

<<

>>

Введение в минералогию руд

Природные образования, извлекаемые из недр Земли и служащие для удовлетворения потребностей человека, называют полезными ископаемыми.

Полезные ископаемые делятся на твердые, жидкие, газообразные.

В свою очередь твердые полезные ископаемые делятся на рудные или металлические (руды), нерудные или неметаллические (минеральное сырье) и горючие.

Таблица. Общая схема классификации полезных ископаемых

Полезные ископаемые				
Твердые			Жидкие	Газообразные
Рудные (руды)	Нерудные (сырье)	Горючие	Пресные и минерализованные воды	Природный газ
Черных металлов	Химическое	Каустобиолиты		
Цветных металлов	Агрохимическое			
Благородных металлов	Металлургическое			
Редких металлы	Техническое			
Радиоактивных металлов	Стройматериалы			
			Нефть	

Согласно приведенной схеме термин рудные полезные ископаемые равнозначен термину руды, а термин нерудные полезные ископаемые – термину минеральное сырье. Именно в таком значении эти термины будут использоваться далее. Однако существует и другое мнение, согласно которому содержание термина руды расширено и распространяется на все твердые полезные ископаемые, которые добываются с целью извлечения из них не только металлов, но и других элементов, их соединений и минералов. В этом случае пользуются понятиями: руды металлических и руды неметаллических полезных ископаемых.

Рудные полезные ископаемые или *руда* – это природный минеральный агрегат, из которого технологически возможно и экономически выгодно извлекать металлы. Понятие «руда» в определенной степени понятие экономическое и историческое. А это значит, что в данный момент времени и в данном месте рудой будет считаться то, для чего существуют технологические схемы извлечения ценного компонента и это извлечение является экономически целесообразным.

Основным извлекаемым компонентом в руде может быть один металл, часто два и реже более. В этом случае руды становятся многокомпонентными. Кроме основных компонентов в руде почти всегда присутствуют попутные ценные компоненты и вредные примеси.

Попутные ценные компоненты – это те минералы, металлы и другие элементы, которые не имеют в руде определяющего значения, но при переработке её на основной компонент могут быть попутно извлечены на экономически выгодной основе. Многокомпонентность руды и наличие в ней попутных ценных компонентов определяет *комплексность руды*.

Попутные вредные примеси – это те минералы, металлы, другие элементы, присутствие которых отрицательно влияет на процесс обогащения или извлечения ценных компонентов из руды или на качество конечной продукции.

Кондиции

Качество руды как природного минерального агрегата регламентируется **кондициями**, под которыми понимается ряд требований, предъявляемых к руде перерабатывающей или потребляющей отраслью промышленности. Основными кондиционными требованиями являются:

- минимальное промышленное *содержание основного компонента*;
- максимально допустимые содержания *попутных вредных примесей*.

Кондиции на тот или иной вид полезного ископаемого также являются категорией как экономической так и исторической, поскольку меняются в зависимости от состояния минерально-сырьевой базы, научно-технического прогресса и потребностей в этом виде полезного ископаемого.

С учетом кондиций при подсчете запасов производится оконтуривание рудных тел. Часто контуры рудных тел как промышленных объектов совпадают с естественными природными контурами рудных тел как геологических объектов. Тем не менее, достаточно часто промышленное оконтуривание рудных тел производится по минимальному промышленному содержанию ценного компонента. При этом часть рудного тела как геологического объекта может остаться за пределами этого контура. В связи с этим на месторождениях выделяют так называемые *балансовые руды*, для которых содержание ценного компонента выше минимального промышленного, и *забалансовые* – для которых оно ниже. При подсчете запасов разведываемого объекта отдельно учитываются запасы балансовых и забалансовых руд.

Если запасы руды какого-либо объекта превышают *минимальные запасы*, при которых его отработка становится рентабельной, объекту присваивается статус месторождения, в противном – проявления.

Минералы руд

При определении качества руды, как природного минерального агрегата, все минералы, входящие в состав руды, делят на рудные (промышленные) и нерудные.

К рудным (промышленным) минералам относятся те, которые являются источником для извлечения металлов. При отнесении минерала к промышленному основными критериями являются:

- кларк концентрации металла;
- наличие технологии его извлечения;
- экономичность этой технологии;
- влияние на окружающую среду процесса извлечения металла.

Рудные минералы обычно имеют высокий *кларк концентрации металла*, определяемый как отношение содержания металла в минерале к его кларку в земной коре. Однако одного этого критерия оказывается недостаточно. Необходимо также наличие таких технологических схем извлечения металла из минерала, которые обеспечат рентабельность этого процесса. Для ряда минералов даже при высоком кларке концентрации металла извлечение является дорогостоящим процессом. Такие минералы попадают в категорию *потенциально промышленных*. В настоящее время уделяется должное внимание оценке отрицательного влияния на окружающую среду побочных продуктов переработки руды. И только тогда минерал используют в качестве рудного при отрицательном экологическом эффекте при извлечении из него металла, когда нет другой альтернативы. Однако и при этом надо стремиться к минимизации отрицательного влияния на окружающую среду. Именно по этой причине при высоком кларке концентрации железа сульфиды железа специально не используются в качестве рудных минералов – при переработке сульфидов в атмосферу выделяется большое количество сернистого газа. Большинство же других сульфидов при таких же последствиях относят к рудным по причине отсутствия серьезной альтернативы среди минералов других классов соединений.

Сложность извлечения металла из минерала зависит от прочности связи металла в кристаллической решётке, а это в свою очередь предопределено классом соединения и кристаллохимическим типом его структуры. К промышленным минералам относятся, условно, самородные металлы, оксиды, гидроксиды, сульфиды, кроме сульфидов железа, кислородные соли и в значительно меньшей степени силикаты и алюмосиликаты. Обычно к промышленным относятся те силикаты и алюмосиликаты, которые имеют достаточный кларк концентрации металла и слоистую структуру, обеспечивающую непрочную связь металла в такой структуре. Силикаты с другими кристаллохимическими типами структур,

достаточно прочными, попадают в категорию промышленных (рудных) лишь тогда, когда для соответствующего металла отсутствуют промышленные минералы в других классах соединений. Проще говоря, тогда, когда нет другого источника для получения металла. Извлечение металлов их сульфидов сопровождается резким ухудшением экологической обстановки в районе перерабатывающего предприятия, поэтому сульфиды железа не используются в качестве промышленных минералов, поскольку есть другие источники для получения железа. В то время как для других металлов сульфиды остаются основными рудными минералами.

Промышленные или *рудные минералы* делятся на:

– *главные* – промышленно значимые, основные носители ценного компонента, из которых выгодно извлекать ценный компонент. Они не всегда характеризуются максимально высоким среди рудных минералов содержанием ценного компонента, но в них сосредоточены основные запасы металла рудных месторождений. В металлургии в качестве главных на текущий момент насчитывается порядка 200 минералов;

– *второстепенные* – присутствуют в подчиненном количестве (1-5 % от общего количества главных промышленных минералов) и, являясь второстепенными носителями ценного компонента, оказывают влияние на качество руды;

– *редкие* – являются носителями ценного компонента, но присутствуют в небольшом количестве и не оказывают особого влияния на качество руды;

– *минералы-носители ценных примесей* – минералы, заключающие в себе основную массу ценной примеси;

– *минералы-концентраторы ценных примесей* – минералы с высокой концентрацией ценных примесей;

– *минералы-носители вредных примесей*.

Список промышленных минералов не остается постоянным во времени. Так некоторые минералы, относимые к промышленным и имеющие высокий кларк концентрации металла, с течением времени при истощении их запасов могут перейти в категорию непромышленных. В свою очередь, благодаря научно-техническому прогрессу, бурному развитию атомной и ядерной энергетики, точного приборостроения, лазерной и оптоволоконной техники, возросли потребности в тех металлах, которые ранее не использовались или использовались ограниченно, например, бериллий, галлий, германий, индий, цирконий, гафний, ниобий, тантал, некоторые редкоземельные элементы и др. Поэтому в последние годы в список промышленных включены минералы этих элементов, не представлявшие в прошлые времена никакой промышленной ценности.

Нерудные минералы – минералы, являющиеся постоянными компонентами руд, но не содержащие извлекаемых металлов и не представляющие на текущий момент промышленной ценности. Они делятся на:

– *собственно нерудные* – не содержащие ценных компонентов и не имеющие промышленного значения, но являющиеся постоянными генетически обусловленными компонентами руд;

– *потенциально промышленные* – минералы, которые входят в состав руд и содержат ценный компонент, но по тем или иным причинам на текущий момент не являются промышленно ценными. К таким причинам, прежде всего, можно отнести нерентабельность их извлечения, связанную с дорогостоящей технологией извлечения металла из этого минерала. Ситуация может измениться по отношению к этому минералу, если истощатся запасы традиционных рудных минералов либо содержание и запасы этого минерала будут таковыми, что его переработка станет рентабельной.

Интересно то, что для некоторых минералов отнесение их к рудным приобретает региональный характер, имея при этом как экономическую, так и чисто геологическую причину. Например, сфен, являясь потенциально промышленным минералом, в щелочных породах Кольского полуострова становится рудным, благодаря его высокому содержанию и большим запасам. Нефелин является рудой на алюминий только в России по причине

отсутствия обеспеченности страны традиционными алюминиевыми рудами – бокситами, и наличию крупных массивов щелочных пород с высоким содержанием нефелина.

По качеству, учитываемому прежде всего содержание ценного компонента и соотношение рудных и нерудных минералов, руды делятся на:

- богатые (высокосортные);
- рядовые (среднесортные);
- бедные (низкосортные).

Для руд, являющихся естественным природным минеральным агрегатом, важны структурно-текстурные характеристики. Не останавливаясь детально на всех вариантах структур и текстур руд, отметим наиболее типичные. По структуре чаще выделяются тонко-, мелко-, средне-, крупнозернистые руды. По текстурным же признакам – сплошные, вкрапленные, прожилковые и прожилково-вкрапленные руды.

Обогащение руд

Обогащение полезных ископаемых – это совокупность технологических операций, приводящих к повышению содержания ценного компонента и преданию руде качеств, удовлетворяющих требованиям химической, металлургической или любой другой перерабатывающей отрасли. При обогащении качественное изменение минерального состава руды, связанное с изменением химического состава минералов, не происходит, поэтому обогащение относится к механическим способам обработки руды.

При обогащении 1) повышается содержание ценного компонента, 2) удаляются вредные примеси, 3) достигается однородность руды по крупности и минеральному составу.

Продуктами обогащения являются:

- концентраты;
- отвальные хвосты;
- промежуточные продукты, называемые промпродуктами, представляющие собой нечто среднее между концентратами и хвостами и требующие дополнительной доработки другими методами с выделением соответствующих концентратов.

Концентраты – продукты обогащения с более высоким содержанием ценного компонента, пригодные для дальнейшей переработки и извлечения металла. Концентраты называют по основному минералу или извлекаемому металлу. Концентрат называют *селективным* в случае извлечения из него одного металла и *коллективным* – при извлечении из него двух и редко более металлов.

Комплексность руд

По сложности минерального и элементного состава различают монометалльные и комплексные руды. *Комплексность руд* определяется наличием в них нескольких равнозначных извлекаемых металлов или попутных ценных компонентов, какими могут быть минералы, металлы или другие химические элементы. Попутные ценные компоненты в рудах не имеют определяющего значения, но при переработке руды на основной компонент могут быть рентабельно извлечены из него. Комплексность руд имеет геохимическую обусловленность. Это проявляется уже в том, что существует естественная геохимическая связь основных рудных элементов, например свинца и цинка в эндогенных свинцово-цинковых рудах. Кроме того, комплекс элементов-примесей в основных рудных минералах в зависимости от генетического типа месторождения также геохимически предопределен. Это обусловлено так называемым типохимизмом основных рудных минералов. Ярким примером проявления типохимизма является магнетит, для которого комплекс попутных ценных компонентов определяется генетическим типом месторождения.

Попутные ценные компоненты руд

Попутные ценные компоненты в зависимости от форм нахождения в руде делятся на 3 группы.

I группа – попутные полезные ископаемые, те ценные компоненты, которые образуют самостоятельные рудные тела и могут попутно извлекаться в процессе добычи или подготовительных работ для добычи основного ценного компонента. Часто к ним относятся вскрышные породы, используемые как строительный материал.

II группа – компоненты, образующие собственные минералы, которые в процессе обогащения могут быть выделены в самостоятельный концентрат или промпродукт с последующим извлечением их на экономически выгодной основе.

III группа – разного рода примеси в основных компонентах. К ним относятся изоморфные (структурные) примеси и микровключения минералов (механические примеси).

Природные и промышленные типы руд

Под природным типом понимают руды, сходные по минеральному и химическому составу, структурно-текстурным особенностям, слагающие достаточно обособленные участки. Природные типы разделяются на природные разновидности, связанные между собой плавными переходами различающиеся какими-либо хорошо выраженными особенностями, например, текстурными.

Под промышленным (технологическим) типом руд понимаются руды, обладающие близкими технологическими свойствами, что делает возможным их переработку по одной технологической схеме. Они слагают достаточно крупные участки рудных тел и предполагают их селективную (выборочную) отработку. Промышленные типы делятся на промышленные сорта, для которых при использовании той же схемы обогащения получают конечные продукты с разными показателями обогащения.

Часто промышленные типы соответствуют природным типам, а промышленные сорта природным разновидностям руд.

