом (мелкочешуйчатая слюдка) и выделением вкрапленности пирита. Отложение рудных минералов происходит среди березитов, обладающих повышенной пористостью и легко подвергающихся дроблению. Поэтому в березитах обычно возникают прожилково-вкрапленные либо сплошные руды. В подавляющем большинстве случаев они представлены сульфидами (соединениями металла с серой) либо сульфосолями (соединения металлов с серой, сурьмой или мышьяком), тесно связанными с кварцем (SiO_2), кальцитом, доломитом, сидеритом (FeCO_3) или баритом. В самородном состоянии среди рудных минералов бывает только золото и висмут. Они обычно встречаются вместе с кварцем и реже с сульфидами. Из сульфидов в рудах рассматриваемых среднетемпературных месторождений часто встречается пирит (FeS_2), сфалерит, халькопирит (CuFeS_2), галенит. В зависимости от относительного распространения тех или иных минералов образуются либо полиметаллические, либо свинцово-цинковые или

медные руды. Все эти минералы содержат в своем составе редкие и рассеянные элементы (Se, Te, Ge, Ga, Tl, Bi, Sb и др.). Особенно богат редкими элементами сфалерит, в составе которого находятся кадмий, индий и др. Свинец и медь в небольших количествах представлены своими сульфосолями—буланжеритом ($Pb_5Sb_4S_{11}$), тетраэдритом (Cu_3SbS_3), энаргитом (Cu_3AsS_4). Серебро и особенно олово редко образуют простые сульфиды—аргентит (Ag_2S) и герцбергит (SnS), чаще они концентрируются в сульфосолях—прустите (Ag_3AsS_3), пираргирите (Ag_3SbS_3), франкенте ($Pb_5Sn_3Sb_2S_{14}$), цилиндриците ($Pb_3Sn_4Sb_2S_{14}$), станнине (Cu_2FeSnS_4) и др. Сульфосоли образуются в относительно более близкповерхностных условиях при более высоком кислородном потенциале по сравнению с сульфидами. Сульфосоли также содержат в своем составе отмеченные выше редкие элементы и, в частности, таллий, селен, теллур и др.

Помимо упомянутых ранее минералов, в некоторых среднетемпературных месторождениях получают развитие арсениды никеля и кобальта, которые имеют в своем составе как собственно арсениды-никелин ($NiAs$), так и диарсениды-леллингит ($FeAs_2$), саффорит ($CoAs_2$), раммельсбергит ($NiAs_2$), триарсениды—скуттерудит ($CoAs_3$), хлоантит (Co, Ni) As_3 и шмальтин (Ni, Co) As_{3-2} , а также герсдорфит ($NiAsS$). Все эти минеральные образования часто ассоциируют с самородным серебром либо его минералами.

В средне- и низкотемпературных условиях при температуре 180—210° возникает основной промышленный урановый минерал (урановая смолка— UO_2), а также сидерит и магнезит ($MgCO_3$), образующие промышленные концентрации железа и магния. Низкотемпературные гидротермальные процессы приводят к формированию месторождений сурьмы (ангимонит— Sb_2S_3), ртути (киноварь— HgS), урана, свинца, цинка, меди, золота и серебра.

ЭКЗОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ

ЭКЗОГЕННЫЕ процессы также приводят к формированию промышленных рудных месторождений. В этом отношении большое значение имеют процессы, приводящие к образованию кор выветрива-

ния и связанных с ними рудных месторождений. В условиях жаркого тропического климата происходит латеритовое выветривание основных, кислых (гранитоидов) и других пород, приводящее к накоплению железа в виде гидроокислов — лимонит ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), гидроокислов алюминия — бокситов, состоящих из гидраргиллита (гиббсита) ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), либо бемита или диаспора ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$), содержащих в виде примеси окислы железа и другие компоненты, а также окислов и гидроокислов марганца — пиролюзит (MnO_2), псиломеланвад ($\text{MnO} \cdot \text{MnO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$). В процессе латеритового выветривания ультраосновных пород за счет разложения оливина (Mg_2SiO_4), в состав которого в виде изоморфной примеси к магнезию входит никель, происходит накопление никеля и частично кобальта. Это вызвано тем, что никель изоморфно замещает магний в оливине. При выветривании же этого минерала магний выносятся поверхностными водными растворами на глубину 5—10 м и образует соединение — магнезит (MgCO_3). В результате выщелачивания магнезия продукты коры выветривания все больше и больше обогащаются никелем. Он поглощается глинами либо образует самостоятельный минерал, именуемый гарниеритом ($\text{Ni}_4[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$). Кобальт концентрируется в гидроокислах марганца, образуя асболан ($m(\text{CO}, \text{Ni})\text{O} \cdot \text{MnO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$). В тех случаях когда подвергшийся латеритовому выветриванию массив ультраосновных пород находится в контакте с известняками, минералы никеля и кобальта образуют повышенные концентрации. Отечественные ученые В. Р. Вильямс, Б. Б. Полюнов, К. Д. Глинка и И. И. Гинзбург провели важные исследования для выяснения условий формирования кор выветривания и существенно обогатили науку об экзогенных месторождениях. Согласно полученным ими данным формирование кор выветривания происходит в условиях не слишком резкого рельефа, иначе по мере накопления определенных минералов в коре выветривания они будут подвергнуты разрушению (денудации).

Коры выветривания обычно характеризуются развитием нескольких зон, которые сменяют друг друга. Совокупность зон кор выветривания образует профиль выветривания. Мощность отдельных зон, входящих в профиль выветривания, зависит от различных причин — от состава материнских пород, их текстуры, тек-

тонического строения, рельефа, а также от длительности отдельных стадий выветривания, от климатических условий и др.

При выветривании ультраосновных пород, широко распространенных, в частности, на Среднем и Южном Урале, наиболее часто коры выветривания возникают на относительно большой площади (площадной тип выветривания). В этом случае в повышенных частях рельефа накапливается кремнезем в виде опала и халцедона, сменяющихся с глубиной выщелаченными серпентинитами, местами включающими скопления магнетита. На склонах возвышенностей накапливается никель, частично поглощенный глинами, а частично в виде минерала гарниерита. В пониженных частях рельефа никелевые руды концентрируются совместно с охристыми железными рудами. Помимо площадного типа выветривания проявляются иногда линейный и карстовый типы выветривания. В первом из них силикаты никеля и обогащенные никелем глины вытягиваются вдоль разрывных нарушений и распространяются на глубину 100—150 м. Наиболее богатые никелевые руды накапливаются также в пещерах (карстах) среди известняков, перекрытых сверху серпентинитами. В этом случае возникают месторождения, относящиеся к карстовому типу выветривания. Во всех рассмотренных типах месторождений кроме никеля концентрируется также некоторое количество кобальтовых руд, в которых кобальт тесно связан с окислами марганца. При латеритовом выветривании кислых и щелочных пород, а в некоторых случаях (как это имеет место в Индии и Австралии) базальтов, образуются скопления бокситов. При глинистом выветривании, когда кремнезем не выносится из верхней части коры, формируются скопления каолинов.

Коры выветривания образуются в результате выветривания не только пород, но и полезных ископаемых, сформированных в условиях проявления эндогенных или других процессов. Особенно интенсивно выветриваются сульфидные месторождения, которые вблизи поверхности земной коры подвергаются окислению с образованием так называемых железных шляп. В изучение процесса формирования зон окисления большой вклад внесли советские ученые — С. С. Смирнов, Ф. В. Чухров и другие. Развитию процесса окисления сульфидных месторождений способствуют как регио-

нальные, так и локальные факторы. К первым относятся климат, состав грунтовых вод данного района, строение рельефа. К локальным факторам могут быть отнесены минеральный состав месторождений, трещиноватость вмещающих пород и их состав, угол падения рудного тела. Процессы выветривания, приводящие к образованию зон окисления, наиболее интенсивно происходят в областях влажного и жаркого климата и очень слабо протекают в северных районах и особенно в районах вечной мерзлоты, а также в высокогорных районах, где интенсивно протекают процессы эрозии. Из локальных факторов особое значение имеет наличие в рудах пирита, в результате окисления которого образуется сульфат окиси железа, являющийся сильным окислителем.

