

ГЕОХИМИЯ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Геохимия рудного месторождения - это история концентрации и рассеяния химических элементов в пространстве его рудного поля.

Геохимическая характеристика рудного месторождения включает следующие важнейшие вопросы:

- 1) кларки концентрации элементов на месторождении;
- 2) формы нахождения элементов в рудах и ореолах, изотопные отношения;
- 3) парагенные ассоциации элементов в минералах, породах, рудах, месторождениях и рудных поясах;
- 4) современные и бывшие геохимические процессы (обстановки) на рудном поле месторождения, геохимическая зональность;
- 5) геохимические барьеры;
- 6) историческая и региональная геохимия месторождений, рудных районов и провинций;
- 7) геохимические основы генезиса, прогнозирования, поисков, разведки и эксплуатации месторождений.

КЛАРКИ И РУДООБРАЗОВАНИЕ

Понятие о **кларке** долгое время не использовалось при анализе рудообразования. Вместе с тем оно необходимо при изучении рудных месторождений, так как от величины кларка во многом зависят число минералов и генетических типов месторождений, их запасы, содержание металлов в рудах и т.д.

Кларк концентрации (КК) – это отношение содержания элемента в анной системек его кларку в земной коре.

| Кларки концентрации | Бедные руды | Богатые руды | Импульс миграции $u = \ln KK$ | Интенсивность рудообразования $P_x = u/t$ ($t = 10^5$ лет) |
|---------------------|-------------------|----------------------------|----------------------------------|--|
| 1-10 | Fe | Mg, K | 0-2.3 | $0-2.3 \cdot 10^{-6}$ |
| 10-100 | Mn, Co, V | Fe, Zr, Ti, Na, Ca | 2.3-4.6 | $2.3-4.6 \cdot 10^{-6}$ |
| 100-500 | Cu, Ni, Ta, U | Mn, V | 4.6-6.2 | $4.6-6.2 \cdot 10^{-6}$ |
| 500-1000 | Pb | Cu, Ni, TR, Ge, Sr, Tl, Ba | 6.2-6.9 | $6.2-6.9 \cdot 10^{-6}$ |
| 1000-10000 | Sn, Mo, W, Au, Pt | Cr, Pb, Co, U, Ta, S, Cl | 6.9-9.2 | $6.9-9.2 \cdot 10^{-6}$ |
| 10000-100000 | Sb, Hg | Sn, W, Mo Au, Pt | 9.2-11.5 | $9.2-11.5 \cdot 10^{-6}$ |
| Больше 100000 | | Sb, Hg | >11.5 | $>11.5 \cdot 10^{-6}$ |

Кларки концентрации в рудах колеблются в сотни тысяч раз, но импульсы миграции, равные $\ln KK$, сравнительно меняются слабо – в пределах одного порядка.

Минимальные содержания элементов в руде также обнаруживают связь с кларками и химическими свойствами. Так, для черных металлов минимальное содержание в руде равно 20-25%, для цветных - 0,5-1,0, для редких - 0,1-0,2, для благородных - 0,0005%.

С KK элемента в рудах связано и **разнообразие генетических типов месторождений**. Существует много процессов, приводящих к увеличению концентрации элемента в несколько раз и мало - в десятки и сотни тысяч раз. Так, KK Fe в рудах близок к 7. Процессы, приводящие к семикратному накоплению Fe, осуществляются и при высоких температурах земных глубин, и на земной поверхности. Поэтому известно много генетических типов месторождений Fe.

Иные соотношения для Hg, KK которой в богатых рудах равен десяткам и сотням тысяч (до 880 000). В отличие от Fe, руды этого металла образуются только в гидротермальных низкотемпературных условиях. Если бы промышленность использовала руды с $KK = 7$ (как у Fe), т.е. содержащие $6 \cdot 10^{-5} \% \text{ Hg}$, то число генетических типов ртутных месторождений резко бы возросло. По той же причине ограничено число генетических типов месторождений Sn, Pb, Zn, хотя число природных тел, в которых KK этих элементов близки к 10 (как у Fe), весьма велико.