Из всего сказанного следует, что минералогия руд – это минералогия руды, как природного минерального агрегата, включающего как рудные, так и нерудные минералы, учитывающая особенности их структур и текстур, химического состава, что в совокупности зависит от условий образования и определяется генетическим типом месторождения.

Руды черных металлов

Железо (Fe)

К геохимии железа. Железо в минералах имеет переменную степень окисленности – +2 и +3, соответственно заряды ионов – Fe^{2+} и Fe^{3+} . Минералы, содержащие железо в низкой степени окисленности (Fe^{2+}) образуются при недостатке кислорода. Такие условия наиболее характерны для эндогенных процессов. Минералы Fe^{3+} образуются при избытке кислорода и характеризуют окислительную обстановку, которая может возникать как в эндогенных, так и в экзогенных процессах. Ионные радиусы Fe^{2+} близки с ионными радиусами Mg^{2+} , а Fe^{3+} – с Al^{3+} , Cr^{3+} , V^{3+} . Поэтому в промышленных минералах железа наблюдаются соответствующие изоморфные примеси.

Требования к руде. Минимальные промышленные содержания металла в рудах 14-25 %. Выделяются природные богатые руды (мартееновские и доменные) с содержанием железа около 60 % и бедные, требующие обогащения. Среди последних различают легко- и труднообогащаемые. К легкообогащаемым относятся руды преимущественно магнетитового состава. К труднообогащаемым – руды, в которых железо представлено тонкодисперсными или коллоидными формами, чаще это руды гематитового состава.

Вредными компонентами руд являются сера, фосфор и цветные металлы (Cu, Pb, Zn). При характеристике железных руд качественными показателями являются содержание и доля нерудных компонентов – шлакообразующих примесей, таких, как кремнезем, для оценки содержания которого рассчитывается *кремниевый модуль*, который равен отношению оксида кремния к оксиду алюминия и не должен превышать 2 ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 \leq 2$). Важным качественным показателем железных руд является также коэффициент основности (КО), определяемый как отношение суммы оксидов кальция и магния к сумме оксидов алюминия и кремния ($\text{КО} = \text{CaO} + \text{MgO} / \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$). При значении $\text{КО} < 0,7$ руды считаются кислыми и требуют введения флюса в виде известняка. Лучшими считаются руды с $\text{КО} = 0,7-1,1$, их называют самофлюсующимися. Руды с $\text{КО} > 1,1$ относят к основным.

К минералогии железных руд. Промышленными минералами железа являются оксиды (магнетит – 72,4 % Fe, гематит – 70 % Fe), гидроксиды (гетит, гидрогетит – 48-63 % Fe), в меньшей мере карбонаты (сидерит, сидероплезит – 45-48 % Fe) и алюмосиликаты со сложной структурой (лептохлориты – шамозит, тюрингит – 27-28 % Fe).

Общие замечания по условиям образования промышленных минералов железа. При характеристике промышленных минералов железа следует обращать внимание на степень окисленности Fe, которая определяется условиями их образования.

В магнетите $\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_4$ железо одновременно имеет 2 степени окисленности в том числе низшую. Поэтому магнетит образуется в промышленных количествах только в эндогенных процессах, при недостатке кислорода. Магнетит, как и все шпинелиды, к которым он относится, характерен в основном для наиболее высокотемпературных эндогенных процессов, таких как магматический, метаморфический, скарновый. Имея в составе Fe^{2+} , магнетит в экзогенных условиях окисляется. Однако процесс окисления оксидов с Fe^{2+} (магнетита и ильменита) протекает намного медленнее, чем кислородных солей с Fe^{2+} (например, сидерита) потому, что в оксидах связь $\text{Fe}^{2+}-\text{O}^{2-}$ значительно прочнее (железо напрямую взаимодействует с кислородом), чем связь Fe^{2+} -радикал $[\text{CO}_3]^{2-}$ (железо взаимодействует с ионной группой). Поэтому магнетит и ильменит в поверхностных условиях оказываются достаточно устойчивыми в отличие от сидерита и даже могут накапливаться в россыпях. В



Рис. Магнетитовая железная руда (магнитный железняк)

геологическом же времени при длительном нахождении в окислительной обстановке при наличии воды оксиды железа переходят в гетит и гидрогетит.

Весьма показательно, что в отличие от гематита магнетит – минерал с высокой изоморфной емкостью и ярко выраженным типохимизмом. Поэтому попутные ценные компоненты железных руд оказываются связаны в основном с магнетитом. Поэтому магнетитовые руды каждый генетический тип магнетитовых месторождений характеризуется индивидуальным комплексом попутных ценных компонентов, что может рассматриваться в качестве индикатора условий образования.

Существенно магнетитовые руды относятся к категории легкообогатимых.

Гематит ($\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_3$) как и магнетит промышленные концентрации образует в основном в эндогенных процессах и часто совместно с ним. Однако его образование требует более высокого потенциала кислорода. В ходе минералообразования при повышении потенциала кислорода может происходить замещение гематитом магнетита с образованием псевдоморфоз.



Рис. Гематитовая руда сланцеватой текстуры (красный железняк)

Псевдоморфозы гематита по магнетиту носят название мартита, а процесс замещения магнетита гематитом – *мартитизацией*. Мартитизация может протекать как в эндогенных, так и в экзогенных условиях. Противоположный процесс замещения гематита магнетитом назван мушкетовитизацией, а сами псевдоморфозы магнетита по гематиту – *мушкетовитом*. Изоморфная емкость гематита невелика, поэтому он практически не является носителем попутных ценных компонентов руд.

В условиях дневной поверхности при недостатке влаги гематит устойчив (Fe^{3+}), при избытке – гидратируется, переходя вначале в гидрогематит ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), затем в гётит и гидрогётит. Гематитовые руды, представленные тонкочешуйчатыми, порошковатыми или землистыми агрегатами, относятся к труднообогатимым.

Сидерит $\text{Fe}[\text{CO}_3]$ – карбонат Fe^{2+} , *лептохлориты* – алюмосиликаты Fe^{2+} образуются при недостатке кислорода и могут возникать как в эндогенных, так и в экзогенных процессах. Однако промышленные скопления и сидерита, и лептохлоритов формируются преимущественно в экзогенных условиях и безусловно при недостатке кислорода (Fe^{2+} !). Такие условия возникает в морях и океанах на некоторой глубине при ограниченном доступе кислорода воздуха. Поэтому месторождения сидерита и лептохлоритов часто с крупными запасами представляют собой *осадочные карбонатные и силикатные железные руды*.

И сидерит, и лептохлориты неустойчивы в условиях дневной поверхности, легко окисляясь, они переходят в гётит-гидрогётитовые.

В гидроксидах *гётите* – $\text{FeO}(\text{OH})$ и *гидрогётите* – $\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$ железо находится в высшей степени окисленности – Fe^{3+} . По сравнению с гематитом, образующимся в окислительной обстановке, но с недостатком влаги, гидроксиды железа характерны для условий с избыточной влажностью. Оба минерала являются конечными продуктами существования железа в условиях земной поверхности. Гётит и гидрогётит являются основными компонентами «железных шляп», возникающих при окислении эндогенных и осадочных железных и сульфидных руд, а также при выветривании ультраосновных и отчасти основных пород богатых железом. Показательно, что при выветривании ультраосновных пород



Рис. Гётит-гидрогётитовая железная руда (бурый железняк)

возникают так называемые *самолигирующиеся бурожелезняковые руды*, в которых присутствует комплекс элементов-примесей, вводимых специально в качестве лигирующих добавок при получении сталей с особыми прочностными характеристиками. Такими природными лигирующими компонентами в бурожелезняковых рудах являются перешедшие из ультраосновных пород Cr, Ni, Mn, Co и некоторые др. элементы.

Железные руды принято называть железняками. Руды, состоящие в основном из магнетита получили название магнитных железняков, из гематита – красных железняков, из гётита и гидрогётита – бурых железняков. Нетрудно заметить, что в названии отражены основные диагностические свойства каждого рудного минерала.

Показательно, что *сульфиды железа (пирротин и пирит) не являются промышленными минералами железа*, они выступают в качестве химического сырья при получении серной кислоты. Пирит в качестве рудного минерала рассматривается лишь тогда, когда он становится носителем Co или Au, которые могут присутствовать в нем в виде примесей. В некоторых генетических типах руд в том числе и железных руд.

Генетические типы месторождений железных руд весьма разнообразны и представлены как эндогенной, так и экзогенной группами. Минеральный состав железных руд определяется окислительно-восстановительными, а также термо-динамическими условиями рудообразования. Сказанное выше дает представление о генетических предпочтениях каждого промышленного минерала железа и позволяет для каждого генетического типа железных руд выделить главные промышленные минералы.

Магматические железные руды, связанные с комплексом основных и ультраосновных пород габбро-анортозитовой формации, являются комплексными *железо-титан-ванадиевыми* (Fe-Ti-V), содержащими в качестве попутных ценных компонентов платиноиды. Главными рудными минералами в них выступает магнетит (обычно титаномagnetит) и ильменит, образующий вставки или решетчатые структуры распада в магнетите. Формой нахождения ванадия в этих рудах является либо его изоморфная примесь в магнетите (близость ионных радиусов Fe^{3+} и V^{3+}), либо реже собственная минеральная фаза – кульсонит ($Fe^{2+}V^{3+}_2O_4$), относящийся к группе шпинелидов.

В карбонатитовых месторождениях главным и практически единственным рудным минералом железа является магнетит. Карбонатиты, представляющие собой эндогенные скопления карбонатов, входящие в комплекс щелочных ультраосновных пород, оказываются обогащены Ti, Nb, Ta, Zr, Sc и редкоземельными элементами. Руды комплексные с попутным извлечением апатита и бадделеита ZrO_2 .

В известково-скарновых месторождениях главными рудными минералами являются магнетит и гематит, в том числе и мартит. Промышленные запасы магнетита формируются при высокой температуре в конце стадии сухих скарнов после гранатов и пироксенов. Возможно и более позднее образование магнетита, но не в столь большом количестве. Гематит образуется уже в стадию водных скарнов при повышении потенциала кислорода минералобразующей среды. Причем в рудах часто присутствуют минералы цветных металлов, в основном Cu и Co, образующиеся также в гидротермальную стадию скарнового процесса. Их собственные минеральные фазы обычно представлены сульфидами (халькопиритом, Сопиритом и др.). При достаточном содержании Cu и Co могут выступать в качестве попутных ценных компонентов скарновых железных руд. При невысоком содержании цветные металлы и сера становятся вредными примесями железных руд. В качестве попутного ценного компонента скарновые магнетитовые руды часто содержат самородное золото. Таким образом, попутными ценными компонентами в известково-скарновых рудах могут быть Cu, Au и Co.

Вулканогенные гидротермальные месторождения, генетически связанные с породами трапповой формации, в качестве главного рудного минерала содержат магномagnetит, а в качестве второстепенного – гематит. Вмещающие терригенно-карбонатные породы интен-

сивно метасоматически изменены с образованием скарноподобных метасоматитов, главными минералами которых являются гранат кальциевого ряда, диопсид, хлорит и др.

Руды вулканогенно-осадочного генезиса являются комплексными Fe-Mn и в качестве главного рудного минерала железа содержат гематит, в меньшем количестве магнетит и сидерит. Они часто связаны с породами спилит-кератофировой формации, включающими прослой яшм и яшмоидов. Минералы марганца представлены оксидами и гидроксидами. В рудах в небольшом количестве присутствуют сульфиды (пирит, арсенопирит, сфалерит, галенит, халькопирит). В пределах месторождений руды железа и марганца бывают пространственно разобщены.



Рис. Гематит-магнетитовые руды сланцеватой текстуры железистых кварцитов Лебединского месторождения (КМА)

Метаморфогенные месторождения среди пород зеленосланцевой и амфиболитовой фаций представлены железистыми кварцитами, главными рудными минералами которых являются магнетит и гематит, в резко подчиненном количестве в них может присутствовать сидерит (рис.). Магнетит железистых кварцитов, практически лишен примесей. В этом усматриваются две причины. Во-первых, не отличающийся разнообразием химический состав исходных метаморфизирующихся железисто-кремнистых осадков, а во-вторых, ограниченность изоморфных замещений в

условиях метаморфизма, когда изоморфное замещение становится возможным лишь для тех элементов, вхождение которых сопровождается выигрышем в объеме. В случае магнетита при образовании железистых кварцитов таким элементом становится Ge, который и может стать попутным ценным компонентом железистых кварцитов.

Экзогенная группа месторождений железных руд представлена месторождениями выветривания и осадочными.



Рис. Действующий карьер по отработке железных руд одного из месторождений КМА (Курской магнитной аномалии, Европейская часть России)

Руды осадочного генезиса по составу относятся к гетит-гидрогематит-сидерит-лептохлоритовым. В процессе осадконакопления при удалении от береговой линии в глубь водоема происходит последовательная смена минерального состава осадочных железных руд от гидроксидных вблизи берега на карбонатные и далее на силикатные на глубине. В морских осадочных рудах комплекс попутных ценных компонентов ограничен присутствием марганца, небольшого количества ванадия и редко германия. Ванадий и германий при этом оказываются часто связанными с органикой.

Известны карбонатные железные руды существенно сидеритового состава в карбонатно-терригенных отложениях, относительно условий образования которых мнения несколько расходятся. Часть исследователей считает их обычными осадочными, часть же рассматривает их как гидрогенно-инфильтрационные или гидротермально-метасоматическими.