В процессе выветривания образуется вторичная зональность в окислившейся части сульфидных месторождений. Эта зональность выражается в развитии зон окисления, выщелачивания и вторичного сульфидного обогащения. Все сульфиды при окислении проходят сульфатную стадию. В связи с этим металлы, сульфаты которых являются легкорастворимыми (например, $ZnSO_4$, $CuSO_4$ или Ag_2SO_4), могут выщелачиваться из зоны выветривания и в кислой обстановке, возникающей в связи с повышенным содержанием пирита в первичных рудах, железная шляпа может оказаться полностью освобожденной от этих металлов. Если выветривание происходит среди карбонатных вмещающих пород, то образующиеся за счет сульфидов сульфаты вступают в реакции с карбонатами и в результате их химических взаимодействий возникают новые минералы, например смитсонит ($ZnCO_3$), который на некоторых месторождениях образует значительные скопления среди известняков, залегающие вблизи окисляющихся сульфидных рудных тел. Вторичные сульфиды, возникающие обычно вблизи уровня грунтовых вод, развиваются в рудных телах, включающих минералы тех металлов, у которых первичные сульфиды являются наиболее трудно растворимыми в воде. К таким металлам относятся ртуть, медь, кадмий, серебро и др. При этом формирование их происходит по следующей реакции:

$$CuSO_4 + ZnS = CuS + ZnSO_4; \quad CdSO_4 + ZnS = CdS + ZnSO_4.$$

В соответствии с этим вторичная зональность лучше всего проявляется у медных и серебряных месторождений. Она выражается в появлении приповерхностного

слоя, сменяющегося с глубиной следующими зонами: окисленного обогащения, выщелачивания, вторичного сульфидного обогащения и первичных руд. У свинцово-цинковых месторождений зона окисного обогащения обычно обедняется цинком, который, как уже упоминалось, может выноситься в виде сульфата из зоны окисления и концентрироваться вблизи основного рудного тела в виде смитсонита. Зона вторичных сульфидов приобретает особенно большое практическое значение в прожилково-вкрапленных медных месторождениях, где она обычно имеет мощность 50—100 м. По сравнению с первичными рудами содержание меди в этой зоне увеличивается в 2—3 раза.

В результате окисления сульфидов в приповерхностном слое наблюдаются сетчатые лимониты, текстура которых для разных сульфидов неодинакова. Исследуя эти лимониты, нередко можно восстановить первичный состав руд и рационально направить разведочные работы на основании изучения одних только выходов месторождений.

Инфильтрационные процессы. Инфильтрационные процессы приводят к концентрации руд в тех случаях, когда имеет место обогащение вод, попадающих в подземную циркуляцию, определенными компонентами, замещенными при сложном химическом выветривании из горных пород или сульфидных месторождений. В зоне восстановления вблизи уровня грунтовых вод обычно происходит выпадение из этих поверхностных растворов различных минералов; новообразования возникают обычно метасоматическим путем. Однако нередко эти минералы заполняют открытые пустоты, и прежде всего карсты в известняках и некоторых других породах. В этих условиях могут концентрироваться руды железа в виде различных гидроокислов, фосфор в виде фосфоритов, урано-ванадаты, силикаты никеля, а также вторичные сульфиды различных металлов, и прежде всего меди.

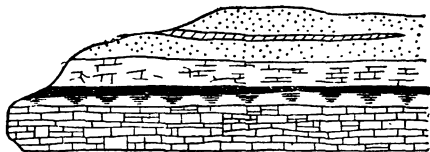
Осадочные процессы. Месторождения, образованные этими процессами, имеют широкое распространение. Они включают механические (россыпи), химические и биомеханические осадки, условия образования которых детально изучены советскими учеными, и прежде всего А. Д. Архангельским, А. Г. Бетехтиным, Ю. А. Билибинным, Н. М. Страховым и другими.

Образование механических осадков, или россыпей, связано с проявлением двух стадий процесса: а) механического разрушения и распада рудных жил и б) концентрации полезных минералов в россыпях текущими водами или воздухом.

Россыпные месторождения, возникающие в долинах рек, именуется аллювиальными. Среди них выделяют долинные, залегающие в основании речных отложений на коренных породах, террасовые, сохранившиеся на поднятых бортах рек, а также русловые и косовые, обнажающиеся на поверхности в самом русле или на косах рек. Кроме того, имеют развитие морские и озерные береговые и лагунные россыпи, а также эоловые, связанные с действием ветра.

Химические осадки в водных бассейнах могут образовываться испарением растворителя либо коагуляцией коллоидов в связи с присутствием в растворах электролитов. К химическим осадкам относятся различные соли, гипс, некоторые карбонатные породы, а также руды железа, марганца, алюминия и некоторых других металлов. Выяснение условий образования рудных месторождений осадочного происхождения требует решения вопросов, касающихся возможных источников концентрации данного металла в процессе сложного химического выветривания горных пород, способа переноса металлов в водные бассейны и способа отложения руд в этих бассейнах. Источниками концентрации металлов принято считать массивы горных пород, подвергнутые латеритовому выветриванию.

Рис. 8 Пластовая форма залегания марганцевых руд в слоистых осадочных породах (разрез).



До последнего времени предполагали, что металлы (железо, алюминий и др.) переносятся в водные бассейны реками в виде водных окисей, предохраненных от коагуляции гумусовыми кислотами. В настоящее время

мя мнения по этому вопросу изменились. Исследования показали, что реки не могут переносить на далекие расстояния водные окиси, которые обязательно будут свертываться в виде минеральных образований. Имеются данные, указывающие, что железо переносится растворами, входящими в состав вод мелких потоков и текущими по равнинам, подвергающимся латеритовому выветриванию: обогащенные железом подземные воды могут выносить его соединения прямо в морские бассейны. Среди осадочных железных руд следует различать бурожелезняковые руды, сложенные гидроокислами железа, карбонатные, состоящие из сидерита, алюмосиликатные, в которых железо связано с кремнеземом, алюминием и другими компонентами. Осадочные руды марганца отлагаются в мелководных бассейнах в форме пластов (рис. 8). Ближе к берегу образуются первично-окисные руды, которые сменяются в более глубоких частях бассейна карбонатными, содержащими повышенное качество фосфора, в свою очередь, сменяющимися кремнистыми образованиями.

А. Д. Архангельский (1933) в противовес некоторым иностранным исследователям впервые доказал возможное происхождение бокситов в условиях морского осадконакопления, между тем как до этого полагали, что бокситы образуются только на суше, на выходах горных пород, подвергающихся сложному латеритовому химическому выветриванию.

Метаморфогенные процессы. Месторождения, образующиеся в процессе метаморфизма пород, либо ранее сформированных рудных тел, относят к метаморфогенным. При этом метаморфизм приводит к изменению химического состава минералов, выражающемуся в потере воды, либо к более сложным преобразованиям. В тех же случаях когда метаморфизм вызывает лишь перекристаллизацию руды и изменение ее структуры и текстуры, но не приводит к появлению новых минералов, месторождения относят к группе метаморфизованных. К последним принадлежат разнообразные сульфидные месторождения, и прежде всего колчеданные. В метаморфических месторождениях происходят сложные преобразования, приводящие к появлению новых минеральных образований. Наибольшее практическое значение имеют метаморфические месторождения железных руд в железистых кварцитах, в которых развиты тонкие про-

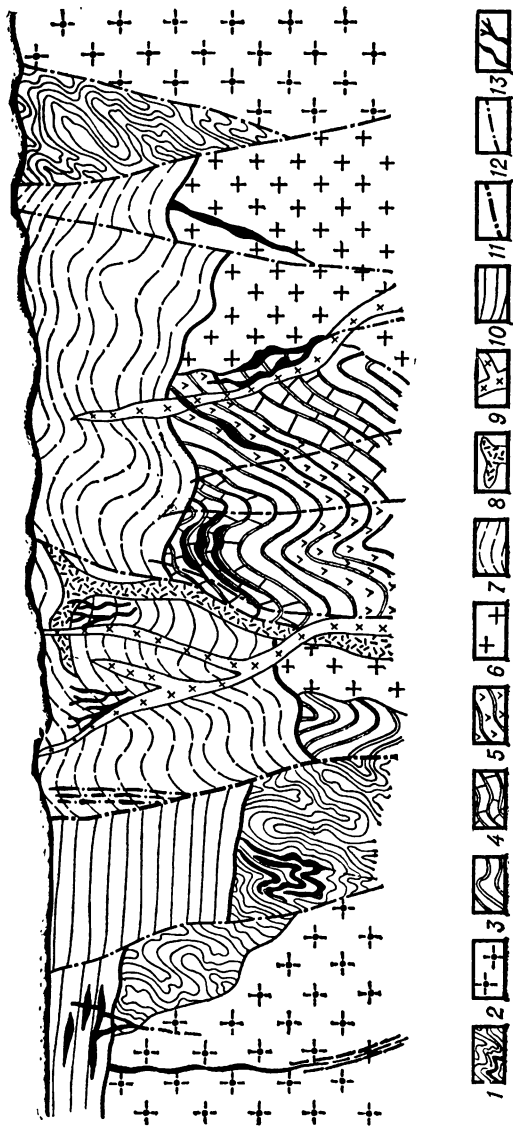


Рис. 9 Размещение гидротермальных месторождений в нижнем и верхнем ярусах среднего структурного этажа (правая часть), а также в нижнем и верхнем структурном этажах (левая часть рисунка) в период рудообразования: 1 — метаморфические породы фундамента; 2 — гранитоиды фундамента; 3 — слонстые образования нижнего яруса среднего структурного этажа, в том числе 4 — доломиты и известняки; 5 — эффузивные породы спилито-кератофровой формации; 6 — гранитоиды того же яруса; 7 —

слонстые слабометаморфизованные образования верхнего структурного яруса среднего этажа (конгломераты, брекчии, глинистые сланцы, эффузивы); 8 — вулканические аппараты; 9 — штоки и дайки малых интрузий; 10 — слонстые образования верхнего структурного этажа; 11 — крупные разломы фундамента, отделяющие складчатые системы от платформ; 12 — другие разломы; 13 — рудные тела гидротермальных месторождений.