По **величине запасов** выделяют уникальные, крупные, средние, мелкие и непромышленные месторождения, причем запасы, уникальные для одних металлов (например, для Hg), являются средними для других (Cu, Pb) и мелкими для третьих (Cr). Здесь сказывается влияние кларков (чем меньше кларк, тем менее вероятны большие запасы).

| Металл | Месторождения, не имеющие промышленного значения | Промышленные месторождения | | | |
|--|--|------------------------------|----------------|--------------------------------|----------------------------------|
| | | мелкие | средние | крупные | уникальные |
| Fe | $n \cdot 10^6$ | $n \cdot 10^7$ | $n \cdot 10^8$ | $n \cdot 10^9$ | $n \cdot 10^{10}$ |
| Al в нафелинах и алунитах, Mg в карналите, Mn, Ti в коренных месторождениях, Cr, Ag (в бокситах) | $n \cdot 10^5$ | $n \cdot 10^6$ | $n \cdot 10^7$ | $n \cdot 10^8$ | $n \cdot 10^9$ |
| Mg в магнезитах | $n \cdot 10^4$ | $n \cdot 10^5$ | $n \cdot 10^6$ | $n \cdot 10^7$ | $n \cdot 10^8$ |
| Ti (в россыпях), Cu, Pb, Zn, Ni | $n \cdot 10^3$ | $n \cdot 10^4$ | $n \cdot 10^5$ | $n \cdot 10^6$ | $n \cdot 10^7$ |
| Sn, W, Mo, Sb, V, Zr, Li, Nb, TR цериевой группы | $n \cdot 10^2$ | $n \cdot 10^3$ | $n \cdot 10^4$ | $n \cdot 10^5$ | $n \cdot 10^6$ |
| U, Th, Hg, Be, Co, Ta, Ag, Bi, TR иттриевой группы | $n \cdot 10$ | $n \cdot 10^2$ | $n \cdot 10^3$ | $n \cdot 10^4$ | $n \cdot 10^5$ |
| Au, Pt | n - | $n \cdot 10$ 0, n и менее | $n \cdot 10^2$ | $n \cdot 10^3$ $n \cdot 10$ | $n \cdot 10^4$ $n \cdot 10^2$ |

Показателем способности элементов к концентрации в земной коре служит и **отношение запасов к кларку в литосфере** (запасы в тоннах/кларк в литосфере).

| Элементы | Промышленные месторождения | | | |
|--|----------------------------|----------------|-------------------|-------------------|
| | мелкие | средние | крупные | уникальные |
| Sb, Hg | $n \cdot 10^8$ | $n \cdot 10^9$ | $n \cdot 10^{10}$ | $n \cdot 10^{11}$ |
| Be, Cr, Fe, Mo, Ag, Sn, Pb | $n \cdot 10^7$ | $n \cdot 10^8$ | $n \cdot 10^9$ | $n \cdot 10^{10}$ |
| Li, Al, Cr ¹ , Mn, Cu, Zn, Nb, Au, U | $n \cdot 10^6$ | $n \cdot 10^7$ | $n \cdot 10^8$ | $n \cdot 10^9$ |
| Mg, Ti, V, Ni ¹ , Zr, Ce, (TR), Ta, Th | $n \cdot 10^5$ | $n \cdot 10^6$ | $n \cdot 10^7$ | $n \cdot 10^8$ |
| Co, Y (TR), Pt ¹ | $n \cdot 10^4$ | $n \cdot 10^5$ | $n \cdot 10^6$ | $n \cdot 10^7$ |

¹ - Расчет на кларки в ультраосновных породах

В месторождениях сосредоточена ничтожная часть общих запасов элементов в земной коре. Следовательно, для образования месторождений требуется лишь небольшая часть химических элементов горных пород. Соответственно, образование руд вероятнее за счет извлечения элементов из обогащенных ими пород и магм. Поэтому, повышенное содержание рудных элементов в горных породах в ряде случаев служит региональным геохимическим поисковым критерием.

Давно установлено, что число рудопроявлений во много раз больше числа промышленных месторождений, а среди последних средние и мелкие преобладают над крупными.

Главная задача поисков - обнаружение уникальных и крупных месторождений, но в результате поисков обнаруживается преимущественно огромное количество рудопроявлений и аномалий. Число рудопроявлений, как правило, на целые по рядки превышает число промышленных месторождений.

Поэтому одна из **главных задач прикладной геохимии** - выявление признаков, позволяющих при поисках отличать рудопроявления от промышленных месторождений. Не менее важна и оценка аномалий - выделение среди них объектов, отвечающих промышленным месторождениям (в первую очередь крупным).