Руды месторождений выветривания по минеральному составу являются гетит-гидрогетитовыми (бурожелезняковыми). Они могут содержать мартит-гидрогетитовые, гетит-гидрогетит-гидрогематитовые зоны. Формируются они за счет выветривания осадочных и эндогенных руд любого генезиса.

В особую группу выделяются месторождения бурых железняков, сформированные за счет выветривания ультраосновных и основных пород, – так называемые *самолигирующие бурожелезняковые руды*. По минеральному составу это гетит-гидрогетитовые руды в составе которых присутствуют такие элементы как Cr, Ni, Mn, Co.

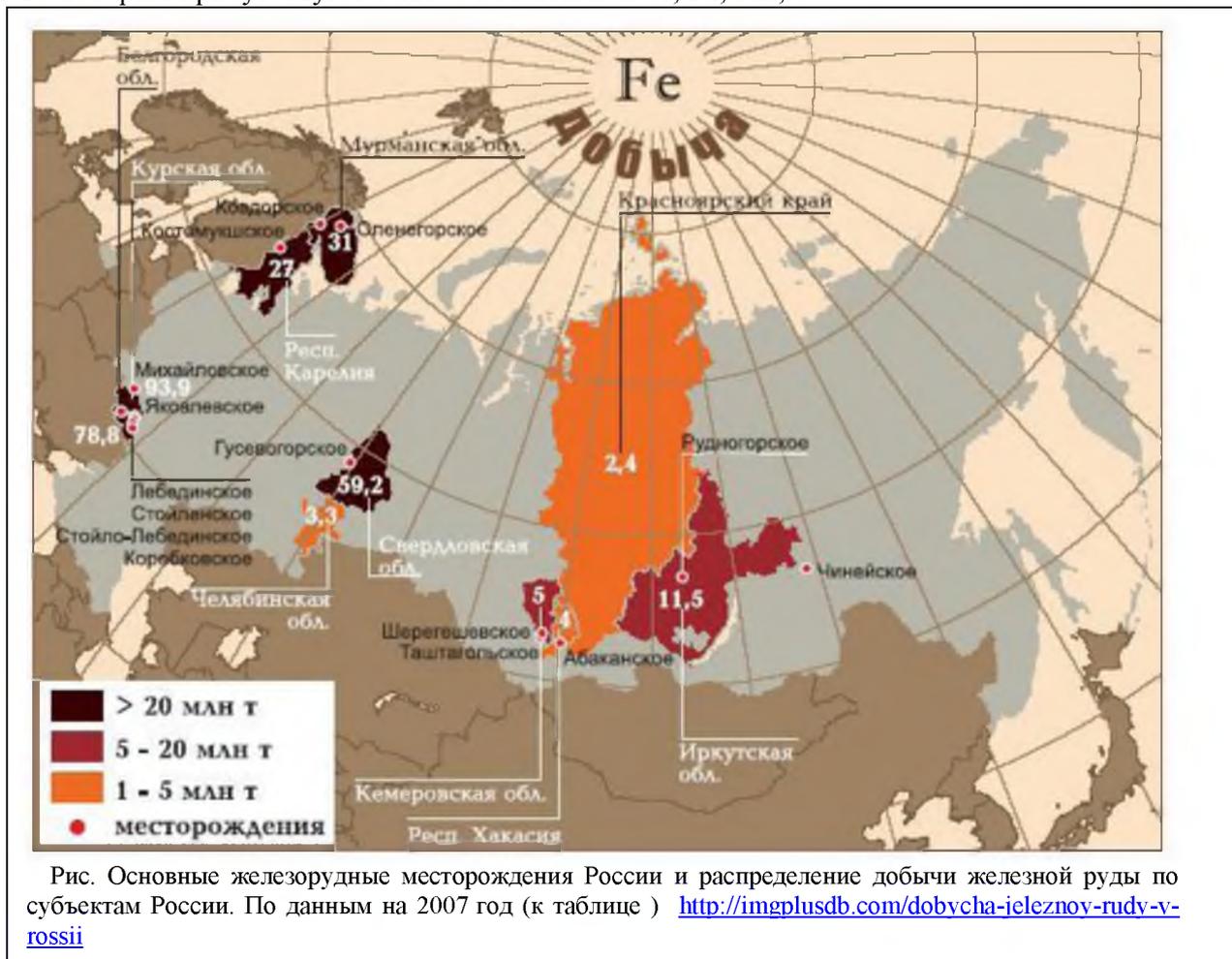


Рис. Основные железорудные месторождения России и распределение добычи железной руды по субъектам России. По данным на 2007 год (к таблице) <http://imgplusdb.com/dobycha-jeleznov-rudv-v-rossii>

Структуры и текстуры железных руд. Руда, представляет собой естественный природный минеральный агрегат, содержащий не только рудные, но и нерудные минералы (таблица). В каждом генетическом типе руд имеется характерный комплекс нерудных минералов, который может оказывать влияние на качество руд. Качественная характеристика руд будет неполной без учета их структур и текстур и сопутствующего комплекса нерудных

минералов. Структуры и текстуры руд в каждом генетическом типе, отражая условия протекания процессов, различны и в некотором смысле типоморфны. Так для руд магматического и скарнового генезиса характерны зернистые структуры, вкрапленные до массивных (сплошных) текстуры. Для руд метаморфического генезиса обычны сланцеватые текстуры и зернистые структуры. А для экзогенных руд «железных шляп» – порошокватые, землистые, натечные текстуры. Для руд морского осадочного генезиса наиболее характерны оолитовые текстуры.

Вопросы для самоконтроля

1. Названия и формулы промышленных минералов Fe эндогенных руд.
2. Минеральный состав силикатных железных руд, условия их образования.
3. Рудные, нерудные минералы магматических железных руд. Комплексность этих руд. Формы нахождения всех ценных компонентов в этих рудах.
4. Промышленные минералы Fe известково-скарновых руд, время выделения каждого из них в скарновом процессе.
5. Минеральный состав осадочных железных руд и их фациальная изменчивость относительно береговой линии.
6. Названия и формулы рудных минералов Fe в экзогенных рудах.
7. Попутные ценные компоненты карбонатитовых руд. Причины столь необычного их набора.
8. Состав и условия образования самолегирующихся железных руд.
9. Минеральный состав и условия образования железистых кварцитов. Причина их бедности попутными ценными компонентами.

Марганец (Mn)

К геохимии марганца. Марганец – элемент с переменной валентностью. В природе встречаются минералы, содержащие Mn в степени окисленности – +2, +3, +4, соответственно с зарядами катионов Mn^{2+} , Mn^{3+} , Mn^{4+} . Наиболее распространены соединения Mn^{2+} и Mn^{4+} . Минералы марганца, как и минералы железа, образуются в широком диапазоне окислительно-восстановительных условий. Минералы Mn^{2+} образуются в условиях недостатка кислорода, в то время как минералы с Mn^{4+} – в условиях его избытка.

Требования к руде. В отечественной металлургии используются руды с содержанием марганца 30-36%. Кроме металлургической промышленности минералы марганца используются как химическое сырье. Минимальные промышленные содержания марганца в легкообогатимых рудах (окисленные и оксидные) – 10%, в труднообогатимых (карбонатные) – 20 %.

Вредным компонентом руд является фосфор.

К минералогии марганцевых руд. Наибольшее промышленное значение имеют минералы марганца, относимые к оксидам (пирролюзит, вернадит, псиломелан, гаусманит), оксисиликат (браунит) и гидроксид (манганит). Меньшее промышленное значение имеют карбонаты марганца (марганцовистый кальцит, олигонит, родохрозит). Марганцевый шпинелид (якобсит) и водосодержащие оксиды (тодорокит и бернессит) могут рассматриваться только как второстепенные или даже редкие промышленные минералы. Тодорокит и бернессит приобретают заметное, если не основное, значение лишь в глубоководных железомарганцевых конкрециях. Силикат двухвалентного марганца – родонит, в настоящее время в качестве рудного минерала не рассматривается. Он находит



Рис. Агрегат пирролюзита (полианита), гетита, гидрогетита.

применение только как ювелирно-поделочный камень. Родонит вместе с родохрозитом и

другими силикатами марганца (бустамитом $(\text{Mn,Ca})_3[\text{Si}_3\text{O}_9]$, спессартином образует крупные скопления в метаморфических породах, при выветривании и окислении которых формируются богатые «марганцевые шляпы», состоящие из оксидов и гидроксидов одновременно двух- и четырехвалентного марганца, имеющие промышленное значение (рис.). Так что к минералогии руд марганца родонит имеет лишь опосредованное отношение.



Рис. Родонит метаморфических пород с продуктами окисления в виде дендритов черного пиролюзита, развивающихся по трещинам

Содержание марганца в промышленных оксидах и гидроксидах составляет порядка 50-60 %, в карбонатах снижается до 30-7 %.

Следует помнить, что марганец – сильный элемент-хромофор. Причем его разные валентные формы являются причиной весьма контрастной окраски марганцевых минералов. Кислородные соединения Mn^{2+} окрашены часто в яркий розовый цвет (рис.), а Mn^{4+} – в иссиня-черный (рис.). Оксиды марганца не притягивают магнитную стрелку. Это можно использовать при диагностике марганцевых минералов.

Общие замечания по условиям образования рудных минералов марганца. Оксиды марганца, содержащие одновременно Mn^{2+} и Mn^{3+} (браунит, гаусманит) образуются в основном в эндогенных процессах при некотором недостатке кислорода. Они являются главными промышленными минералами немногочисленных вулканогенно-осадочных и метаморфизованных месторождений марганцевых руд, в которых совместно с ними могут присутствовать также карбонаты Mn^{2+} . В окислительной обстановке в экзогенных условиях минералы Mn^{2+} и Mn^{3+} неустойчивы и переходят в оксиды Mn^{4+} (пиролюзит и вернадит) или в минералы с одновременным содержанием Mn^{2+} (малое количество недоокисленного марганца) и Mn^{4+} (псиломелан).

Карбонаты Mn^{2+} являются второстепенными в эндогенных вулканогенно-осадочных рудах, в основном они связаны с экзогенными рудами. В экзогенных процессах их образование предполагает недостаток кислорода (Mn^{2+} !),



Рис. Натечные агрегаты иссиня-черного пиролюзита – основного промышленного минерала марганца. Окисленные марганцевые руды

чему соответствуют условия морского осадконакопления в области шельфа при удалении от береговой линии, в которых и формируются осадочные карбонатные марганцевые руды.

Минералы Mn^{4+} (пиролюзит, вернадит), а также минералы одновременно содержащие Mn^{4+} и недоокисленный Mn^{2+} (псиломелан и манганит) промышленные скопления образуют только в окислительной обстановке в экзогенных процессах. Оксиды, гидроксиды Mn^{4+} являются конечными формами существования марганца в природе.

Принятая геолого-промышленная типизация марганцевых руд учитывает класс соединений минералов марганца и в определенной мере условия их образования. Выделяются следующие типы марганцевых руд: оксидные, смешанные (оксидно-карбонатные), карбонатные и окисленные. Название последних (окисленные) акцентирует внимание на условиях их образования, хотя с учетом класса соединений минералов они являются оксидными. Наибольшее же промышленное значение имеют оксидные руды.

Оксидные руды – руды, в которых главными рудными минералами являются оксиды и гидроксиды марганца (пиролюзит, псиломелан, манганит). Свое название они получили по ведущему классу соединений промышленных минералов. Руды характеризуются высоким содержанием марганца (более 25 %) и относятся к легко обогатимым. Среди них особо

выделяют пероксидные (сверхоксидные) руды, основным рудным минералом которых является пиролюзит MnO_2 . Оксидные руды встречаются среди руд осадочного генезиса.

Карбонатные руды, также названные по ведущему классу соединений промышленных минералов, содержат марганец в количестве не более 25 % и сложены преимущественно карбонатами Mn^{2+} (марганцовистым кальцитом, олигонитом, родохрозитом). Эти руды наиболее характерны для осадочных руд.

Оксидно-карбонатные руды сложены как оксидами, так и карбонатами марганца при содержании Mn около 25 %. В этом случае оксиды представлены браунитом и гаусманитом. Руды такого состава обычны в вулканогенно-осадочных объектах.

Окисленные руды – образуются в результате окисления руд, сложенных карбонатами, силикатами марганца, а также браунитом и гаусманитом, при выходе их в условия дневной поверхности. Окисленные руды формируют так называемые «марганцевые шляпы». Они состоят из оксидов и гидроксидов Mn^{4+} (пиролюзита, вернадита), минералов с одновременным присутствием Mn^{2+} и Mn^{4+} (псиломелана), и характеризуются содержанием марганца более 40 %. Поскольку главными промышленными минералами окисленных руд являются пиролюзит и псиломелан, они могут рассматриваться как пероксидные. Именно в окисленных рудах могут присутствовать разновидности псиломелана асболан с примесью кобальта (Со-псиломелан) и тунгомелан с примесью вольфрама (W-псиломелан). Несмотря на то, что по составу окисленные руды являются тоже оксидными, от собственно оксидных они отличаются условиями образования.



являются пиролюзит и псиломелан, они могут рассматриваться как пероксидные. Именно в окисленных рудах могут присутствовать разновидности псиломелана асболан с примесью кобальта (Со-псиломелан) и тунгомелан с примесью вольфрама (W-псиломелан). Несмотря на то, что по составу окисленные руды являются тоже оксидными, от собственно оксидных они отличаются условиями образования.