слойки магнетита (Fe_3O_4), гематита (Fe_2O_3) и гидрогематита ($\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$). Известны также метаморфические месторождения марганца, сложенные браунитом (Mn_2O_3), гаусманитом (Mn_3O_4) или родонитом (MnSiO_3). Особо важное значение имеют метаморфизованные золотоносные конгломераты, к которым относится крупнейшее в мире золоторудное месторождение Витватерсранд в Южно-Африканской Республике.

Отсюда следует, что рудные месторождения образуются в процессе многообразного развития земной коры. В ходе этого развития удается выделить эпохи, когда происходила максимальная концентрация определенных типов руд. В результате в учении о полезных ископаемых наметилась ветвь, изучающая металлогенетические эпохи. Важные данные накоплены также в результате изучения различных металлогенетических провинций, в которых находятся определенные типы руд, присущие данной провинции и сформированные нередко в различное время.

При изучении и разведке рудных месторождений особо важное значение приобретает выяснение отношения оруденения к определенным тектоническим элементам, что влечет за собой развитие нового направления в учении о рудных месторождениях — изучение структур рудных месторождений и полей. Развитие этого направления имеет большое практическое значение, так как оно дает возможность рационально направлять поиски не только на месторождения, обнажающиеся на дневной поверхности, но и на рудные тела, скрытые в коренных породах на глубине.

УСЛОВИЯ РАЗМЕЩЕНИЯ РУД

В ПРЕДЫДУЩИХ главах мы ознакомились с условиями образования эндогенных и экзогенных рудных месторождений и рассмотрели возможные источники металлов. Однако мы пока еще не проанализировали условия размещения рудных месторождений различного происхождения в земной коре и не рассмотрели вопрос о том, какие причины обуславливают залегание рудных тел и месторождений именно там, где они находятся. Изучение этого вопроса, проведенное прежде всего отечественными геологами, спе-

циалистами в области рудных месторождений, в последние годы привели к установлению ряда важных закономерностей. Исследования показали, что закономерности размещения оруденения в основном определяются геологическим строением и историей геологического развития рудоносных площадей, которые в то же время обуславливают формирование месторождений определенных генетических типов. Наблюдения, проводимые в различных провинциях, показали, что строение земной коры зависит от того, испытала ли та или иная территория интенсивную складчатость, проявление разрывных нарушений и магматических процессов (что характерно для геосинклинальных областей) либо она развивалась в спокойной тектонической обстановке, способствующей накоплению горизонтально залегающих, либо слабо смятых пластов осадочных толщ, наблюдаемых на платформах. Геологическое строение рудоносных площадей в ряде случаев находится в прямой зависимости от возраста слагающих ее пород. Наиболее деформированными — смятыми в складки и разбитыми разрывными нарушениями — являются участки земной коры, сложенные древними породами, имеющими возраст от 1 до 4 млрд. лет, и относящиеся к древней и древнейшей протерозойской и архейской эрам. Эти древние образования слагают нижний структурный этаж, или фундамент. Выше на размытой поверхности залегают породы палеозойской и более молодых эр — мезозойской и кайнозойской, смятые в протяженные складки. Эти складки обладают более широкими сводами по сравнению со складками фундамента. Подобные складчатые образования и прорывающие их магматические породы образуют нижний ярус второго, или геосинклинального, структурного этажа. К концу развития геосинклиналей накапливаются эффузивные, или осадочные, породы, подвергнутые менее интенсивной складчатости. В этих условиях появляются широкие своды складок, или купола, разрывы становятся более четко выраженными и протяженными, а вдоль них внедряются дайки интрузивных пород. Эти менее интенсивно складчатые породы представляют собой образования верхнего яруса геосинклинального этажа. На них с резким несогласием залегают платформенные отложения, представленные слоистыми толщами осадочных пород, обычно обладающие горизонтальным либо

слабонаклонным залеганием. Горизонтально залегающие осадочные породы, знаменующие платформенное развитие территории, возникли и в более древние эпохи. Однако в ряде районов они после продолжительного покоя вновь подверглись тектоническим движениям (активизации) и горизонтальные слои пород, казалось бы, совершенно недеформированные оказались разбитыми разрывами, вдоль которых в некоторых случаях проникли магматические образования. Эти горизонтально залегающие отложения слагают третий, или верхний, платформенный структурный этаж. Во многих рудоносных провинциях отложения среднего, или геосинклинального, этажа отсутствуют, и на породах фундамента сразу ложатся платформенные образования.

Рудные месторождения гидротермального происхождения могут возникать в породах, слагающих все упомянутые структурные этажи. Однако одновременно во всех трех этажах упомянутые месторождения не возникают. Как правило, они размещаются в одном и максимум в двух структурных этажах. Это объясняется общим относительно небольшим распространением оруденения по вертикали. Изучение вопроса о глубине формирования оруденения, и прежде всего о глубине образования верхних частей рудных тел и о распространении их на глубину, проведенное отечественными и зарубежными геологами, показало, что верхняя часть рудных тел находится на глубине от 500 до 2000 м от поверхности земли, которая существовала в период рудообразования. Распространение же оруденения на глубину является непостоянным и колеблется в широких пределах от первых сотен метров до 3—4 км и, видимо, даже 5 км. Как будет показано ниже, резкое различие распространения оруденения по вертикали находится в прямой зависимости от того, каким строением обладают породы, слагающие различные структурные этажи или ярусы, а также от места нахождения источника оруденения и физико-химических условий переноса и отложения рудного вещества. Положение оруденения в различных структурных этажах и ярусах сказывается также на его связи с крупными разрывными нарушениями, наблюдаемыми на рудоносных площадях. Это положение влияет также на форму рудных тел, их протяженность, на роль физико-механических свойств вмещающих пород в локализации оруденения и даже на тем-

пературу формирования зон гидротермального изменения пород и самих руд.

Во всех рудоносных провинциях проявления эндогенного оруденения обычно наблюдаются крупные разрывные нарушения, которые, как правило, влияют на условия распределения оруденения. Это влияние оруденения выражается в том, что при движении блоков пород по крупным разрывным нарушениям происходит приоткрытие боковых, ранее возникших трещин либо формирование новых синхронно с проникновением растворов из глубин. Рудоносные растворы, естественно, поступают и по крупным рудоконтролирующим разломам. Однако последние, как правило, пересекают всю земную кору и достигают поверхности земли. В связи с этим не создается условий для замедления течения рудоносных растворов, и разгрузка их наступает у дневной поверхности, где они смешиваются с грунтовыми водами и рассеиваются. Боковые трещины и тектонически подновленные плоскости напластования пород с земной поверхностью непосредственно не сообщаются. В связи с этим рудоносные растворы, проникающие вдоль этих разрывов, резко замедляют свое движение, что приводит к более длительному и интенсивному взаимодействию растворов с вмещающими породами и рудоотложению.

Исследования показали, что в большинстве случаев рудные тела возникают на некоторой глубине, а их верхние части не достигают дневной поверхности, которая существовала в процессе рудообразования. Лишь небольшое количество ртутных руд сформировалось в зоне разгрузки минерализованных растворов на дневной поверхности. Все же остальные руды гидротермального происхождения, как уже упоминалось, возникают на той или иной глубине.

Возникновение определенных форм рудных тел также находится в прямой зависимости от того, в образованиях каких структурных этажей они возникли. В частности, если рудные тела сформировались в геосинклинальном структурном этаже, где породы интенсивно смяты в складки, возникают метасоматические рудные тела пластовой формы, повторяющие элементы складчатой структуры. В массивных породах независимо от того, в каких структурных этажах они образуются, возникают рудные тела, развивающиеся вдоль разрывов и представляющие собой трещинные жилы, выполненные бо-

гатыми рудами, или минерализованные зоны, несущие более бедное вкрапленное оруденение. Однако способы формирования, внутреннее строение и текстуры руд жильных месторождений, залегающих в различных структурных этажах, существенно различаются. По-разному также выклиниваются (заканчиваются) рудные тела в зависимости от того, в каких структурных этажах и ярусах они возникли.

Все отмеченные характерные особенности размещения эндогенного оруденения мы рассмотрим ниже, при сопоставлении условий локализации оруденения в различных структурных этажах.