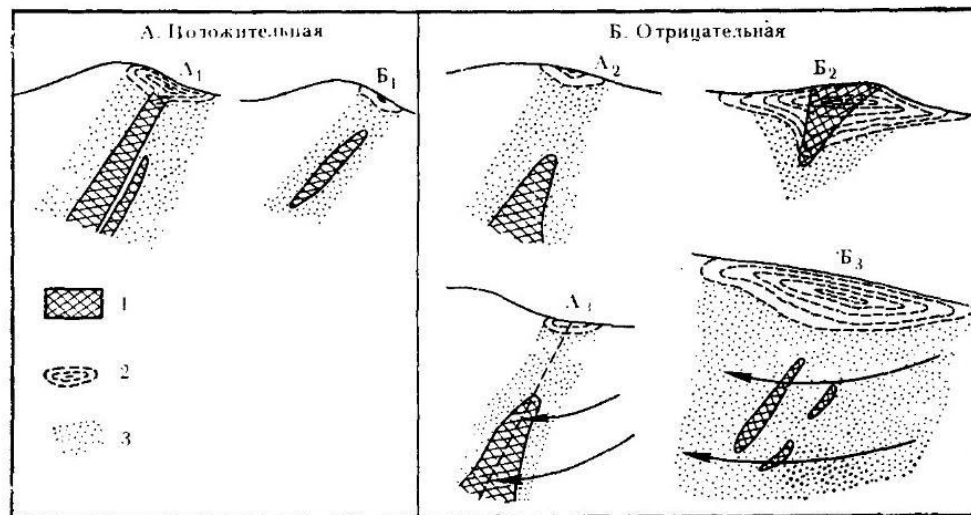


Рис. 110. Корреляция положительная А и отрицательная Б аномалий и оруденения:

1 — первичные руды, 2 — геохимическая аномалия на поверхности, 3 — первичный ореол

Опыт поисков показал, что наиболее интенсивная аномалия на поверхности не всегда соответствует промышленному месторождению. Многие месторождения представлены на поверхности как раз слабыми (малоконтрастными) аномалиями.

ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ В РУДАХ И ОРЕОЛАХ, ИЗОТОПНЫЕ ОТНОШЕНИЯ

В геохимии месторождений главное внимание уделяется геохимии минералов, а также неминеральным формам нахождения элементов (изоморфным и сорбированным примесям, органо-минеральным соединениям и др.) Неминеральная форма характерна для ореолов рассеяния, для рассеянных элементов (Ge в углях и др.). В ряде случаев рационально говорить о подвижной форме - легкоизвлекаемой водной вытяжкой, органическими растворителями, слабыми кислотами и щелочами.

Для решения различных генетических вопросов большое значение имеет определение изотопных отношений в рудах - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$; $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$; $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ и др.

Так, по И.В.Чернышеву, Pb из алмазных кимберлитов Южной Африки и медно-порфировых руд Монголии имеет мантийные изотопные характеристики, а изотопы Pb полиметаллических руд Центральной Европы и редкометальных руд Монголии указывают на сиалический источник рудного вещества.

ПАРАГЕННЫЕ АССОЦИАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ

Понятие о парагенезисе элементов ввел в 1909 г. В.И.Вернадский, имея ввиду их совместную концентрацию, обусловленную единым процессом.

Парагенная ассоциация может быть как одновременной, так и неодновременной, связанной, например, с последовательным осаждением элементов из вод. Кроме парагенных различают **запрещенные ассоциации** элементов (отрицательный парагенезис), т.е. ассоциации, невозможные в данной системе (Ni и Ba в минералах, Cг и U в рудах, Cu и Mn в осадочных формациях).

Причины образования парагенных ассоциаций различны: парагенезис главных элементов в минералах, как правило, объясняется законами кристаллохимии (например, Fe и S в пирите, Fe, Mg, Si, O в оливине и т.д.), парагенезисы элементов-примесей в минералах связаны с такими процессами как сорбция, близость ионных радиусов, радиоактивный распад и др.

Их выявление в минералах, рудах и ореолах составляет одну из важнейших задач геохимии рудных месторождений. Не все ассоциации представляют практический интерес, но все они должны быть установлены, чтобы исключить пропуск промышленно важных элементов. Для каждого рудного месторождения помимо парагенной ассоциации следует выделять и запрещенные ассоциации в рудах и ореолах.