Марганцевые руды, прежде всего, оксидного типа часто относятся к монометалльным. К комплексным принадлежат только не крупные по запасам вулканогенно-осадочные месторождения (Mn-Fe руды) и некоторые окисленные псиломелан-пиролюзитовые

руды с асболаном (Mn-Co руды) и/или с тунгомеланом (Mn-W руды).

Генетические типы месторождений марганцевых руд. Разнообразие генетических типов месторождений марганцевых руд невелико. Большинство месторождений марганцевых руд являются продуктами экзогенных процессов, формируя крупные по запасам осадочные месторождения или более мелкие месторождения «марганцевых шляп».

Морские осадочные марганцевые руды формируются в основном в зоне шельфа или реже в лагунных условиях. Для них характерен оксидно-карбонатный состав. Основными промышленными минералами в них являются пиролюзит, псиломелан, манганит и карбонаты марганца. По сравнению с осадочными рудами железа марганцевые руды образуются на большем удалении от береговой линии в более глубоких условиях шельфа. Как и осадочные руды железа, марганцевые осадочные руды являются практически монометалльными. Они могут содержать небольшое количество Ge и V, присутствие которых объясняется повышенной ролью органики в процессе осадкообразования. Иногда области отложения руд железа и марганца перекрываются и тогда руды могут приобретать Fe-Mn состав. Как и для осадочных руд железа для них характерно оолитовое строение.

Известны немногочисленные *вулканогенно-осадочные месторождения* часто комплексных Fe-Mn руд. Они связаны с породами спилит-кератофировой формации, включающими прослойки яшм и яшмоидов. Минералы марганца представлены оксидами (браунит, гаусманит) в меньшей мере карбонатами (марганцовистый кальцит, родохрозит, олигонит). В рудах в небольшом количестве присутствуют сульфиды (пирит, арсенопирит, сфалерит, галенит, халькопирит). Руды относятся к оксидно-карбонатному геолого-промышленному

типу. В пределах месторождений руды железа и марганца бывают пространственно разбросаны.

Месторождения выветривания представлены «марганцевыми шляпами», возникающими за счет выветривания вулканогенно-осадочных руд и метаморфогенных силикатно-карбонатных пород, содержащих карбонаты и силикаты марганца (Mn^{2+}). Именно месторождения выветривания представлены геолого-промышленным типом окисленных руд. Основными промышленными минералами Mn в них являются пиролюзит в виде плотных сплошных масс и в виде его разновидности полианита (явно кристаллического с сильным блеском) и псиломелан и иногда его разновидности по составу (асболан и тунгомелан).

Метаморфические породы зеленосланцевой, амфиболитовой и гранулитовой фаций метаморфизма с высоким содержанием марганца, представленного силикатом Mn^{2+} – родонитом, в меньшем количестве гаусманитом, браунитом и силикатами Mn^{2+} тефроитом $Mn_2[SiO_4]$, спессартином и бустамитом $(Mn,Ca)_3[Si_3O_9]$, карбонатами марганца (марганцовистым кальцитом, родохрозитом), промышленного интереса как руда на марганец не представляют, они рассматриваются как месторождения ювелирно-поделочного камня (родонита). Однако при выходе на дневную поверхность за счет них формируются богатые окисленные марганцевые руды, уже имеющие промышленное значение.

Весьма перспективны *глубоководные железомарганцевые конкреции (ЖМК)* и железомарганцевые корки, покрывающие большие площади дна практически всех океанов. Основными промышленными минералами марганца в них являются бернессит и торокит. Железо-марганцевые конкреции и корки являются исключительно комплексными рудами, основными компонентами которых являются Fe, Mn, Ni, Co, Cu и др. В них присутствуют в промышленных количествах Mo, V, РЗЭ, платиноиды, Au, Ag и др., всего порядка 18 элементов. Все эти элементы могут представлять промышленную ценность



Рис. Фрагменты глубоководных железомарганцевых конкреций (ЖМК)

Основными промышленными минералами марганца в них являются бернессит и торокит. Железо-марганцевые конкреции и корки являются исключительно комплексными рудами, основными компонентами которых являются Fe, Mn, Ni, Co, Cu и др. В них присутствуют в промышленных количествах Mo, V, РЗЭ, платиноиды, Au, Ag и др., всего порядка 18 элементов. Все эти элементы могут представлять промышленную ценность

железо-марганцевых конкреций и корок. Такое обилие извлекаемых металлов связано с их поступлением в придонную часть океанов с глубины по глубинным разломам. Именно сложностью химического состава железомарганцевые конкреции отличаются от осадочных марганцевых руд зоны шельфа, которые, как уже говорилось, являются практически монометалльными. Запасы железомарганцевых конкреций и корок колоссальные и могут обеспечить потребности человечества в металлах на протяжении многих тысячелетий. Однако их добыча пока производится только в некоторых странах ввиду технической сложности, трудоемкости и затратности этого процесса, поскольку их нахождение связано с глубинами 500-7000 м. Пока ЖМК и железомарганцевые корки могут рассматриваться как руды будущего.

Таким образом, месторождения марганцевых руд отличаются ограниченностью генетических типов. Основным генетическим типом являются морские осадочные руды зоны шельфа, меньшее значение имеют месторождения выветривания («марганцевые шляпы»), немногочисленные вулканогенно-осадочные месторождения и как руды будущего – глубоководные железомарганцевые конкреции.

Структуры и текстуры руд. Поскольку большинство промышленных руд марганца относятся к экзогенным продуктам, для них наиболее типичны плотные текстуры в сочетании с ноздреватыми, натечными, пористыми, губчатыми, а также порошковатыми, земли-

Большинство руд титана относится к комплексным. Наиболее типичные *попутные ценные компоненты* в рудах различного генезиса V, Sc, Zr, Ta, Nb, TR.

К минералогии руд. Главными промышленными минералами титана являются оксиды – рутил (88,6-98,2% TiO_2), ильменит (34,4-68,2% TiO_2), лейкоксен – продукт экзогенного изменения сфена и ильменита (47% TiO_2 в лейкоксене по сфену, 97% TiO_2 – по ильмениту). Анатаз TiO_2 имеет существенно меньшее промышленное значение. Рутил и анатаз являются



полиморфными модификациями диоксида титана TiO_2 с ильменитом всех генетических типов месторождений связаны промышленные содержания Sc и V, а с рутилом из россыпей – Ta, Nb, V. При комплексной переработке руд некоторых генетических типов месторождений титан извлекается попутно из титаносодержащих минералов (лопарита, титаномагнетита). Силикат титана – сфен пока рассматривается в качестве потенциального промышленного минерала. Лишь при его высоком содержании в породе и благоприятной экономической ситуации он становится извлекаемым рудным минералом титана. К потенциальным промышленным минералам относится также сложный оксид титана – перовскит. Технология извлечения титана из перовскита и сфена пока остается сложной и дорогостоящей.

Генетические типы месторождений руд титана. Коренные месторождения руд титана в основном относятся к магматическим. Среди них выделяют *позднемагматические*



руды пространственно и генетически связанные с основными магматическими породами габбро-анортозитовой формации. По минеральному составу они могут быть титаномагнетитовыми, ильменит-титаномагнетитовыми, реже апатит-ильменитовыми. Часто руды являются комплексными железо-титан-ванадиевыми (Fe-Ti-V). Они описаны в связи с минералогией руд железа.

В отдельных регионах России (Хибины, Кольский полуостров) известны *щелочные магматические породы* с содержанием сфена до 80-90 %. Эти породы, называемые сфенитами, образуют крупные запасы, что позволило рассматривать сфен в этом случае в качестве потенциального промышленного минерала титана.

В *малиньитах* – темных мелкозернистых щелочных магматических породах (Ловозерские тундры, Кольский полуостров) носителями титана являются сложные оксиды лопарит вместе с перовскитом, где содержания и запасы допускают использование их в качестве рудных минералов для извлечения не только титана, но и Nb и редкоземельных элементов.

Магматические породы, содержащие в качестве акцессорных минералов ильменит, рутил и анатаз, при выветривании могут стать источниками для формирования титаноносных россыпей. Появление рутила или анатаза в магматических породах связано с режимом железа в минералообразующей среде. Известно, что рутил образуется при наличии в минералообразующей среде железа, а анатаз – при его отсутствии. Рутил кроме того является типичным минералом некоторых метаморфических пород, которые при достаточном содержании рутила могут стать рудами на титан, а также могут выступать в качестве коренных источников при формировании россыпных месторождений титана.

Минералы титана устойчивы в поверхностных условиях и способны накапливаться в россыпях, образуя значительные по запасам россыпные месторождения, часто попадающие в категорию сверхкрупных. Высокие средние содержания ценного компонента в совокупности с низкими экономическими затратами при отработке россыпных месторождений делают их среди промышленных объектов наиболее значимыми. Среди россыпных месторождений различают ископаемые и современные прибрежно-морские и континентальные. Часто в россыпных месторождениях в качестве одного из основных промышленных компонентов становится лейкоксен. Лейкоксен с условной формулой $TiO_2 \cdot nH_2O$ представляет собой вторичный продукт (обычно продукт выветривания) по ильмениту и сфену.



Рис. Окатанные зерна ильменита из россыпи

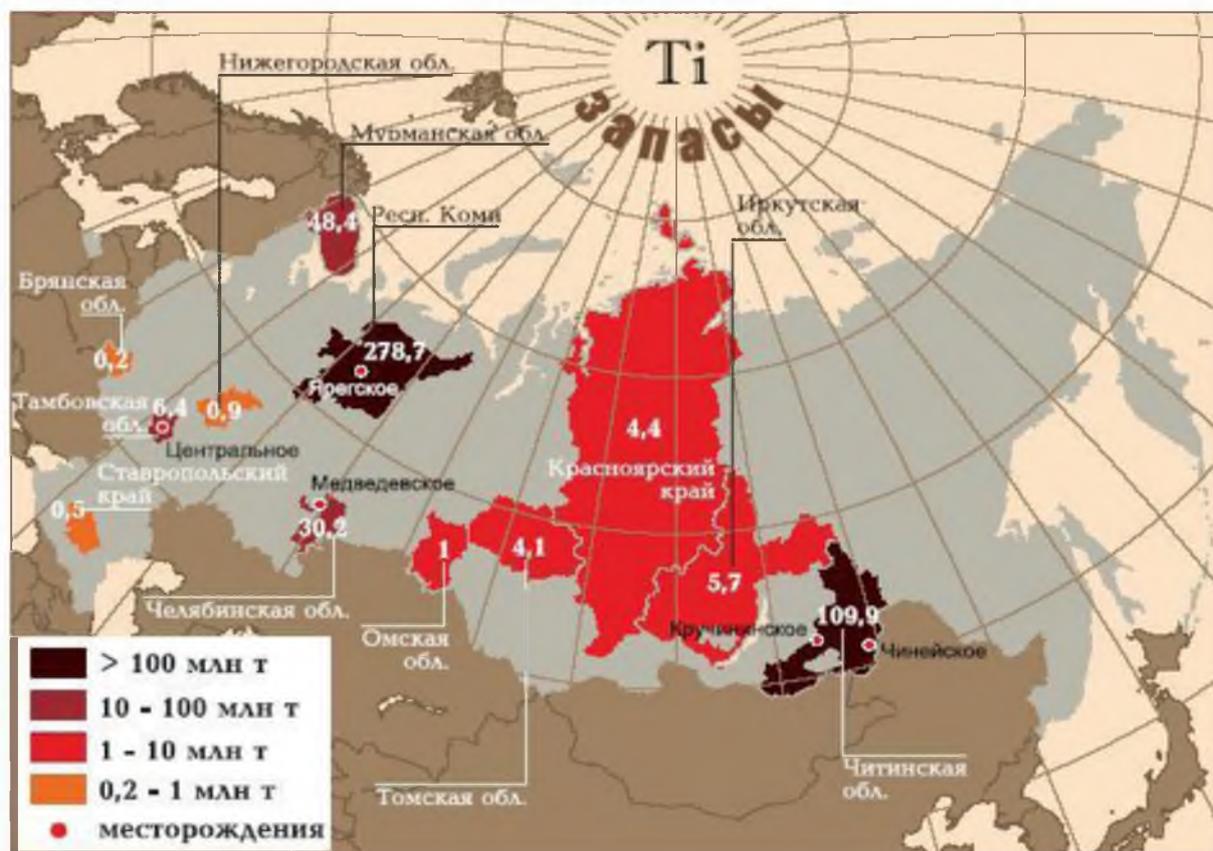


Рис. Распределение запасов руд титана по субъектам России. По данным на 2007г. (к таблице) <http://mineral.ru/Facts/russia/131/296/index.html7>

Прибрежно-морские комплексные титан-циркониевые россыпи часто с редкими землями по минеральному составу являются рутил-ильменит-лейкоксен-циркон-монацитовыми. Континентальные существенно ильменитовые россыпи формируются за счет кор выветривания по габброидам.

Континентальные россыпи, сформированные за счет продуктов выветривания щелочных, щелочно-ультраосновных пород и связанных с ними карбонатитов, кроме ильменита содержат лопарит и перовскит. Однако пока из таких россыпей извлекаются только ильменит и лопарит. Руды комплексные благодаря присутствию в них ниобия, тантала и редких земель, элементов весьма характерных для щелочных ультраосновных пород с карбонатитами. Среди всех генетических типов месторождений титана (магматических, карбонатитовых, метаморфических, вулканогенно-осадочных) россыпи имеют основное экономическое значение. Примерно 70 % титана извлекается из россыпных месторождений.