ОСОБЕННОСТИ РАЗМЕЩЕНИЯ ОРУДЕНЕНИЯ В НИЖНЕМ СТРУКТУРНОМ ЭТАЖЕ

В НИЖНЕМ структурном этаже, сложенном древними толщами архейских и протерозойских пород, несколько по-особому выражается отношение оруденения к крупным разрывным нарушениям. Прежде всего разломы имеют очень длительную историю развития. Некоторые из них, судя по абсолютному возрасту древнейших изверженных пород, которые ими пересекаются, были заложены более 2 млрд. лет назад, и позднее движения прилегающих к ним блоков пород возобновлялись многократно, а оруденение, локализующееся в этих разломах, имеет возраст всего лишь 150 млн. лет. Особенностью развития этих разломов является то, что в период формирования руд рудоносные растворы с поверхностью не сообщались, так как в ряде рудоносных провинций упомянутые разломы оказались перекрытыми горизонтально лежащими слоистыми толщами осадочных пород. Это, в свою очередь, привело к тому, что крупные разломы в образованиях нижнего структурного этажа не только являются рудоконтролирующими, но в ряде случаев и рудовмещающими. В результате во многих провинциях, где обнажаются породы нижнего структурного этажа, рудные жилы приурочены к крупным разломам и имеют протяжение, достигающее 30 км и более. Оруденение этих месторождений характеризуется значительным вертикальным размахом, достигающим 4 км и более (рис. 9). В частности, максимальный вертикальный размах оруденения, установленный в на-

стоящее время и соответствующий более 3,5 км, известен для золоторудного месторождения Колар-Голдфилс, находящегося в Индии и залегающего среди пород архейского возраста. Это, видимо, вызвано тем, что при возобновлении движения вдоль долгоживущих разломов возникают глубоко проникающие полости, что, в свою очередь, обуславливается длительным развитием таких разломов. Рудные тела, формирующиеся вдоль упомянутых разломов, имеют форму жил либо вкрапленных зон. Они заканчиваются под вышележащими платформенными образованиями, т. е. под поверхностью несогласия древних и более молодых пород. Однако известны и такие примеры, когда рудные тела не достигают этой поверхности на 300—500 м. Прослеживая рудные тела, залегающие в древних породах, удается установить, что рудные тела заканчиваются при переходе сосредоточенных разрывов в зону расщепления. Поскольку характеризующие месторождения образуются под чехлом слоистых платформенных образований, вся система, в которой формируется оруденение, оказывается закрытой, что, в свою очередь, препятствует резкой потере растворами газовой составляющей и проникновению их на поверхность земли. Это способствует сохранению относительно высоких температур в полостях рудоносных разрывов во весь период рудообразования. В результате в толщах, слагающих нижний структурный этаж, формируются преимущественно высокотемпературные месторождения свинца, цинка, золота и других металлов, образованию которых предшествует возникновение скарнов, альбититов и других гидротермально-измененных пород, возникающих при относительно высоких температурах.

УСЛОВИЯ РАЗМЕЩЕНИЯ ОРУДЕНЕНИЯ В СРЕДНЕМ СТРУКТУРНОМ ЭТАЖЕ

В ОБРАЗОВАНИЯХ среднего структурного этажа эндогенное оруденение локализуется по-разному в зависимости от того, в каком структурном ярусе оно сформировалось. В нижнем структурном ярусе, в котором слоистые породы интенсивно смяты в складки, оруденение приспособляется к складчатости (см. рис. 9). Здесь широкое развитие приобретают пластобразные рудные тела, а также седлообразные зале-

жи, приуроченные к самому перегибу или шарниру складок. Крутопадающие разрывные нарушения в большинстве случаев оруденения не несут, но исследования показывают, что для рудоносных растворов они выполняли роль рудопроводящих каналов. На тех площадях, где такие разрывы отсутствуют, оруденение не возникает. Упомянутые выше пластообразные и седлообразные рудные залежи обычно образуются путем замещения пластов пород, подвергшихся наиболее интенсивному раздроблению либо обладавших высокой пористостью, а это, в свою очередь, привело к соприкосновению рудоносных растворов с породами и способствовало химическим реакциям. Как правило, рудные тела формировались под толщей пород, сложенных относительно плотными образованиями, представляющими своеобразные малопроницаемые экраны для просачивавшихся снизу рудоносных растворов. В пределах рудных районов развиты, как правило, крупные разломы, которые обычно играют важную рудоконтролирующую роль. Однако сами по себе эти разломы оруденения не несут, поскольку в большинстве провинций они оказались сквозными и в процессе оруденения расщелили все толщи пород вплоть до поверхности. Оруденение в ряде случаев возникает на тех участках, где крутопадающие разрывы, служившие рудопроводящими каналами для поступающих снизу рудоносных растворов, заканчиваются в рудовмещающем горизонте пород. В рассматриваемых условиях возникают месторождения свинца и цинка, меди, золота, урана, сурьмы и ряда других металлов. Глубина формирования верхних частей рудных тел рассматриваемых месторождений колеблется в пределах 1000—1500 м. Распространение по вертикали отдельных рудных тел обычно небольшое и часто бывает не более 100 м. Суммарный вертикальный размах для ряда рудных тел нередко составляет 800—1000 м и даже больше, причем рудные тела преимущественно располагаются многоярусно одно над другим. Особенностью их является значительная протяженность вдоль благоприятных рудовмещающих горизонтов, нередко достигающая 5 км и более. Условия образования эндогенных месторождений в нижнем ярусе среднего структурного этажа несколько отличны от формирования тех же месторождений в нижнем структурном этаже. Это отличие выражается в том, что в нижнем ярусе

система оказывается несколько более открытой. Рудонесные растворы имеют возможность несколько больше сообщаться с поверхностью по порам, капиллярам и трещинам, происходит резкая утечка газовой составляющей растворов, в результате создаются менее благоприятные условия для формирования высокотемпературных месторождений и главная масса их возникает при средних температурах. Зоны гидротермального изменения также возникают при средних температурах и выражаются обычно в березитизации, хлоритизации, окварцевании, доломитизации (развитие по известнякам доломита) и в появлении других среднетемпературных минеральных ассоциаций.

Условия локализации эндогенного оруденения в верхнем ярусе среднего структурного этажа имеют свои особенности. Слоистые образования, слагающие верхний ярус, обычно смяты в очень пологие складки, и среди них широкое развитие приобретают вулканические сооружения (см. рис. 9), которые, как правило, приурочиваются к местам пересечения крупных разрывных нарушений. Элементы складчатой структуры на локализацию оруденения не влияют и руды отлагаются только в разрывах, которые возникают в породах, легко подвергающихся дроблению. Важное значение в формировании руд также приобретает пористость пород, которая способствует просачиванию растворов, а затем заполняется рудными и сопровождающими их жильными минералами, способствуя возникновению вкрапленных руд. Благоприятными для оруденения являются также породы, слагающие вулканические сооружения и особенно разного рода брекчии, туфы и некоторые разности застывших хрупких лав. Крупные разломы контролируют условия размещения рудных полей, месторождений и рудных тел, сами же они оказываются безрудными. Оруденение в верхнем структурном ярусе формируется в относительно близповерхностных условиях, и верхние части рудных тел возникают на глубине, составляющей примерно 700—800 м от поверхности земли, существовавшей в процессе оруденения. Вертикальный размах оруденения в рассматриваемых месторождениях в большинстве изученных примеров составляет 700—800 м. Однако в тех случаях когда оруденение залегает в однородных породах, оно распространяется на значительно большую глубину, иногда достигающую 1500 м и

более. В верхнем ярусе среднего структурного этажа оруденение формируется в несколько менее закрытой системе по сравнению с нижним структурным ярусом, так как рудоносные растворы частично проникают до земной поверхности. В результате чего в данных условиях образуются не только среднетемпературные, но также и низкотемпературные месторождения свинца, цинка, меди, сурьмы, золота, урана и других металлов. Гидротермальное изменение вмещающих пород, развитое вблизи рудных тел, оказывается близким к изменению, наблюдаемому в нижнем ярусе среднего структурного этажа и выраженному преимущественно в алюмосиликатных породах березитизацией, а в карбонатных — окварцеванием и доломитизацией. Особенностью рассматриваемых месторождений является то, что формирование руд происходит преимущественно не метасоматически, а путем выполнения открытых пустот, что приводит к появлению кокардовых, друзовых и полосчато-симметричных текстур руд.

УСЛОВИЯ ЛОКАЛИЗАЦИИ ОРУДЕНЕНИЯ В ВЕРХНЕМ СТРУКТУРНОМ ЭТАЖЕ

В ВЕРХНЕМ структурном этаже, представленном горизонтально залегающими слоистыми толщами, отчетливо выявляются свои специфические условия локализации оруденения. Прежде всего здесь полностью отсутствует какое бы то ни было влияние складчатости на размещение руд, поскольку таковая в данных условиях не проявлена. При формировании оруденения важное значение наряду с разрывными нарушениями приобретают физико-механические свойства вмещающих слоистых пород, и прежде всего их высокая пористость, проницаемость, а также способность к дроблению. В результате среди целой серии пластов пород, слагающих верхний структурный этаж, наиболее благоприятными для оруденения являются лишь отдельные пласты, в которых и формируются руды. К ним прежде всего относятся пористые песчаники, кремнистые сланцы, иногда известняки. В пористых песчаниках оруденение проникает по порам и капиллярам от рудопроводящей трещины на значительное расстояние и в резуль-

тате оруденевшим оказывается весь пласт или значительная его часть, вытягивающаяся в виде полосы вдоль трещины, от которой растворы двигались внутрь пластов. В менее пористых пластах развивается прожилково-вкрапленное оруденение вдоль серии мелких трещин. Так же как и в ранее рассмотренных геологических условиях, размещение рудных полей и месторождений определяется крупными разломами, которые сами оруденению не подвержены, но признаки гидротермальной минерализации вдоль них проявляются.