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ (ОБСТАНОВКИ) НА РУДНОМ ПОЛЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ. ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ЗОНАЛЬНОСТЬ И ГЕОХИМИЧЕСКИЕ БАРЬЕРЫ

В пределах месторождений условия современной миграции и концентрации элементов, как правило, неодинаковы: меняются Eh, pH и другие параметры среды. Это позволяет расчленять месторождения на отдельные подсистемы, однородные по геохимическим условиям.

Большинство рудных месторождений представляет собой трехфазные системы, состоящие из твердой, жидкой и газообразной фаз. Поэтому при изучении современных геохимических обстановок необходимы гидрогеохимические исследования и газовый анализ, которые проводятся сопряженно с минералого-геохимическими. Кроме того, многие рудные месторождения содержат органические вещества, сульфиды и другие соединения - источники энергии для микроорганизмов. В связи с этим изучение современной геохимической обстановки должно включать изучение органического вещества и микробиологию месторождений.

Изучая минеральные ассоциации в породах и рудах, газовой-жидкие включения в минералах, химический состав пород и руд, можно восстановить былые геохимические обстановки.

Геохимические обстановки в пределах месторождения образуют геохимическую зональность, которая особенно детально изучена на эндогенных месторождениях. Много данных и по зональности первичных геохимических ореолов, изучение которых позволяет выделить надрудные и подрудные ореолы, т.е. оценить перспективность выявленного оруденения на глубину.

Геохимические обстановки в пределах месторождения образуют **геохимическую зональность**, которая особенно детально изучена на эндогенных месторождениях.

Геохимическая зональность - важный поисковый признак. Анализ зональности необходим и для выяснения генезиса месторождений. Нередко на одном месторождении развито несколько зональностей, накладывающихся друг на друга, что затрудняет решение генетических вопросов. В таких случаях особенно повышается роль историко-геохимического подхода.

При геохимическом изучении месторождений необходимо анализировать как устойчивые геохимические обстановки, так и геохимические барьеры - контакты между ними. **Геохимические барьеры** - самостоятельный и важный объект исследования. Руды, ореолы и рудные минералы следует рассматривать как проявления определенных барьеров и анализировать их с этих позиций.

Для большинства рудных месторождений характерны вторичные ореолы рассеяния, для оценки которых необходимо изучать **геохимический ландшафт** рудного поля - его почвы, коры выветривания, континентальные отложения, растения, воды, атмосферу.

При разрушении месторождений также возникают геохимические барьеры, к которым часто приурочены вторичные геохимические аномалии, являющиеся важными прямыми поисковыми признаками руд. При отработке месторождений создаются техногенные геохимические обстановки и барьеры, которые также служат объектом изучения.

ИСТОРИЧЕСКАЯ И РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОХИМИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ, РУДНЫХ РАЙОНОВ И ПРОВИНЦИЙ

Для выяснения этих вопросов необходимо осмыслить с геохимических позиций данные тектоники, геоморфологии, палеогеографии, исторической геологии.

Каждый этап геологического развития месторождения, рудного района и провинции должен получить геохимическую характеристику, а геохимические особенности месторождения и провинции - геологическое обоснование.

Региональная геохимия месторождений, рудных районов и провинций также тесно связана с геологической историей района, с его металлогенией.

Месторождение может быть на длительное время "законсервировано" в земной коре, но может и разрушаться в результате окисления, эрозии. Поэтому историческая геохимия включает и историю разрушения месторождений, т. е. образования вторичных ореолов рассеяния.

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ГЕНЕЗИСА, ПРОГНОЗИРОВАНИЯ, ПОИСКОВ И ЭКСПЛУАТАЦИИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Научным итогом изучения месторождения является **выяснение его генезиса**. Это комплексная проблема, при решении которой используются данные всех геологических наук, в том числе и геохимии.

Важная практическая задача геохимических исследований - установление поисковых признаков: геохимик должен сказать, где и как искать месторождение.

Главное значение приобретают геохимические методы поисков по первичным и вторичным ореолам. Данные о геохимических обстановках, парагенных ассоциациях, геохимических барьерах, исторической геохимии позволяют выяснить условия образования первичных и вторичных ореолов, объяснить их размеры, форму, интенсивность, контрастность. На этой основе строится рациональная методика геохимических поисков.