Вопросы для самоконтроля

1. Условия образования и минеральный состав эндогенных комплексных Fe-Ti-V руд. Форма нахождения титана в этих рудах.
2. Состав лейкоксена. В каких генетических типах месторождений лейкоксен представляет основную промышленную ценность руд.
3. Промышленное значение лопарита и перовскита. С какими эндогенными образованиями они связаны.
4. Минеральный состав и комплексность прибрежно-морских россыпей.
5. Какова промышленная ценность сфена, его условия образования.

Хром (Cr)

К геохимии хрома. В минералогии хром проявляет степень окисленности +3. Ионный радиус Cr^{3+} близок с ионными радиусами Fe^{3+} и Al^{3+} , благодаря чему в хромшпинелидах Cr^{3+} изоморфно замещается Fe^{3+} и Al^{3+} . Хром – элемент геохимически тесно связанный с ультраосновным магматизмом, по сути типоморфный элемент ультраосновных пород. Поэтому промышленные концентрации руд хрома связаны исключительно с ультраосновными магматическими породами.

Требования к руде. Руды хрома потребляются металлургической, химической и огнеупорной промышленностью, каждая из которых предъявляет к ним свои требования. Промышленная ценность руд для металлургической промышленности определяется содержанием Cr_2O_3 более 45%. Для химической и огнеупорной промышленности эти значения ниже. Отечественная промышленность использует руды хрома без обогащения.

Вредные компоненты руд S и P. Существуют ограничения по содержанию CaO, FeO (Fe общее – $Cr_2O_3/FeO \geq 3$); SiO_2 (менее 10%).

К минералогии руд хрома. Из немногочисленных минералов хрома промышленное значение имеют только хромшпинелиды, содержание Cr_2O_3 в которых колеблется в широком диапазоне значений от 18 до 65%. Содержание же хромшпинелидов в рудах составляет от 30% в бедных до 90% и выше в богатых сплошных. Среди хромшпинелидов широко распространен изоморфизм, поэтому состав минералов подгруппы хромшпинелидов может быть представлен общей формулой – $(Mg,Fe)^{2+}(Cr,Al,Fe)^{3+}_2O_4$. В подгруппе хромшпинелидов с учетом состава выделяют: магнохромит – $(Mg,Fe)Cr_2O_4$, собственно хромит – $FeCr_2O_4$ алюмохромит – $(Fe,Mg)(Cr,Al)_2O_4$, хромпикотит – $(Mg,Fe)(Cr,Al)_2O_4$ и субферрихромит – $(Fe,Mg)(Cr, Fe)_2O_4$. Основными промышленными минералами хрома в отечественных месторождениях являются магнохромит $(Mg,Fe)Cr_2O_4$ и алюмохромит $(Fe,Mg)(Cr,Al)_2O_4$. Очень часто все хромшпинелиды в рудах хрома независимо от их конкретного химического состава объединяют общим термином хромит, хотя корректнее использовать при этом тер-

Структуры и текстуры руд. Руды хрома характеризуются зернистой структурой, густовкрапленной до сплошной текстурами. Весьма характерно для руд хрома хорошо узнаваемое нодулярное строение агрегатов, которое проявляется в том, что на фоне обычно серпентинизированного агрегата ультраосновных пород четко выделяются различные по величине округлые образования (нодулы), сложенные хромшпинелидами. Отмечаются и полосчатые текстуры хромитовых руд (рис.).

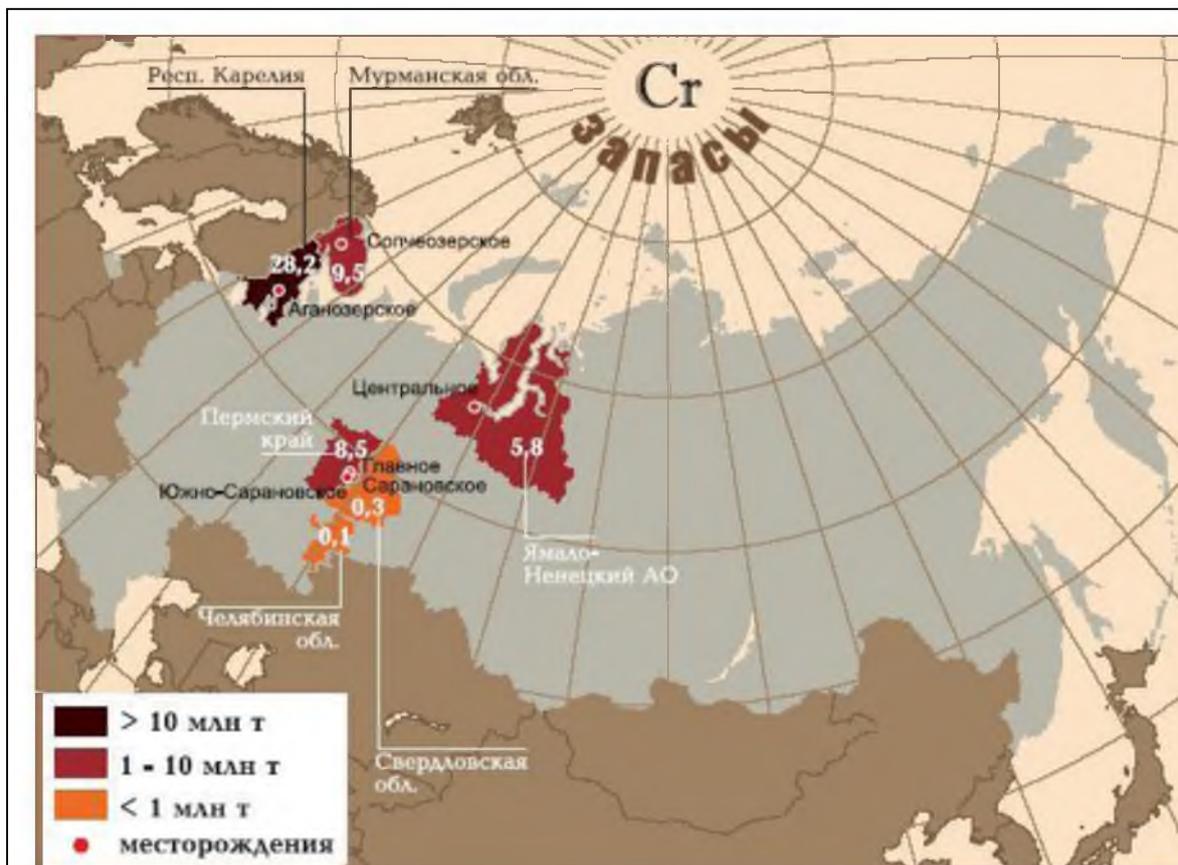


Рис. Распределение запасов руд хрома по субъектам России на 2007 г., млн. т (к таблице)
<http://mineral.ru/Facts/russia/131/296/index.html>

Вопросы для самоконтроля

1. Какие минеральные виды подгруппы хромшпинелидов представляют основную промышленную ценность для России. Попутные ценные компоненты хромитовых руд, их генетическая обусловленность.
2. Условия образования хромитовых руд.
3. Как отражается химический состав хромшпинелидов на их физических свойствах. Можно ли это использовать в диагностических целях.
4. Какие минералы являются основными индикаторами руд хрома. Их диагностические признаки.

Ванадий (V)

К геохимии ванадия. Ванадий в минералах проявляет степень окисленности +3 и +5, редко +4. Соединения V^{3+} возникают только в эндогенных условиях, предполагая недостаток кислорода и высокотемпературные условия. Близость ионных радиусов V^{3+} , Fe^{3+} и Ti^{4+} приводит к тому, что V^{3+} в эндогенных процессах находится в основном в рассеянном состоянии и входит в виде изоморфной примеси в титаномагнетит, ильменит, рутил, сфен и в породообразующие минералы (амфиболы, пироксены, гранаты).

Требования к руде. Подавляющее большинство месторождений, руды которых являются источниками ванадия, являются комплексными. Это комплексные Fe-Ti-V, Cu-Pb-V, U-V руды. Минимальным промышленным содержанием V_2O_5 в титаномагнетитовом концентрате считается содержание 0,3%.

Вредные компоненты руд CaO и P.

К минералогии руд ванадия. Основными промышленными минералами-носителями и концентраторами ванадия в эндогенных процессах являются титаномагнетит (до 9 % V_2O_5), магнетит (до 0,6% V_2O_5) магномагнетит (до 1,6% V_2O_5), рутил (до 1% V_2O_5), ильменит (до 0,4% V_2O_5).

Собственные минералы V^{3+} представлены *шпинелидом* – кульсонитом (класс оксидов) и редко *силикатом* – роскоэлитом.

Минералы V^{5+} представлены кислородными солями – *ванадатами*. Промышленные ванадаты (ванадинит, деклаузит), в которых содержание V_2O_5 составляет около 20%, промышленные скопления образуют исключительно в экзогенных условиях и концентрируются только в окисленных рудах ряда месторождений.



Рис. Ванадинит: а – гексагональные кристаллы при увеличении; б – в виде кристаллических корочек в образце окисленной свинцовой руды

V^{4+} входит в состав лишь одного промышленного минерала ванадия. Это *сульфид ванадия* – патронит $V[S_2]_2$. Как и положено сульфидам, его образование предполагает восстановительные условия при источнике сероводорода. Такие условия возникают локально в экзогенной обстановке с образованием уникальных промышленных концентраций патронита в пластах асфальтитов.

Генетические типы руд ванадия. Источником для извлечения ванадия являются как эндогенные, так и экзогенные месторождения. Эндогенные месторождения комплексных Fe-Ti-V руд относятся к *магматическим в связи с комплексами основных-ультраосновных пород габбро-анортозитовой формации*. Это титаномагнетитовые, магнетит-ильменитовые, ильменит-гематитовые руды в пироксенитах, горнблендитах, оливинитах, габбро, норитах, анортозитах, габбро-диабазам. Ванадий в этих рудах присутствует либо в виде изоморфной примеси в магнетите, либо в виде тонких механических включений в магнетите ванадиевого шпинелида кульсонита FeV_2O_4 . При среднем обычно невысоком содержании V_2O_5 в таких рудах – 0,1-1 %, их запасы на некоторых месторождениях достигают нескольких миллионов тонн.

Известны немногочисленные *вулканогенные гидротермальные магномагнетитовые месторождения* в областях распространения траппов, в которых ванадий присутствует в виде изоморфной примеси в магномагнетите (описание см. в минералогии руд железа) в количестве достаточном для его попутного извлечения.



Качканарский горно-обогатительный комбинат
<http://uraltourism.ru>

Рис. Отработка открытым способом магматических комплексных железо-титан-ванадиевых руд

Экзогенные месторождения ванадиевых руд связаны с зонами окисления ряда рудных месторождений. Чаще это зоны окисления полиметаллических (медно-свинцово-цинковых) месторождений. Окисленные медно-свинцовые руды содержат церуссит, малахит, азурит, реже смитсонит. Минералы ванадия представлены деклуазитом, купродеклуазитом и ванадинитом. Это комплексные *Cu-Pb-V* руды. Показательно, что в первичных сульфидных рудах содержание ванадия составляет всего лишь сотые и тысячные доли процента, что не представляет промышленной ценности. Концентрация же ванадия в окисленных рудах до 5-6% V_2O_5 обычно возникает в связи с появлением внешнего источника ванадия.

Среди экзогенных выделяются также комплексные уран-ванадиевые (*U-V*) месторождения инфильтрационного типа. Они приурочены к пестроцветным отложениям (алевролиты, песчаники, гравелиты, конгломераты) осадочного чехла. Промышленными минералами ванадия являются карнотит (группа урановых слюдок) и роскоэлит (группа слюд). Содержание ванадия в таких рудах может достигать V_2O_5 до 1-5%.

Патронитовые руды в асфальтитах (в золе до 50% V_2O_5) известны лишь в одном месторождении в Перу, находящемся на высоте 4700 м. Главное рудное тело расположено среди осадочных пород и прослежено по простиранию на 100 м при мощности от нескольких сантиметров до 9-12 м. Руда представляет собой асфальтоподобное вещество, содержащее черный аморфный патронит $V[S_2]_2$, самородную серу, примесь вторичного сульфида бравоита $(Fe, Ni, Co)[S_2]$ и молибденита. Руды комплексные очень богатые, содержат V до 15 %, Ni – 1,5 %, Mo – 0,5-1,5 %. Условия образования этого месторождения не совсем ясны. Предполагается, что в процессе образования асфальта (при разложении белков животного и растительного происхождения без доступа воздуха) выделялось значительное количество H_2S , который в верхней зоне залежи частично окислялся до самородной серы, частично осаждал из грунтовых растворов V, Ni и Mo с образованием сульфидов.

В поверхностных условиях ванадий мигрирует в виде тонкодисперсных минеральных взвесей и в составе истинных растворов. Из морских вод V легко адсорбируется гидроксидами железа, алюминия и органическим веществом с образованием промышленных концентраций в осадочных железных и алюминиевых рудах (бокситы с содержанием 0,02—0,04% V_2O_5).

Известны месторождения ванадиеносных углисто-кремнистых сланцев, представленные чередованием пачек углисто-глинистых и кремнистых пород с суммарной мощностью в десятки метров, при мощности отдельных пачек 0,5-2,0 м. Ванадий концентрируется главным образом в углистых прослоях, где содержание его достигает 1-2 %, в то время как в кремнистых прослоях снижается до 0,2-0,3 %. Состав таких руд очень сложный – это углистое вещество с участием карбонатов, ванадатов, фосфатов, барита, роскоэлита и др. минералов.