В характеризуемых условиях оруденение формируется на относительно небольшой глубине, не превышающей 500 м от поверхности земли. Поскольку оруденение формируется в определенных благоприятных пластах, распространение его по вертикали оказывается небольшим, не превышающим мощности рудоносных пластов (см. рис. 9). В целом оно в большинстве случаев не превышает 100—150 м. Однако в ряде случаев оруденение из верхнего структурного этажа продолжается в нижележащие однородные породы, и тогда рудные тела наблюдаются на глубине 1000 м и более. В верхнем структурном этаже рудоотложение протекает в относительно открытой системе. В этих условиях растворы, отложившие свой рудный груз, имеют возможность проникать до земной поверхности, а в зону рудоотложения могут просачиваться грунтовые воды. Это приводит к тому, что рудоотложение протекает в низкотемпературных условиях (50—200°) и в образованиях верхнего структурного этажа формируются лишь низкотемпературные месторождения меди, свинца и цинка, золота, урана, сурьмы, ртути, серебра и некоторых других металлов. Низкотемпературным оказывается также и гидротермальное изменение вмещающих пород, преимущественно выраженное в аргиллизации (глинистом изменении), в меньшей степени в карбонатизации.

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЭКЗОГЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

МНОГОЧИСЛЕННЫЕ исследования, проведенные в процессе изучения экзогенных рудных месторождений, показывают, что основными фак-

торами, определяющими концентрацию первично осадочных рудных образований являются: 1) наличие источника рудных компонентов, 2) благоприятный рельеф местности, 3) проявление благоприятных климатических условий. Поступление рудного вещества для образования месторождений может идти из трех источников. Одним из них являются исходные породы. Значительную роль играет непосредственное выделение солей и рудных компонентов из морской или озерной воды, а также извлечение их природными сорбентами. Третий источник — различные эндогенные рудные элементы, поступающие в бассейны осадконакопления в связи с магматическими процессами. Первичные рудные концентрации, образующиеся в стадию накопления осадков, могут претерпевать существенные изменения под воздействием более поздних процессов, протекающих в стадию перехода илов в осадочную горную породу (стадия диагенеза), или еще позднее, когда в горную породу проникают различные водные растворы (стадия катагенеза). Осадочные породы и полезные ископаемые, связанные с ними, образуются в различных геологических условиях, причем процесс осадконакопления обладает своими специфическими особенностями в зависимости от того, в какой геотектонической обстановке он протекает.

В платформенных областях, где имеют место преимущественно стабильные тектонические условия, процесс осадконакопления обладает своими характерными особенностями. Среди слоистых толщ, слагающих платформенные образования, в период рудоотложения выделяются несколько различных комплексов минеральных образований. Одни из них представляют морские осадочные образования, а другие накопились в континентальных условиях и включают породы коры выветривания. Отложения всех комплексов обычно тесно связаны друг с другом и образуют целую гамму постепенных переходов. Каждый комплекс накапливается в условиях определенной зоны на платформе и с каждым из них связывается свой круг месторождений.

В целом удается выделить четыре зоны осадконакопления и рудообразования, протекающие на платформе. Нулевая зона включает повышенные участки на платформе и прилегающие к ней гористые участки складчатых областей. Первая зона (частичного выноса и фор-

мирования остаточных месторождений) охватывает высоко приподнятые участки платформ, в пределах которых происходит химическое разложение материнских пород. Вторая зона (формирование осадочных континентальных месторождений)—эпиконтинентальные морские водоемы, в которых происходит отложение морских осадочных пород и полезных ископаемых осадочного происхождения. При движении поперек основных зон осадконакопления и рудообразования можно при благоприятных условиях последовательно встретить различные комплексы осадочных пород и пластовых месторождений, залегающих с ними согласно и тесно связанных между собой. Начиная от приподнятых областей, выделяемых в нулевую зону, встречаются образования коры выветривания, включающие многочисленные остаточные месторождения, как бы плащом перекрывающие коренные породы, подвергавшиеся выветриванию. Последние составляют первый ряд.

Далее следует вторая зона, характеризующаяся распространением континентальных отложений, с которыми связаны речные, болотные, озерные и другие месторождения пластовой формы. Все они относятся ко второму ряду. В пределах морских бассейнов третьей зоны формируется последний (третий) ряд осадочных месторождений. Д. Г. Саложников приходит к выводу, что осадочные месторождения, возникшие за время единой рудной эпохи, когда из областей питания более или менее постоянно поступал минеральный материал, занимают в пределах ряда совершенно определенное положение. Оно определяется вначале (на суше) расстоянием от области сноса, а затем (в морском бассейне) расстоянием от берега водоема.

Природные наблюдения за условиями размещения экзогенных месторождений железа, алюминия и марганца показали, что отложение руд всех этих металлов в водоемах происходит обычно путем коагуляции коллоидных растворов, в форме которых в поверхностных пресных водах переносится часть металлов. Коагуляция этих растворов достигает больших масштабов в дельтовых областях под влиянием действия электролитов, содержащихся в морской воде. При этом в зависимости от того, в какой части водоема происходит накопление рудных образований, они характеризуются различным составом. На небольших глубинах, в условиях активно-

го действия кислорода, в процессе рудоотложения происходит накопление окисных соединений железа и марганца. На более глубоких участках в условиях недостатка кислорода в связи с восстановительным действием разлагавшихся органических веществ и сероводородного брожения за счет осаждающихся рудных образований возникают карбонатные руды в тесной связи с сульфидами. Осаждение железных руд разного состава отличается щелочностью-кислотностью среды, колеблющейся в пределах рН 8—6. Большое внимание исследователей привлек вопрос о месте отложения в бассейнах руд железа, алюминия и марганца по отношению к береговой линии. Анализ данных показал, что в условиях морского осадконакопления раньше (ближе к берегу) отлагаются из растворов, поступающих с континента, соединения алюминия или алюминия совместно с железом, далее накапливаются руды железа и затем марганца. Наиболее кислыми рН 4—6 являются алюмоносные растворы, затем выпадают руды железа и при рН 8—9 отлагаются марганцевые руды.

Некоторые исследователи предполагают, что при изменении концентрации водородных ионов (рН) от 6,7 до 8,5 и резким изменением окислительно-восстановительного потенциала, которые довольно обычны для природных морских вод, происходит разделение железа и марганца. В результате из поступающих растворов с суши относительно быстро выпадают железосодержащие минералы, образуя железорудные месторождения. В это же время марганец, находящийся в растворах, переносится течениями на другие участки бассейна, где и формируются собственно марганцевые месторождения. В некоторых благоприятных условиях кислородного режима могут накапливаться совместно руды железа и марганца. В тесной ассоциации с рудами этих металлов нередко концентрируются и другие элементы и в том числе редкие, изучению которых в последнее время уделяется большое внимание. Для бурых железняков особенно характерны примеси ванадия, мышьяка, фосфора, редких земель, бора, иногда германия, хрома, никеля и кобальта.

Проведенные исследования показали, что в связи с накоплением углисто-кремнистых сланцев и остатков рыб образуются осадочные месторождения урановых руд. Однако большая часть известных урановых место-

рождений экзогенного происхождения возникает в связи с развитием инфильтрационных процессов.

Уже много лет проводятся острые дискуссии по вопросу об условиях образования свинцово-цинковых и медных месторождений, залегающих в слоистых толщах осадочных пород. Первые из них преимущественно приурочены к пластам карбонатных пород, представленных известняками и доломитами, и в ряде случаев рудные тела обладают пластовой формой. Медные месторождения, характеризующиеся относительно малосернистыми сульфидными рудами, в составе которых преобладают халькозин (Cu_2S) и борнит (Cu_5FeS_4), обычно приурочены к пластам песчаников, входящих в состав слоистых толщ осадочного чехла. В соответствии с составом вмещающих пород месторождения эти именуются медистыми песчаниками. В ряде этих месторождений оруденевшими оказываются не только песчаники, но также известняки, кремнистые сланцы и другие породы. Общей особенностью месторождений медистых песчаников является пластовая форма рудных тел и в ряде месторождений относительно равномерное распределение рудных минералов внутри пластов.

Учитывая приуроченность упомянутых свинцово-цинковых и медных месторождений к определенным стратиграфическим горизонтам и наблюдаемую (особенно при первом впечатлении) пластовую форму рудных тел¹, некоторые исследователи относят эти месторождения к осадочным образованиям. При этом предполагается, что металлы в растворенном виде переносятся поверхностными водами и отлагаются в прибрежной зоне в связи с сорбцией их органическими соединениями. Отдельные ученые склоняются к мысли, что источником металлов являются коренные породы, обладающие кларковым содержанием металлов. Н. М. Страхов (1962) в результате исследований пришел к противоположному выводу. Он доказал, что источником металлов могут быть лишь ранее возникшие эндогенные месторождения либо породы, обогащенные этими металлами. Н. М. Страхов подчеркнул, что формирование пластообразных месторождений цветных металлов может происходить за

¹ При более детальном исследовании выявляется, что наряду с пластовыми на рассматриваемых месторождениях появляются и секущие рудные тела.