Ландшафтно-геохимическое картирование в масштабах от 1:50 000 до 1:500 000 и мельче позволяет районировать территорию по условиям геохимических поисков, наметить рациональный комплекс поисковых методов, дифференцировать каждый метод в зависимости от условий района. При оценке аномалий также используется геохимия ландшафта (ландшафтно-геохимические карты в масштабе 1:25 000-1:5000).

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ СИСТЕМАТИКА РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Д.В.Рундквист и И.А.Неженский разработали геохимическую систематику **эндогенных месторождений** по ведущим ассоциациям рудных элементов (рис.). В основу геолого-геохимической систематики эндогенных месторождений В.В.Ивановым положены парагенные ассоциации элементов, направление тектонических движений, вероятный тип земной коры (континентальный, океанический и др.). Выделяются пять групп месторождений (табл.).

Геолого-геохимическая укрупненная группировка эндогенных месторождений В.В.Иванова (1976)

| № группы | Группа месторождений | | Типы месторождений, входящих в группу | Главные компоненты | Основные редкие и малые металлы | Глубинность эндогенных процессов, с которыми связаны месторождения (тип коры при рудообразования) | Направленность близких к рудообразованию вертикальных тектонических перемещений |
|----------|--------------------------|-------------------------------------|--|---|---|---|---|
| | Геохимическая | Петрографическая | | | | | |
| I | Литофильная | Редкометалло-гранитная | Редкометалльные апограниты, гранитные метасоматиты (грейзены и др.), гранитные пегматиты, кварцевые жилы | Si, K, Na, F, Sn, W, Mo | Li, Rb, Cs, Ta, Be, Sc, Hf, Ga, Ge, Tl, Bi, U, TR | Коровые, приповерхностные (материковые) | Поднятие |
| II | Литофильно-халькофильные | Редкометалло-сульфидно-гранитоидная | Сульфидно- и силикатно-сульфидно-кастеритовые, вольфрамитовые, молибденитовые, фенакит-бертрандитовые, бастнезитовые, молибденит-халькопиритовые, свинцово-цинковые, золоторудные, арсенопиритовые | Si, S, Fe, Mo, Sn, W, Pb, Zn, Au, As, Cu | Bi, In, Re, Ag, Cd, Ge, Tl, Te, Se, Co, U | Коровые средних и больших глубин (материково-переходный) | « |
| III | Халькофильная | Сульфидно-сульфосоляно-базитовая | Сульфидные и сульфосоляные медно-цинковые, медно-свинцово-цинковые, свинцово-цинковые, ртутные, сурьмяные, золото-серебряные | Ca, Mg, Fe, S, Cu, Pb, Zn, Sb, As, Hg, Ni, Sr | Ag, Re, Ge, Cd, Co, Ga, Tl, Bi, Te, Se, V | Коровые глубинные и подкоровые (переходный океанический) | Опускание Сквозь структурные зоны |
| IV | Сидерофильная | Сульфидно-базит-гипербазитовая | Медно-никелевые, медные, медно-железорудные, ванадиево- и титано-железорудные, некоторые медно-цинковые | Fe, Mg, S, P, Ti, Cr, Cu, Ni, Co | V, Pd, Pt, Ru, Rh, Ir, Os, Se, Te | Подкоровые (различные) | |
| V | Щелочно- | Редкометалло-щелочная | Редкометалльные карбонатиты, лопаритовые, перовскитовые. | Al, Mg, Ca, Na, K, Ti, Fe | Zr, TR, Nb, Ta, Ga, Sr. | | |

Выделяются четыре группы **экзогенных месторождений**:

I. Месторождения, формируемые **механической миграцией** (россыпи и др.).

II. Месторождения, формируемые **физико-химической миграцией**. Эта группа на геохимической основе разделяется на типы, классы и виды.

Выделяются два типа:

1) **остаточные месторождения** - элювиальные бокситы, железные и никелевые руды коры выветривания, руды редких земель в коре выветривания щелочных пород, гипс ("гипсовая шляпа") и др.;

2) месторождения, руды которых отложились на **геохимических барьерах** этот тип делится на классы в зависимости от типов геохимических барьеров, например, месторождения сформированные на кислородных, сульфидных, термодинамических и др. барьерах

В каждом классе выделяется основные виды, в соответствии с геохимической систематикой вод.

III. Месторождения, формируемые **биогенной миграцией** – каустобиолиты, органогенные известняки, кремнистые породы, фосфаты и нитраты (гуано) и др.

VI. Месторождения, формируемые **техногенной миграцией** – искусственные месторождения солей и др.