Существуют нетрадиционные источники ванадия. Они весьма своеобразны, но, так или иначе, связаны с участием органики. Повышенную ванадиеносность имеют высокосернистые нефти ряда нефтегазоносных провинций России и других стран мира. Ванадий накапливается и в некоторых морских организмах. Известно, что в Японии содержат целые плантации мидий и галатурий, с целью последующего извлечения накопленного в их тельцах ванадия. Довольно типична концентрация ванадия в пластах каменного угля, фосфоритах (ванадиеносные фосфориты с содержанием 0,1-1% V_2O_5).

Ванадий присутствует и в глубоководных железомарганцевых конкрециях дна океанов (до 0,1% V_2O_5), в которых запасы ванадия колоссальны. Ряд стран уже добывает железомарганцевые конкреции, несмотря на техническую сложность и затратность этого процесса. Конечно, железомарганцевые конкреции дна мирового океана более объективно рассматривать как руды будущего.

Шпинелиды, содержащие в своем составе ванадий (магнетит, титаномагнетит, кульсонит), представляют собой устойчивые в поверхностных условиях минералы, промышленные концентрации которых могут возникать в прибрежно-морских россыпях.

Вопросы для самоконтроля

1. Степень окисленности V и его формы нахождения в эндогенных комплексных Fe-Ti-V рудах.
2. Генетические типы месторождений эндогенных ванадиевых руд. Комплексность этих руд.
3. Название, формула сульфида V, степень окисленности в нем V. Условия образования этого минерала.
4. Минералогия ванадия и комплексность руд в зонах окисления сульфидных месторождений. Источник ванадия.
5. Нетрадиционные источники V.
6. Названия и формулы минералов V в U-V рудах. Условия их образования.
7. Какое отношение к рудам ванадия имеют железомарганцевые конкреции.

Чёрные металлы

Железо (Fe) –

Главные рудные минералы:

оксиды: магнетит – $FeFe_2O_4$, гематит – Fe_2O_3 ;

гидроксиды: гётит – $FeO(OH)$, гидрогётит – $FeO(OH) \cdot nH_2O$;

карбонаты: сидерит – $Fe[CO_3]$, сидероплезит – $(Fe, Mg)[CO_3]$.

Второстепенные рудные минералы:

алюмосиликаты: шамозит, тюрингит (лептохлориты – $Fe_{6-n}Al_n[(Al_nSi_{4-n}O_{10})(OH)_8]$).

Генетический тип месторождений	Главные рудные (промышленные) минералы Fe	Второстепенные рудные минералы, попутные ценные минералы	Главные нерудные и другие характерные непромышленные минералы	Попутные ценные компоненты	Характерные структуры и текстуры руд	Примеры месторождений России и стран СНГ
1. Регионально метаморфизованные (<i>железистые кварциты</i>) фаций зелёных сланцев и эпидот-амфиболитовой	Магнетит, гематит	Сидерит	Кварц, щелочные амфиболы, пироксены, хлорит	Ge	Неравномерно зернистая, тонко-мелкозернистая; слоистая, сланцеватая, плейчатая	Месторождения Курской магнитной аномалии (КМА), Криворожского железорудного бассейна; Костомукшинское (Карелия), Мало-Хинганское (Д. Восток), Чаро-Токкинское (Якутия)
2. Скарновые: а) известково-скарновые; б) магнезиально-скарновые	а) Магнетит, мушкетовит, гематит, мартит; б) магнетит, гематит	а) Со-пирит, халькопирит, сфалерит, кобальтин, сам. золото и серебро; б) людвигит (V),	а) Пироксены диопсид-геденбергитового ряда, гранаты кальциевого ряда, эпидот, цоизит, амфиболы, скаполит, хлориты, кальцит, кварц, цеолиты, пирит, пирротин; б) форстерит, диопсид (фассаит), флогопит, шпинель, серпентин, пирит, пирротин	а) Co, Cu, Pb, Zn, Bi, Se, Te, Mo, Au, Ag ; б) V	Неравномерно зернистая; вкрапленная, сплошная, прожилковая	а) Гороблагодатское (Урал), Абаканское, Тёйское (Хакасия), Шерегешское, Таштагольское (Горная Шория), Соколовское, Сарбайское, Качарское (Казахстан), Дашкесан (Кавказ); б) Таёжное (В. Сибирь)
3. Магматические , связанные с комплексом основных пород габбро-анортозитовой формации	Магнетит, титаномагнетит, ильменит	Кульсонит (FeV_2O_4), ульвошпинель (Fe_2TiO_4), сам. платина	Пироксены, оливин, основные плагиоклазы, амфиболы, серпентин, эпидот, апатит	Ti, V, Pt, Os, Sc, Co, Ni	Зернистая; сплошная, вкрапленная, пятнистая	Качканарское, Кусинское (Урал), Чинейское (В. Сибирь)
4. Карбонатитовые в связи с комплексами щелочно-ультраосновных пород	Титаномагнетит, магнетит	Перовскит, пирохлор, бадделейт, ильменит, халькопирит	Апатит, форстерит, флогопит, кальцит, пирротин,	Ti, Zr, Hf, Sc, Cu, P	Зернистая; массивная, полосчатая, вкрапленная	Ковдорское (Кольский полуостров), Гулинский массив (В. Сибирь)

Генетический тип месторождения	Главные рудные минералы Fe	Второстепенные рудные минералы, попутные ценные минералы	Главные нерудные и другие характерные непромышленные минералы	Попутные ценные компоненты	Характерные структуры и текстуры руд	Примеры месторождений России и стран СНГ
5. Вулканогенные гидротермальные в связи с траппами	Магнетит, гематит	Халькопирит, сфалерит, галенит	Диопсид, гранат, эпидот, апатит, хлорит, кальцит, флогопит, амфиболы, пирит	Cu, Zn, V	Зернистая; прожилковая, брекчиевидная, вкрапленная, массивная	Коршуновское (Ангаро-Илимский рудный район)
6. Вулканогенно-осадочные в вулканогенно-осадочных кремнисто-карбонатных (яшмовых) породах	Гематит, магнетит, сидерит	Браунит, гаусманит, псиломелан, сфалерит, галенит, халькопирит	Хлорит, серицит, кварц, опал, халцедон (яшмы), доломит, анкерит, барит, пирит, арсенопирит	Mn, Ge, Zn, Pb, Au, Mo	Зернистая; порфи-робластовые, полосчатая, массивная	Западный Каражал (Казахстан), Холзунское (Горный Алтай)
7. Гидротермально-метасоматические по терригенно-карбонатным осадочным толщам	Сидерит, сидероплезит	Блеклые руды и др. сульфиды	Доломит	Cu	Зернистая; сплошная, прожилковая	Бакальское (Урал)
8. Осадочные: а) морские в карбонатно-терригенных и б) континентальные в глинисто-песчаных отложениях	а) гематитовые; а, б) Сидерит, лептохлориты, гидрогематит;	Манганосидерит, родохрозит, гидрогётит	Карбонаты, кварц, полевой шпат, глауконит, глинистые минералы, пирит, вивианит	Mn, V, Ge;	Оолитовая, пизолитовая	а) Ангаро-Питская группа; Керченское (Украина), Аятское, Бакчарское (Сибирь); б) Лисаковское (Казахстан)
9. Коры выветривания и зоны окисления (<i>бурожелезняковые</i>) а) зоны окисления по сидеритовым рудам; б) зоны окисления по сидерит-лептохлоритовым рудам; в) зоны окисления по железистым кварцитам; г) зоны окисления по скарно-магнетитовым рудам; д) коры выветривания серпентинизированных ультраосновных пород – <i>руды-природно-легированные</i>	а-б) Гётит, гидрогётит, гидрогематит; в) мартит, гётит, гидрогематит; г) мартит, гётит, гидрогематит, гидрогётит; д) гётит, гидрогётит, сидерит	а) Псиломелан, пирролизит, куприт, сам. Cu, малахит, азурит; б) псиломелан, пирролизит, вернадит; в) – г) куприт, малахит, азурит, псиломелан, эритрин; д) пирролизит, псиломелан, хромшпинелиды	а) Кальцит, арагонит, гипс; б) глинистые минералы; в) кварц; г) глинистые минералы, кальцит; д) халцедон, опал, хлорит, глинистые минералы, магнетит	а) Mn, Cu; б) Mn, V, Ge; в) – г) Cu, Co, Au; д) Cr, Co, Ni, V, Mn	Порошковатая, зем-листая, оолитовая, брекчиевидная, кусковатая	а) Бакальское (Урал); б) Керченское (Украина); в) Курская магнитная аномалия; г) д) Аккермановское, Елизаветинское (Урал), Малкинское (С. Кавказ)

Марганец (Mn) –

Главные рудные минералы:

оксиды: пиролюзит – MnO_2 , вернадит – $MnO_2 \cdot nH_2O$, псиломелан – $BaMn^{2+}Mn^{4+}_9O_{20} \cdot nH_2O$, гаусманит – $Mn^{2+}Mn^{3+}_2O_4$,

браунит – $Mn^{2+}Mn^{3+}_6O_8[SiO_4]$;

гидроксиды: манганит – $Mn^{2+}Mn^{4+}O_2(OH)_2 - MnO(OH)$;

карбонаты: родохрозит – $Mn[CO_3]$, манганокальцит – $(Ca,Mn)[CO_3]$, манганосидерит (олигонит) – $(Fe,Mn)[CO_3]$.

Второстепенные и потенциально рудные минералы:

силикаты: родонит – $CaMn_4[Si_5O_{15}]$; *оксиды:* яacobсит – $MnFe_2O_4$, тодорокит – $Mn^{2+}Mn^{4+}_3O_7 \cdot nH_2O$, бернессит – $Na_4Mn^{2+}_3Mn^{4+}_{11}O_{27} \cdot 9H_2O$

Генетический тип месторождений	Главные рудные минералы Mn	Второстепенные рудные минералы, попутные ценные минералы	Главные нерудные и другие характерные минералы (вмещающие породы)	Попутные ценные компоненты	Характерные структуры и текстуры руд	Примеры месторождений Мира, России
1. Морские осадочные в прибрежно-морских (шельфовых) и в лагунных отложениях (<i>оксидно-карбонатные руды</i>)	Пиролюзит, псиломелан, манганит	Манганокальцит, олигонит, родохрозит	барит, гипс, пирит, марказит; песчано-алевритистые и карбонатные осадки;	V, Ge	Конкреции, оолиты, линзы, стяжения	Никопольское (Украина), Чиатурское (Грузия), Березовское (Северо-Уральская гр. месторождений, Россия)
2. Вулканоогенно-осадочные в андезитовых диабаз-порфировых, кварц-кератофировых комплексах (<i>оксидно-карбонатные руды</i>)	Браунит, гаусманит, родохрозит, манганокальцит	Сидерит, сидероплезит, гематит, магнетит	Хлорит, серицит, кварц, опал, халцедон (яшмы, кремнистые породы), доломит, анкерит	Fe, Zn, Pb, Ge, Au, Mo	Мелко-тонкозернистая; полосчатая, массивная	Западный Каражал (Казахстан); Россия: Мазульское, Дурновское, Усинское (Кузнецкий Алатау), Порожинское (Красноярский кр.), Парнокское (Республика Коми)
3. Месторождения выветривания (марганцевые шляпы) по метаморфогенным силикатно-карбонатным породам и вулканоогенно-осадочным рудам (<i>окисленные руды</i>)	Пиролюзит, псиломелан	–	Продукты выветривания	Fe	Порошковатая, землистая, сплошная, натечная	Мазульское, Дурновское, Усинское, Пороженское, Южно-Хинганское, (Россия), Чиатурское (Грузия); Индия, Бразилия, ЮАР
4. Метаморфогенные железосланцевой, амфиболитовой и гранулитовой фаций, всиликатных метаморфических породах (<i>на Mn не отрабатываются</i>)	Родонит, браунит, гаусманит	Родохрозит	<i>Силикатно-карбонатные породы:</i> гондиты: спессартин, кальцит, амфиболы, апатит; кодуриты: калиевый полекой шпат, гранат, апатит	–	Зернистая; сплошная, вкрапленная	Индия, Бразилия, Калахари (ЮАР), Утхумское (Саяны, Россия), Мал. Сидельниково (Урал, Россия)
4. Глубоководные железомарганцевые конкреции дна океана (<i>ЖМК</i>)	Псиломелан, вернадит	Гидрогётит, тодорокит, бернессит	Опал, рутил, анатаз, барит, монтмориллонит, карбонаты, филлипсит	Fe, Ni, Co, Cu, Mo, V, TR, Zn и др.	Конкреции	Атлантический, Индийский, Тихий океан (зона Кларин Климпертон)

Титан (Ti) –

Главные рудные минералы:

оксиды: ильменит – FeTiO_3 , рутил – TiO_2 , анатаз – TiO_2 , лейкоксен – $\text{TiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$.