счет переноса этих металлов только лишь растворами, а не взвесями. Однако новейшие исследования показали, что в реках и морях свинец переносится только во взвесьях, причем содержание его не превышает $3 \cdot 10^{-7} \%$ (в 1 кг морской воды свинца содержится в 5000 раз меньше, чем в 1 кг горной породы), 50% меди и цинка, концентрация которых в реках составляет $4 \cdot 10^{-6} \%$, а в морях $3 \cdot 10^{-7} \%$ также находится во взвесьях. При разрушении коренных месторождений свинца, цинка и меди грунтовые воды содержат повышенное количество этих металлов лишь в непосредственной близости от этих месторождений, не превышающей в пустынных зонах первые сотни метров, а в зонах с влажным климатом 2—3 км. Соответственно и из коренных месторождений в водные бассейны упомянутые металлы не могут переноситься в сколько-нибудь повышенных концентрациях. Вместе с тем изучение конкретных пластовых месторождений свинца, цинка и меди, находящихся в СССР и зарубежных странах, показывает, что оруденение этих месторождений контролируется дорудными разрывными нарушениями, а рудные тела сопровождаются зонами гидротермального изменения вмещающих пород. Эти признаки, а также нахождение в составе руд таких жильных минералов, как кварц и кальцит, а в составе сульфидов различных редких и рассеянных элементов (Cd, Ge, In, Tl, Re и др.), характерных для гидротермальных месторождений, залегающих не только в осадочных, но и в изверженных породах, дает возможность считать более обоснованной гипотезу о гидротермальном происхождении рассматриваемых месторождений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ИТАК, теперь можно сделать вывод, что руды металлов возникают как при развитии эндогенных процессов, протекающих в земной коре, так и внешних экзогенных, развивающихся на поверхности земли. Первым из них предшествует проявление продуктов магматизма, возникающих внутри земной коры или представляющих собой расплавленную мантию, внедрившуюся вдоль крупных глубоко проникающих разломов и образующую глубинные магматические оча-

ги. Эти очаги, а может быть, и верхняя мантия и являются источником разнообразных металлов. Часть из них поступает в верхние горизонты земной коры с магматическими массаами. В этом случае металлические соединения накапливаются в виде рудного расплава — раствора, отделяющегося в жидком виде от силикатной массы и кристаллизующегося, образуя концентрации руд уже после остывания окружающих пород. В упомянутых условиях возникают месторождения хрома, платины, титана, никеля, меди и др., связанные с основными и ультраосновными породами, а также месторождения редких земель, ниобия, циркония и некоторых других элементов, тесно связанных с кристаллизацией щелочных пород. В связи с остыванием внедрившихся в более высокие горизонты остаточных магматических расплавов, обогащенных летучими компонентами, возникают пегматитовые месторождения, несущие в своем составе руды таких редких металлов, как бериллий, литий, цезий, рубидий, тантал, ниобий, торий и др.

Большая часть многочисленных месторождений разнообразных цветных (свинец, цинк, медь, сурьма, олово), черных металлов (железо, марганец) и их сплавов (никель, кобальт, вольфрам, молибден и др.), редких (бериллий, литий, висмут, тантал, редкие земли, кадмий, индий, галлий, селен, теллур, таллий, скандий, рений и др.), благородных металлов (золото, серебро) и радиоактивных элементов (уран, торий) возникает в зоне рудоотложения путем кристаллизации из гидротермальных растворов, отделяющихся от глубинных магматических очагов, возникших в верхней мантии или очагов в земной коре. Важное значение в накоплении в россыпях самородного золота и платины, труднорастворимых минералов титана, циркония и редких земель, а также в образовании месторождений железа, алюминия, марганца и других металлов имеют экзогенные геологические процессы. Месторождения этих металлов образуются при накоплении осадочных толщ в долинах рек, в морских бассейнах или озерах, в процессе циркуляции грунтовых вод, а также при метаморфических процессах. Следовательно, руды металлов возникают при всех многообразных процессах, протекающих в земной коре и влияющих на ее формирование. Изучение всех процессов концентрации руд металлов и выяснение геологических условий их размещения вооружало геологов

все новыми научными знаниями, способствующими открытию многих месторождений руд, из которых человечество уже извлекло значительные массы разнообразных металлов. Но количество добытых к настоящему времени металлов представляет лишь небольшую часть тех огромных богатств, которые таятся в земных недрах. Для открытия их необходимо глубже познать те закономерности, которые привели к их концентрации и размещению в различных геологических условиях. В этом направлении работают геологи различных стран мира. Среди них особо выделяется большой отряд советских геологов, который за короткий срок обеспечил наше социалистическое государство всеми видами минерального сырья, требовавшегося для развития социалистической индустрии. Можно не сомневаться, что и в будущем отечественные геологи умножат свои открытия и внесут свой весомый вклад в создание материально-технической базы коммунизма.

С Л О В А Р Ъ Т Е Р М И Н О В

Андезит — горная порода темно-серого цвета, образовавшаяся в результате остывания вулканических лав, излившихся на дневную поверхность, и сложенная стекловатой или мелкозернистой массой, состоящей из среднего плагиоклаза (кальций-натриевого полевого шпата) $[60\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8) + (40\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8)]$, роговой обманки $[\text{Ca}_2\text{Na}(\text{MgFe}^{\dots})_4(\text{Al}, \text{Fe}^{\dots})(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{11}]_2(\text{OH})_2$ и иногда других цветных минералов. Среди основной массы выделяются белые, порфировые вкрапленники плагиоклаза, иногда темные кристаллы роговой обманки.

Антиклиналь — складка из слоистых горных пород, в ядре которой залегают более древние пласты. Обычно а. обращена выпуклым изгибом вверх и пласты падают от него в обе стороны.

Астеносфера — зона мантии, начинающаяся на глубине 150—200 км от поверхности земли и имеющая такую же глубину распространения. А. устанавливается по скорости продольных сейсмических волн, которые в ее пределах не нарастают. Предполагается, что а. обладает высокой вязкостью в связи с тем, что среди твердопластичной массы часть материала является жидкой. А. является областью широкого выплавления мантии, зарождения магматических очагов и очагов землетрясений.

Аргиллизация — глинистые изменения пород под воздействием горячих растворов.

Базальт — горная порода темного цвета, образовавшаяся в результате остывания вулканических лав, излившихся на дневную поверхность. Сложена она стекловатой или мелкозернистой массой основного плагиоклаза $[\text{O} - 2\text{ONa}(\text{AlSi}_3\text{O}_8) + (8\text{O} - 10\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8)]$, пироксена $[\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_6]$ и часто оливина $[\text{Mg}_2\text{SiO}_4]$, в которой обычно наблюдаются включения более крупных кристаллов тех же минералов.

Батолит — очень большой массив магматической породы неправильного очертания, обычно гранитоидного состава, образовавшегося на глубине в земной коре, но вскрытого последующей эрозией. Тело б. в общем удлинено параллельно горным цепям и осям складок, что обусловлено его становлением в процессе складкообразования.

Березитизация — изменение пород, выражающееся в замещении полевых шпатов кварцем и серицитом и выделением пирита.

Брекчия — обломочная горная порода, состоящая из сцементированных неокатанных обломков различных пород крупнее 2 мм. Обломки, слагающие б., могут быть по составу однородными

и неоднородными и обычно резко отличаются от цемента, но иногда сходны с ним. Б. могут образоваться под влиянием различных геологических процессов: поверхностных (б. экзогенные), вулканических (б. вулканические), тектонических (б. тектонические).

Везувиан—минерал, обладающий составом $\text{Ca}_3\text{Al}_2[\text{SiO}_4]_2[\text{OH}]_4$.

Вмещающие породы—горные породы, вмещающие рудные тела или тела других изверженных пород.

Геосинклиналь—область накопления мощных осадков пород в морских условиях в период прогибания земной коры.

Гидротермальные месторождения—образовавшиеся в результате отложения минералов (в том числе и рудных) из восходящих горячих водных растворов, выделяющихся из магмы при остывании и затвердевании ее на глубине и выносящих соответствующие компоненты минералов в растворенном состоянии. Выпадение минералов из таких растворов происходило при понижении температуры и давления и при химическом взаимодействии раствора с боковыми породами, а также с растворами другого состава (глубинными или поверхностными).

Гомогенный раствор—однородный раствор.

Гранат—минерал, отвечающий составу $\text{A}_3\text{B}_2(\text{SiO}_4)_3$, где $\text{A}=\text{Mg}, \text{Fe}^{2+}, \text{Ca}$ и $\text{B}=\text{Al}, \text{Fe}^{3+}, \text{Mn}^{2+}$.