Второстепенные и потенциально рудные минералы:

оксиды: перовскит – CaTiO_3 , лопарит – $(\text{Ca,Na,Ce})(\text{Ti,Nb})\text{O}_3$, ульвошпинель (ульвит) – $\text{Fe}^{2+}_2\text{Ti}^{4+}\text{O}_4$;

силикаты: сфен (титанит) – $\text{CaTiO}[\text{SiO}_4]$

Генетический тип месторождений	Главные рудные минералы Ti	Второстепенные рудные и попутные ценные минералы	Главные нерудные минералы, породы	Попутные ценные компоненты	Характерные структуры и текстуры руд	Примеры месторождений России и стран СНГ
1. Магматические , связанные с комплексом основных пород габбро-анортозитовой формации	Магнетит, титаномагнетит, ильменит	Ульвошпинель, кульсонит, платиноиды	Пироксены, оливин, основные плагиоклазы, амфиболы, серпентин, эпидот, апатит	Fe, V, Pt, Os, Sc	Зернистая; вкрапленная, пятнистая	Качканарское, Медведевское (Урал, Россия), Лысанское, Кручининское, Куранахское Чинейское, (Сибирь, Россия)
2. Магматические а) в связи с комплексами щелочных пород; б) карбонатиты	а) Сфен; б) перовскит, лопарит	Ильменит	Апатит, нефелин, полевые шпаты, эгирин, флогопит	TR, Nb, Sc, апатит	Зернистая; вкрапленная, сплошная	Хибины (Кольский полуостров, Россия), В. Сибирь
3. Метаморфические в древних кристаллических сланцах, гнейсах, амфиболитах, эклогитах	Рутил	–	Кварц, полевые шпаты, амфиболы, гранат	–	Зернистая; вкрапленная	Кузнечихинское, Шубинское (Урал, Россия)
4. Вулканоогенно-осадочные	Ильменит	–	Вулканоогенно-осадочные породы	–	Зернистая; вкрапленная	Нижний Мамон (Воронежская обл., Россия)
5. Титаноносные коры выветривания по габбро-анортозитам и метаморфическим породам	Ильменит, рутил	–	Каолинит	Sc, V	Рыхлая	Волынский массив (Украина), Кундыбаевское (Казахстан)
6. Россышные: а) циркон-ильменитовые прибрежно-морские; б) ильменитовые аллювиальные; в) нефте-титановые древние метаморфизованные; г) редкоземельно-редкометальные элювиально-делювиальные по щелочным породам	а) Ильменит, рутил, циркон; б) ильменит; в) лейкоксен г) перовскит, лопарит	а) Лейкоксен, анатаз, монацит; б) лейкоксен; в) ильменит, нефть г) сфен	а) Кварц, каолинит, дистен, ставролит, хромит; б) кварц, полевой шпат, каолинит; в) кварцевый нефтеносный песчаник г) нефелин, эгирин, апатит	а) Zr, TR, Sc, V, Ta, Nb, Y, Hf б) Sc, V; в) нефть ; г) Nb, TR	а) Рыхлая; б) рыхлая; в) плотная; г) рыхлая	а) Туганское, Георгиевское, Тарское (Томская, Омская обл., Россия), Центральное (Тамбовская обл., Россия), Пижемское (Республика Коми, Россия), Украина; б) Иршинское (Украина); в) Ярегское (Республика Коми, Россия); г) Кольский полуостров, Сибирь (Россия)

Ванадий (V) –

Главные рудные минералы:

оксиды: ванадиевый магнетит – $\text{Fe}(\text{Fe}, \text{V})^{3+}_2\text{O}_4$.

ванадаты: карнотит – $\text{K}_2(\text{UO}_2)^{2+}_2[\text{V}^{5+}_2\text{O}_4]_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, ванадинит – $\text{Pb}_5[\text{V}^{5+}_2\text{O}_4]_3\text{Cl}$;

Второстепенные рудные минералы:

оксиды: кульсонит – $\text{FeV}^{3+}_2\text{O}_4$; *сульфиды:* патронит – $\text{V}^{4+}[\text{S}_2]_2$;

ванадаты: деклуазит – $(\text{Zn}, \text{Cu})\text{Pb}[\text{V}^{5+}_2\text{O}_4](\text{OH})$; *силикаты:* роскоэлит – $\text{KV}^{3+}_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_2$

Генетический тип месторождений	Главные рудные минералы V	Второстепенные рудные и попутные ценные минералы	Главные нерудные минералы, сопутствующие вмещающие породы	Комплексность руд, попутные ценные компоненты	Характерные структуры и текстуры руд	Примеры месторождений России и Мира (страны, где есть месторождения)
1. Магматические, связанные с комплексом основных пород габбро-анортозитовой и ультраосновных пород габбро-пироксен-дунитовой формаций	Титаномагнетит, ванадиевый магнетит, магнетит, ильменит	Кульсонит, ульвошпинель, платиноиды	Пироксены, оливин, плагиоклазы, амфиболы, серпентин, эпидот, апатит	Fe-Ti-V; Sc, Pt, Os	Зернистая; вкрапленная, пятнистая	Россия: Качканарское, Курсинское, Гусевогорское (Урал), Лысаковское (Саяны), Кручининское (Забайкалье); США, ЮАР (Бушвельд), Норвегия, Швеция, Австрия
5. Вулканогенные гидротермальные в связи с траппами	Магномагнетит, магнетит, гематит	Халькопирит, сфалерит, галенит	Диопсид, гранат, эпидот, апатит, хлорит, кальцит, флогопит, амфиболы.	Fe-Ti-V; Cu, Zn, Pb	Прожилковая, брекчиевидная, вкрапленная, массивная	Коршуновское (Ангаро-Илимский рудный район)
2. Месторождения выветривания: а) зоны окисления полиметаллических месторождений; б) зоны окисления инфильтрационных месторождений U-V руд	а) Ванадинит, деклуазит; б) карнотит, неокисленный роскоэлит	а) Англезит, церуссит, малахит, азурит, смитсонит; б) другие урановые слюдки, неокисленный уранинит	а) Глинистые минералы, кварц; б) песчаники	а) Cu-Pb-V; V, Zn б) U-V; Cu	Порошковатая, землистая, зернистая, плотная	а) Африка, Австралия, Ю. Америка; б) США
3. Осадочные: а) пластовые залежи фосфоритов, осадочных железных руд, бокситов, углей, углеродисто-кремнистых сланцев; б) в асфальтитах среди глинистых сланцев и песчаников	а) Присутствие V в промышленных количествах; б) патронит	а) Апатит, сидерит, шамозит, гиббсит, бёмит, барит; б) природная смесь высокомолекулярных углеводородов	а) Глинистые минералы, кварц, каменный уголь; б) глины, песчаники	а) V, P, Al, Fe; б) V; Mo, Ni	а) Порошковатая, землистая, плотная; б) плотные массы	а) Россия, Казахстан, США.; б) Ю. Америка (Перу)

Генетический тип месторождений	Главные рудные минералы V	Второстепенные рудные и попутные ценные минералы	Носители промышленных концентраций V	Комплексность руд; попутные ценные компоненты	Характерные структуры и текстуры руд	Примеры месторождений России и Мира (страны, где есть месторождения)
4. Россыпные: прибрежно-морские россыпи	Ванадийсодержащий титаномагнетит	–	Минералы россыпей	Fe-Ti-V	Рыхлая	Новая Зеландия. Индия. Россия
5. Метаморфогенные в амфиболитах	Ванадиевый магнетит	Ильменит	Амфиболы, плагиоклазы	Fe-V; Ti	Зернистая; вкрапленная, сланцеватая	Финляндия. Норвегия. США
6. Концентрация ванадия в связи с органическими соединениями: а) высокосернистые сорта нефти; б) тельца морских обитателей	Промышленные содержания ванадия	–	а) нефть; б) мидии, галатурии, морские ежи	V	–	а) Россия (Урало-Волжская провинция, Оренбургская обл.), Иран; б) Япония

Хром (Cr) –

Главные рудные минералы:

оксиды (хромшпинелиды – $(Mg,Fe)(Cr,Al,Fe)_2O_4$): хромит – $FeCr_2O_4$, магнохромит – $(Mg,Fe)Cr_2O_4$, алюмохромит – $(Fe, Mg)(Cr,Al)_2O_4$, хромпикотит – $(Mg,Fe)(Cr,Al)_2O_4$.

Второстепенные рудные минералы:

оксиды (хромшпинелиды): субферрихромит – $(Fe, Mg)(Cr, Fe)_2O_4$.

Минералы индикаторы рудной минерализации:

силикаты: уваровит – $Ca_3Cr_2[SiO_4]_3$; содержащие хром хлориты, хромдиопсид.

Генетический тип месторождений	Главные рудные минералы Cr	Второстепенные рудные и попутные рудные минералы	Основные нерудные минералы	Попутные ценные компоненты	Характерные структуры и текстуры руд	Примеры месторождений России и Мира
1. Магматические в массивах дифференцированных ультраосновных пород	Хромшпинелиды (хромиты)	Платиноиды (поликсен, иридиястая платина)	Оливин, пироксены, серпентин, магнезит, тальк	Pt, Ir	Зернистая, сидеритовая; массивная, вкрапленная, нодулярная, полосчатая	Россия: Сарановское, Кемпирсайская группа месторождений, Центральное (Урал), Сопчеозерское, Аганозерское (Кольский п-ов, Карелия); ЮАР, США.
2. Россыпные (элювиальные, делювиальные, прибрежно-морские)	Хромшпинелиды (хромиты)	–	Минералы россыпей	–	Рыхлые, песчанистые, валунчатые	Сарановское, Кемпирсайская группа месторождений (Урал, Россия), Африка (Великая дайка), Куба, Япония

Таблица

Минеральные виды группы шпинелидов $A^{2+}B^{3+}_2O_4$

Элементы	Al^{3+}	Fe^{3+}	Cr^{3+}	Ti^{4+}	V^{3+}
	Минералы				
Mg^{2+}	Шпинель $MgAl_2O_4$	Магнезиоферрит $MgFe_2O_4$	Магнохромит $MgCr_2O_4$		
Fe^{2+}	Герцинит $FeAl_2O_4$	Магнетит $FeFe_2O_4$	Хромит $FeCr_2O_4$	Ульвошпинель Fe_2TiO_4	Кульсонит FeV_2O_4
Mn^{2+}	Галаксит $MnAl_2O_4$	Якобсит $MnFe_2O_4$			
Zn^{2+}	Ганит $ZnAl_2O_4$	Франклинит $ZnFe_2O_4$			
Ni^{2+}		Треворит $NiFe_2O_4$			

Таблица

Минеральные виды хромшпинелидов

	Cr^{3+}	Al^{3+}	Fe^{3+}
Fe^{2+}	Хромит $FeCr_2O_4$	Алюмохромит $Fe(Cr,Al)_2O_4$	Субферрихромит $Fe(Cr,Fe)_2O_4$
Mg^{2+}	Магнохромит $MgCr_2O_4$	Хромпикотит $Mg(Cr,Al)_2O_4$	

Вопросы для самоконтроля по рудам черных металлов

Минералогия руд Fe

1. Названия и формулы рудных минералов эндогенных руд.
2. Диагностические признаки сидерита.
3. Рудные, нерудные минералы магматических железных руд. Комплексность этих руд.
4. Вредные примеси и попутные ценные компоненты известковоскарновых руд.
5. Минеральный состав осадочных железных руд.
6. Основной минерал железа красных железняков.
7. Названия и формулы рудных минералов экзогенных руд.
8. Диагностические признаки гематита.
9. Рудные и нерудные минералы известковоскарновых руд, их комплексность.
10. Вредные примеси и попутные ценные компоненты карбонатитовых руд.
11. Состав и условия образования самолегирующихся железных руд.
12. Основные минералы железа бурых железняков.

Минералогия руд Mn

1. Валентность Mn и классы соединений характерные для минералов Mn экзогенных руд.
2. Общие диагностические признаки минералов Mn классов оксидов-гидроксидов.
3. Условия образования и минеральный состав экзогенных оксидно-карбонатных руд Mn.
4. Минеральный состав (названия, формулы) и комплексность вулканогенно-осадочных руд Mn.
5. Какие эндогенные минералы Mn являются потенциально промышленными. Валентность Mn в них.
6. Минеральный состав морских осадочных руд Mn, их структуры и текстуры.
7. В чем отличие минерального и химического состава осадочных шельфовых руд Mn и глубоководных Fe-Mn конкреций.
8. Какова валентность Mn и какие главные рудные минералы Mn в рудах вулканогенно-осадочного генезиса.
9. Названия, формулы и диагностические признаки карбонатов Mn.
10. Минеральный состав Mn кор выветривания (окисленные руды).

Минералогия руд Ti и Cr

1. Условия образования и минеральный состав эндогенных комплексных Fe-Ti-V руд. Названия, формулы минералов Fe-Ti.
2. Состав лейкоксена. В каких генетических типах месторождений лейкоксен представляет основную промышленную ценность руд.
3. С какими эндогенными образованиями связаны перовскит и лопарит. Их формулы.
4. Формула алюмохромита. Его диагностические признаки и условия образования.
5. Какова промышленная ценность сфена. Его формула и условия образования.
6. Форма нахождения титана в титаномагнетите. Его происхождение и комплексность этих руд.
7. Минеральный состав и комплексность прибрежно-морских россыпей.
8. Формула магнохромита. Его диагностические признаки и условия образования.
9. Названия, формулы и диагностические признаки основных минералов титана в прибрежно-морских россыпных месторождениях.
10. Минеральный состав россыпных месторождений титана, сформированных за счет щелочных пород.