Дайка—плитообразное тело изверженной горной породы, ограниченное от других пород параллельными стенками. Д. образована магматическим расплавом при заполнении им вертикальных или наклонных трещин в земной коре.

Дегазация—потеря рудоносными растворами газовой фазы в связи с резким снижением давления.

Диализ—разделение вещества с помощью полупроницаемых перегородок. Через такие перегородки легко проникают растворенные молекулы и ионы, но не проникают коллоидные частицы.

Дифференциация магмы—совокупность физико-химических процессов, вследствие которых из магмы возникают разные по химическому составу породы или породы с различными количественными соотношениями одних и тех же минералов. Д. м. может происходить в период кристаллизации расплавов и отделения твердой фазы, состоящей из более тугоплавких минералов, в процессе ликвации, приводящей к разделению расплава на две и более несмешивающиеся жидкости, или другими причинами (поглощения расплавом окружающих осадочных и других пород, выделения летучих составных частей магмы и т. д.).

Друза—совокупность кристаллов, выросших одним концом на какую-либо поверхность и ограниченных только с другого конца, обращенного в сторону пустого пространства.

Зальбанды—боковые поверхности, отделяющие жилы от вмещающих пород. Часто это название распространяется на смежные с жилами оруденелые части вмещающих пород.

Зонная плавка—процесс, при котором вещество в виде тонкого стержня нагревается. В нем возникает узкая зона плавления, которая медленно перемещается вдоль стержня; по мере перемещения зоны плавления легкоплавкие компоненты, понижающие температуру плавления, перейдут в жидкую фазу и будут накапливаться в движущемся расплаве, а тугоплавкие останутся в твердой фазе. Академик Виноградов (1961) предполагает, что такой раздельный процесс з. п. является подобием выплавления вещества земной коры из материала мантии земли и что идея, подобная з. п.,

может быть приложена к изучению механизма процесса радиального выплавления и дегазации земли.

Изоморфизм — явление, выражающееся в свойстве или способности химических элементов (атомов) замещать друг друга в кристаллах и минералах.

Карбонатизация — замещение минералов породы кальцием либо другими карбонатами.

Коагуляция — процесс изменения коллоидной и некоторых более грубых дисперсных систем, вызванный нарушением ее устойчивого состояния. В процессе к. коллоидные частицы слипаются, увеличиваются в размере до такой величины, что теряют коллоидные свойства и выпадают в виде осадка. Золь в результате укрупнения частиц свертывается и переходит в студень.

Кларки — числа, выражающие среднее содержание элементов в космической или геохимической системе (в атмосфере звезд, литосфере или всей земной коре, интрузивном массиве и т. д.) в весовых или атомных процентах. Термин введен Ферсманом вместо определения «распространенность химических элементов» или «частота химических элементов».

Конвекционные течения — возникают в связи с процессами переноса энергии токами в магме вследствие ее охлаждения или обусловливаемые восходящими потоками. К т. проявляются в основном в жидкой магме, частично и после того, как началась ее кристаллизация.

Латеритовое выветривание — разрушение горных пород в тропических странах с влажным климатом, приводящее к образованию гидроокислов железа и алюминия.

Ликвация — разделение жидкого магматического расплава на две несмешивающиеся жидкости, например, отщепление сульфидного расплава от основной магмы. Одни исследователи считают, что л. играет существенную роль в дифференциации магмы. Другие допускают л. лишь при образовании медно-никелевых и других месторождений и только некоторых разновидностей магматических пород. Экспериментальными исследованиями л. пока доказана для сульфидно-силикатных и фтористо-силикатных систем; в однородных силикатных расплавах л. не происходит.

Магматический очаг — место зарождения магмы, представляющей собой расплавленную огненную массу, образующуюся в глубинных зонах земли и состоящую из смеси сложных химических соединений, главным образом силикатов и некоторых окислов (кремнезема и др.), содержащих в растворенном состоянии различные летучие компоненты (углекислоту, фтор, хлор, воду и др.). М. о. образуются в гранито-гнейсовом или базальтовом слое земной коры в результате нарушения физико-химического равновесия (уменьшения давления, увеличения температуры и т. д.), вследствие чего вещество, находящееся в твердом состоянии, переходит в жидкое или вязкое состояние и делается способным проникать в верхние горизонты земной коры и даже достигать поверхности земли. Глубинные м. о. возникают в астеносфере в результате ее выплавления с последующим проникновением расплавленных масс вдоль фокальных зон в верхнюю часть мантии и земную кору.

Магматогенные месторождения — минеральные месторождения, возникшие в связи с развитием магматических процессов, включая собственно магматические и послемагматические (пнеуматолитовые и гидротермальные).

Мантия — оболочка земного шара, начинающаяся на континентах со средней глубины от поверхности земли — 30—35 км, в океанах со средней глубины — 6—8 км и прослеживающаяся до глубины 2900 км, подразделяясь на верхнюю и нижнюю. Верхняя граница м. выявляется по скачкообразному нарастанию скорости продольных сейсмических волн с 6—6,5 км/с в базальтовом слое нижней части земной коры до 8 км/с в м. Вещество м. находится в твердопластической состоянии.

Метаморфизованные породы — горные породы, подвергнутые глубокому изменению в результате воздействия на них температуры, давления и химически активных веществ. Упомянутые изменения пород выражаются в распаде ранее существовавших химических соединений, в молекулярной перегруппировке и в образовании новых, более устойчивых минеральных видов, т. е. сводятся к частичной или полной перекристаллизации пород и в большинстве случаев с образованием новых минералов. При этом либо не происходит изменения валового химического состава пород (метаморфизм без привноса вещества), либо наблюдается изменение их состава (метаморфизм с привносом или выносом вещества).

Металлогенетические эпохи — периоды формирования рудных месторождений в различные этапы развития земной коры.

Мобилизация металлов при метаморфизме — способность выщелачивать металлы, находящиеся в горных породах в рассеянном состоянии в кларковых количествах горячими водами, выделяющимися из некоторых минералов при нагревании горных пород, протекающем при их метаморфизме.

Метасоматоз (метасоматический процесс) — процесс замещения одних минералов или горных пород другими с изменением химического состава при взаимодействии горной породы с растворами или расплавом. При м. растворение старых и образование новых минералов происходит почти одновременно, так что порода сохраняет твердое состояние в течение всего процесса.

Метаморфогенные месторождения — месторождения, образование которых связано с процессами метаморфизма горных пород. К этой категории относятся некоторые месторождения железных, марганцевых руд и неметаллических ископаемых (корунда, графита и др.).

Нептунизм — научное течение, возникшее в XVIII веке под влиянием идей немецкого ученого Вернера, согласно которому все рудные месторождения и горные породы, включая граниты, сформировались на поверхности земной коры из вод Мирового океана.

Основные породы — магматические породы, недосыщенные кремниеслотой, обычно те, которые содержат не более 50—55% кремнезема.

Парагенетическая ассоциация минералов (парагенезис) — совместное нахождение минералов, возникших из одной порции растворов или расплавов и находящихся между собой в генетической связи.

Пегматиты — крупнозернистые кристаллические породы, залегающие в виде жил или линз, главные минералы которых те же, что и в материнской магматической породе. Обычно богаты минералами, содержащими легколетучие вещества (воду, фтор, бор, хлор и др.), а иногда содержат соединения редких элементов. Из-

вестны, кроме того, п., содержащие в своем составе крупные пластины слюд.

Первичные ореолы рассеяния — развиты над и в меньшей мере под скрытыми рудными телами; они распространяются в породах выше рудных тел на расстояния до 100—150 м и иногда 200 м. П. о. р. выявляются по повышенным содержаниям металлов, входящих в состав рудных тел, превышающим кларковое их содержание в 5 раз и более, а также по повышенному содержанию некоторых наиболее подвижных элементов спутников (Ba, As, Hg), которые накапливались к концу процесса рудообразования.

Перидотит — кристаллическая горная порода, застывшая на глубине и состоящая в основном из оливина и пироксена.

Петрология — наука о горных породах: их происхождении, форме залегания, составе, особенностях внутреннего строения и возрастных соотношениях.

Петрогенные элементы — химические элементы, которые играют главную роль в образовании горных пород. К ним относятся Al, Ca, Mg, Na, K, Si, O, C, P, Cl, F и немногие другие.

Плутонизм — научное течение, возникшее в XVIII веке под влиянием идей английского ученого Хетона, согласно которому все рудные жилы возникли из рудоносных расплавов, поднявшихся в зону рудоотложения из нижних горизонтов земной коры.

Послемагматические месторождения — месторождения, возникшие из газовой фазы либо горячих водных растворов, отделившихся от остывающего магматического расплава.

Псевдоморфозы — ложные кристаллы минералов, формы которых не отвечают структуре слагающего их минерала. П. получаются в результате метасоматического замещения одного минерала другим с сохранением внешней формы кристаллов первого из них. Понятие п. применяют и в том случае, если вновь возникшие минералы замещают ракушки или другие органические остатки и при этом усваивают форму последних.

Региональный метаморфизм — процесс, захватывающий значительные толщи и протекающий в складчатых областях на больших глубинах в результате совместного воздействия на горные породы высокого давления, температуры и горячих водных растворов. В результате этих изменений осадочные и другие породы были подвергнуты глубокому метаморфизму и возникли разнообразные кристаллические сланцы и гнейсы.

Рифтовые зоны — крупные (узкие расселины, или ущелья, разломы) образующие узкие грабены (опущенные блоки), установленные на дне океанов и на континентах и прослеживающиеся в глубь земли, по-видимому, до мантии.

Скарн — порода, состоящая из граната, пироксена и некоторых других известково-железистых силикатов, возникшая в результате высокотемпературного метасоматоза карбонатных и силикатных пород в области их контакта. Со с. связаны рудные месторождения ряда металлов: железа, меди, свинца, цинка, вольфрама, молибдена, золота, олова, кобальта и др.

Серицит — мелкошубчатая слюдка, по составу сходна с мусковитом $[KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2]$

Серпентиниты — горные породы, возникшие в качестве продукта гидротермального метасоматического замещения железисто-магнезиальных силикатов (оливина, пироксена и др.) водным силикатом магнезия — серпентином.

Сорбент — твердое вещество, способное поглощать другие вещества, находящиеся в растворенном или газообразном состоянии.

Сульфиды металлов — минералы, в состав которых входят соединения металлов с серой.

Сфалерит — минерал, состоящий из соединения цинка с серой (ZnS).

Текстура руд — пространственное расположение минеральных образований

Ультраосновные породы — общее наименование магматических бесполовошпатовых (или с очень незначительным количеством полевого шпата) пород, которые состоят только из одного или нескольких цветных минералов, главным образом оливина, пироксена и роговой обманки. Химически у. п. характеризуются низким содержанием кремнекислоты (около 45%).

Фракция — 1. Часть обломков минералов или горных пород, обладающая примерно одинаковым размером, например, мелкозернистая фракция и т. д. 2. Отделившаяся в результате ликвации или другого механизма определенная часть расплава или раствора

Фумаролы — выходы горячего вулканического газа в виде струек и спокойно парящих масс из трещин на поверхности вулкана или недавно образовавшихся лавовых потоков и покровов. В зависимости от местоположения и источника питания ф. подразделяются на первичные или постоянные и вторичные или временные. Первичные ф. связаны с жерлом действующего вулкана и располагаются на дне и внутренних стенках кратера, а также на внешнем склоне, но обычно недалеко от кратера. Вторичные ф. наблюдаются только на поверхности лавовых потоков. В зависимости от температуры и химического состава газов и возгонов выделяются ф.: сухие, кислые, щелочные или нашатырные, сернистые, или сульфатары, и углекислые, или мофетты.

Флюорит — минерал, химический состав которого CaF_2 .

Флюид — преимущественно водный или углекислый природный раствор рудных и солевых компонентов, находящийся в надкритическом (газовом) состоянии.

Фокальные зоны — или линии Беньофа — гигантские глубинные разломы, пересекающие земную кору до глубины 750 км от земной поверхности и проникающие на значительное расстояние в мантию. Вдоль ф. з. располагаются гипоцентры глубокофокусных землетрясений (впервые установлено Заварицким) и проявлен глубинный высокотемпературный тепловой поток, а океаническая кора уходит под континент.

Штокверк — рудное тело неправильной формы (чаще изометрической), представляющее собой густую сеть различно ориентированных рудных прожилков, прорезающих массу породы. Обычно также вкрапленность рудных минералов. Штокверки, вытянутые вдоль разрывных нарушений, именуются штокверковыми зонами

Экзогенные месторождения — минеральные месторождения, сформировавшиеся в связи с процессами, протекающими на поверхности земли.

Эндогенные месторождения — минеральные месторождения, возникшие в связи с внутренними процессами, протекающими в земной коре.

Электролитическая диссоциация — разделение молекул при растворении вещества в воде на заряженные частицы ионы. Например, $NaCl$ (поваренная соль) диссоциирует в воде на

Na^+ и Cl^- . Электролитическая диссоциация протекает также в силикатных магматических расплавах.

Эманации — пары и газы, выделившиеся из остывающего магматического расплава и проникшие по разрывам в верхние горизонты земной коры.

Эффузивные породы — магматические расплавы, которые во многих случаях, подобно современным лавам, достигли поверхности земли по вулканическим каналам или разрывам в земной коре и застыли в виде потоков или покровов.

Эвтектика — расплав, представляющий собой смесь двух или нескольких компонентов и кристаллизующийся при самой низкой температуре из всех возможных для смесей этих веществ путем одновременного выделения компонентов. Твердые фазы, образуются химическими индивидами или металлами. По числу твердых фаз различают э., двойную, тройную и т. д.

ЛИТЕРАТУРА

Архангельский А. Д. К вопросу об условиях образования бокситов в СССР. Бюлл. МОИП, отд. геол., 1933, 11 (2), 11 (4).

Бетехтин А. Г. Промышленные марганцевые руды СССР. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1946.

Бетехтин А. Г. Гидротермальные растворы, их природа и процессы рудообразования. — В кн.: «Основные проблемы в учении о магматогенных рудных месторождениях». М., Изд-во АН СССР, 1955.

Билибин Ю. А. Основы геологии россыпей. М.—Л., ГОНТИ, 1938.

Виноградов А. П. О происхождении вещества земной коры. Сообщение 1. Журн. «Геохимия», 1951, № 1.

Вольфсон Ф. И. и Лукин Л. И. Особенности локализации гидротермального оруденения в различных структурных этажах Изв. АН СССР, 1965, № 10, серия геол.

Заварицкий А. Н. Основной вопрос физической химии процесса образований пегматитов Изв. АН СССР, 1944, № 5, серия геол.

Казанский В. И. О внутреннем строении архейских разломов Центрально-Алданского района. Сб. Геол. рудн. м-ний, т. 7, 1965, № 2.

Королев А. В. Эндогенное рудообразование в развитии земли. Труды Среднеазиатского политехн. ин-та, вып. 6, нов. сер. Ташкент, Изд. АН Узб ССР, 1959.

Котульский В. К. Современное состояние вопроса о генезисе медно-никелевых сульфидных месторождений. Журн. «Советская геология», 1948, сб 29

Лебедев Л. М., Бугельский Ю. Ю. О металлоносности высокоминерализованных термальных вод Челекена. Сб. Геол. рудн. м-ний, т. 1X, 1967, № 3.

Мархинин Е. К. Плутон-созидатель. М., «Знание», 1971.

Набоко С. И. Химизм реальных минералообразующих растворов Сб. Геол. и геофиз., 1968, № 3

Ольшанский Я. И., Иваненко В. В. Механизм переноса веществ при образовании гидротермальных месторождений сульфидов. Труды ИГЕМ АН СССР, 1958, вып. 16.

Сапожников Д. Г. К теории прогноза осадочных месторождений. М., Изд-во АН СССР, 1961.

Смирнов В. И. Геология полезных ископаемых. М., «Недра», 1969

Смирнов В. И. Об источниках эндогенных месторождений полезных ископаемых. Изв АН СССР, 1969, № 3, серия геол

Смирнов С. С. Избранные труды. М., Изд-во АН СССР, 1955

Страхов Н. М. Железорудные фации и их аналогии в истории земли. М., Изд-во АН СССР, 1947.

Страхов Н. М. Основы теории литогенеза. М., Изд-во АН СССР, 1962, т. III.

Судовиков Н. Г. Метаморфогенное рудообразование. — «Советская геология», 1965, № 1.

Татаринов П. В. Условия образования рудных и нерудных полезных ископаемых. М., Госгеолиздат, 1963.

Ферсман А. Е. Пегматиты, т. I Гранитные пегматиты. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1940, 3-е изд.

Хаин В. Е. Происходит ли научная революция в геологии? — «Природа», 1970, № 1.

Шнейдерхен Г. Рудные месторождения. М., Изд-во ИЛ, 1958.

Щербаков Д. И. Предвидение геолога. М., «Знание», 1964.

Garrels R. M. Solubility of metal sulphides in dilute vein forming solutions. Econ. Geol., 1944, No 7.

Федор Иосифович ВОЛЬФСОН

ПРОИСХОЖДЕНИЕ РУД МЕТАЛЛОВ

Редактор *Н. Косаковская.*

Худож. редактор *Г. Добровольнова.*

Технич. редактор *А. Красавина.*

Корректор *Н. Мелешкина*

А 02632. Индекс заказа 46006. Сдано в набор 11/III 1974 г. Подписано к печати 7/IV 1974 г. Формат 84×108¹/₃₂. Бумага типографская № 3. Бум. л. 3. Печ. л. 2. Усл. печ. л. 3,36. Уч.-изд. л. 3,62. Тираж 44 880 экз. Издательство «Знание», 101335, Москва, Центр, проезд Серова, д. 3/4. Заказ 494. Типография Всесоюзного общества «Знание», Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.
Цена 10 коп.