Минералогия руд V

11. Степень окисленности V и промышленные минералы в эндогенных рудах.
12. Название, формула сульфида V, степень окисленности V. Условия образования этого минерала.
13. Формула карнотита, его класс соединения и условия образования. Комплексность этих руд.
14. Нетрадиционные источники V.
15. Степень окисленности V, класс соединения минералов V в экзогенных рудах.
16. Формы нахождения ванадия в комплексных Fe-Ti-V рудах. Их происхождение. Попутные ценные компоненты этих руд.
17. Минералы V (названия, формулы) в зонах окисления полиметаллических месторождений. Комплексность этих руд, источник V.
18. Названия и формулы минералов ванадия комплексных Cu-Pb-V руд. Степень окисленности V. Условия образования этих руд.
19. Названия и формулы шпинелида V, условия его образования и комплексность руд.
20. Названия и формулы минералов V в U-V рудах. Условия их образования.

Алюминий

Алюминий относится к широко распространенным подообразующим элементам. В эндогенных условиях он концентрируется в щелочных нефелин- и лейцитсодержащих породах. Он накапливается также в процессе алунизации – низкотемпературной гидротермальной проработки сернокислыми растворами кислых вулканогенных пород.

Наибольшие же концентрации алюминия возникают в экзогенных процессах при формировании остаточных и переотложенных кор выветривания по любым породам, исключая лишь ультраосновные. В процессе выветривания основные порообразующие элементы по степени подвижности располагаются в следующем порядке: К, Na (выносятся первыми) → Ca, Mg → Si (еще сохраняется связь Si и Al и формируются глинистые коры выветривания) → Fe (сохраняется связь Fe и Al и формируются латеритные коры выветривания) → Al, Ti. Таким образом, конечными продуктами выветривания оказываются бокситы, состоящие из гидроксидов алюминия и устойчивых к выветриванию минералов титана.

В экзогенных процессах глинозем растворяется и переносится только в кислых ($\text{pH} < 4$) или сильно щелочных условиях ($\text{pH} > 9,5$). В присутствии SiO_2 растворимость Al_2O_3 возрастает, а в присутствии CO_2 снижается. Коллоидный глинозем менее устойчив, чем кремнезем и быстрее коагулирует. Поэтому при совместной миграции они разделяются.

Различие устойчивости коллоидов Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO_2 приводит к дифференцированному отложению руд этих элементов в прибрежной зоне морей. Менее устойчивыми оказываются коллоиды Al_2O_3 , поэтому ближе к берегу формируются бокситы, в верхней части шельфа – железные, а в нижней части шельфа – марганцевые руды.

Долгое время единственной рудой для получения алюминия были бокситы. **Бокситы** – традиционная алюминиевая руда, состоящая из гидроксидов алюминия, оксидов и гидроксидов железа, примеси глинистых минералов, в которой отношение оксида алюминия к оксиду кремния (кремневый модуль) более 2.



Рис. Бокситы с различным содержанием железа

Основными рудными минералами бокситов являются бемит, диаспор с содержанием Al_2O_3 до 85% и гиббсит, содержащий 65% Al_2O_3 .

Промышленные требования к бокситам. Для производства глинозема содержание Al_2O_3 в бокситах должно превышать 22-28%. В зависимости от способа переработки бокситов в них учитывается также содержание CO_2 , CaO , Fe_2O_3 , S . С учетом минерального состава бокситы делятся на моногидратные (бемитовые и диаспоровые) и тригидратные (гиббситовые). Последние распространены несколько шире, поскольку бемит и диаспор ещё не являются окончательно гидратированными образованиями, в то время как гиббсит уже полностью гидратированное соединение, являющееся конечным продуктом выветривания пород, содержащих алюминий. Поэтому со временем моногидратные (бемит-диаспоровые) бокситы переходят в тригидратные (гиббситовые). Бокситы представляют собой комплексные руды, в которых промышленный интерес представляют V , Ga , Sc , Fe , Ti . Схемы попутного извлечения из бокситов V и Ga освоены в промышленных масштабах.



Рис. Добыча бокситов открытым способом

Общие замечания по условиям образования бокситов. Бокситы являются продуктами экзогенных процессов. В континентальных условиях это коры выветривания латеритного типа, формирующиеся в условиях влажного, теплого климата тропиков и субтропиков и представляющие собой конечные продукты выветривания кислых, средних, щелочных, основных пород. Большинство мировых запасов бокситов сосредоточено в тропическом поясе. В условиях умеренных широт с обилием влаги, но недостатком тепла, процессы химического выветривания не доходят до конца, ограничиваясь формированием глинистых кор выветривания. Несколько менее распространены в континентальных условиях переотложенные бокситы осадочного генезиса.

Ограниченность запасов бокситов в некоторых странах и прежде всего в России привела к необходимости использования для получения алюминия других видов руд. В России впервые в мировой практике начата выплавка глинозема из сульфатных алунитовых руд и силикатных нефелиновых руд.

Нефелиновые руды в настоящее время занимают второе место по промышленному значению. Особенно актуально использование нефелиновых руд для России, имеющей ограниченные запасы бокситов и существенные запасы щелочных пород с нефелином. Содержание Al_2O_3 в нефелине составляет около 34%. Нефелиновые руды

представлены алюмосиликатными щелочными породами (уртиты, ийолиты, тералиты, сынныриты). Промышленная ценность нефелиновых руд определяется содержанием в них нефелина. Содержание Al_2O_3 в алюминиевых рудах согласно требованиям промышленности должно быть выше 22% при содержании SiO_2 менее 45%, щелочей более 10%, Fe_2O_3 менее 7%. Такие нефелиновые породы, как уртиты, содержание нефелина в которых достигает 85%, представляет собой алюмосиликатные руды высокого качества, не нуждающиеся в предварительном обогащении. Обогащение нефелиновых руд другого состава позволяет получить концентраты с содержанием Al_2O_3 27-30%. Основным отличием сынныритов – особых лейцитовых щелочных пород является повышенное содержание в них калия при содержании Al_2O_3 около 22%. Основным носителем калия в сынныритах является лейцит.



Рис. Карьер по добыче нефелиновых руд (Кемеровская область, Сибирь).

Переработка нефелиновых руд на глинозём представляет собой энергоёмкий процесс, а также требует потребления большого количества карбонатных пород. Поэтому для промышленной оценки таких месторождений необходимо учитывать наличие вблизи перерабатывающих предприятий топливно-энергетических источников и месторождений карбонатных пород.



Рис. Основные районы распространения нефелиновых руд и их балансовые запасы в России.

Сульфатные алунитовые руды относятся к небокситовым (нетрадиционным) алюминиевым рудам. Эти руды распространены локально и их месторождения связаны с воздействием сульфатных низкотемпературных растворов на кислые породы – процесс алунитизации. Алунитовые месторождения имеют географическую привязку и приурочены к районам вулканической деятельности. Содержание Al_2O_3 в алуните составляет 37%. Алунитовые руды, не требующие обогащения, должны содержать не менее 50% алунита и не более 10% глинистых минералов. Содержание алунита в рудах, нуждающихся в обогащении, не должно быть меньше 25% при содержании глинистых минералов не более 5%.

В качестве перспективных промышленных минералов алюминия могут рассматриваться такие силикаты как дистен, андалузит, силлиманит, содержание Al_2O_3 в которых составляет около 63%. Высокоглиноземистые метаморфические породы, основными минералами которых они являются, легко поддаются глубокому обогащению с получением концентратов с содержанием Al_2O_3 до 60%. Минералы группы силлиманита предлагается использовать в качестве добавок при обогащении низкокачественных нефелиновых руд, что приведет к увеличению содержания глинозема в смеси.

К перспективным можно отнести низкотемпературные гидротермальные месторождения давсонита, основного карбоната алюминия, некрупные месторождения и проявления которого известны в Сибири. Месторождения этого типа более известны и отрабатываются за рубежом.

В качестве нетрадиционной высококачественной алюминиевой руды в случае значительных запасов могут рассматриваться также образования, содержащие водный основной сульфат алюминия – *алюминит*. Многочисленные проявления алюминитовых пород известны в Сибири и могут рассматриваться как промышленно перспективные.

В настоящее время разработаны схемы извлечения глинозема из *каолинитовых глин* при содержании в них Al_2O_3 более 26-30% и даже красных глубоководных илов. В качестве потенциальных алюминиевых руд рассматриваются также некоторые высокоглиноземистые осадочные породы.

Свинец, цинк

В *эндогенных процессах* свинец и цинк относятся к элементам тесно связанным между собой. Они концентрируются в остаточных очагах кислых производных гранитной и базальтовой магм. Дальнейшая миграция металлов осуществляется гидротермальными растворами в виде комплексных соединений (хлоридных, фторидных, сульфатных, карбонатных, сульфидных и гидросульфидных). Основными промышленными минералами свинца и цинка в эндогенных месторождениях являются сульфиды – галенит и сфалерит. Большинство месторождений сульфидных руд является среднетемпературными гидротермальными. Свинцово-цинковые руды формируют типичные жильные гидротермальные месторождения. В месторождениях скарного типа свинцово-цинковые руды соответствуют среднетемпературной гидротермальной стадии формирования объектов. Наиболее же известны вулканогенно-осадочные и гидротермально-метасоматические месторождения в вулканогенно-осадочных толщах.

Химический и минеральный состав руд. Основными промышленными минералами свинца и цинка в эндогенных рудах являются сульфиды, галенит и сфалерит, которые являются главными в свинцово-цинковых и полиметаллических месторождениях. К *полиметаллическим* (многометальным) относят сульфидные месторождения, из руд которых извлекаются 3 равноценных компонента – *медь, свинец, цинк*. Причем обычно они присутствуют в соотношении $Cu < Pb < Zn$. В случае заметной доли желтых

сульфидов (пирита и халькопирита) в полиметаллических рудах их относят к *колчеданно-полиметаллическим*.

Минимальное суммарное промышленное содержание металлов в полиметаллических рудах составляет порядка 3-3,5%. По содержанию металлов руды делятся на вкрапленные с суммой металлов до 20% и сплошные с суммой металлов более 20%, с суммой сульфидов соответственно до 50% и свыше 50%. Почти постоянным компонентом полиметаллических руд является пирит, который сам по себе не является промышленным рудным минералом, если не слагает обособленные участки или самостоятельные тела и может при этом извлекаться селективно для целей химической промышленности. В то же время пирит может и часто оказывается носителем и даже концентратом ряда попутных ценных компонентов, таких как Au, Se, Te, что уже меняет отношение к нему металлургической промышленности. Полиметаллические руды нередко сопровождаются баритом, который может приобретать в зависимости от его количества в полиметаллических рудах самостоятельное промышленное значение. Наблюдается переход полиметаллических руд в барит полиметаллические и затем в баритовые. Барит является более поздним минералом относительно сульфидной минерализации. Нередко наблюдается пересечение полиметаллических руд поздними баритовыми жилами.

Попутные ценные компоненты руд. Основные сульфиды полиметаллических руд, галенит и сфалерит, практически всегда оказываются *носителями попутных ценных компонентов*, что ещё более оправдывает применимый к этим рудам термин «полиметаллические». Так сфалерит почти всегда содержит примеси таких ценных примесей как Cd, Ga, Ge, In, которые, являясь рассеянными элементами, извлекаются в основном из этих руд. Однако геохимическая близость Ga и Al, Ge и Si определяет то, что в случае алюмосиликатных вмещающих пород Ga и Ge уходят во вмещающие породы, изоморфно замещая Al и Si в алюмосилкатах и прежде всего в сериците околорудных метасоматитов. В случае же карбонатных или кремнистых вмещающих пород Ga и Ge полностью концентрируются в сфалерите, не уходя во вмещающие породы. Галенит содержит примеси Ag, Bi, Se, Te, являясь концентратом и носителем этих попутных ценных компонентов. В полиметаллических месторождениях в качестве попутного ценного компонента часто присутствует Au, которое обычно оказывается связанным с пиритом и халькопиритом, находясь в них в основном в тонкодисперсном состоянии. И пирит, и халькопирит к тому же могут содержать изоморфные примеси Se и Te. С учетом извлекаемых попутных ценных компонентов полиметаллические руды являются комплексными.

В качестве попутного извлекаемого компонента может выступать также барит при его достаточном количестве в барит-полиметаллических рудах.

Свинцово-цинковые и полиметаллические руды характеризуются зернистыми структурами, сплошными, вкрапленными и прожилково-вкрапленными текстурами. Тонко- и скрытозернистые руды сплошной текстуры называют сливными. Последние относятся к трудно обогатимым.

В условиях метаморфизма, который часто испытывают древние первичные сульфидные руды, миграции свинца и цинка обычно не происходит, наблюдается лишь некоторое перераспределение их в пределах рудных тел, сопровождающееся частичной перекристаллизацией рудных минералов.

Руды экзогенного генезиса, возникающие в результате окисления первичных сульфидных руд при выходе их на эрозионный срез, формируют зоны окисления. *В экзогенных условиях в пределах зоны окисления свинец и цинк разделяются*. Такое поведение металлов связано с *разной растворимостью их сульфатов*, которые являются первыми продуктами окисления сульфидов при выходе на дневную поверхность.

Сульфат цинка, относящийся к хорошо растворимым соединениям, легко мигрирует. В случае отсутствия в зоне окисления карбонатных пород *цинк выносится за её*

пределы. Он может переотлагаться в форме вторичных карбонатов (смитсонита, реже монгеймита и олигонита), возникающих метасоматическим путем при замещении карбонатных пород, встречающихся на пути мигрирующих растворов.

Растворимость сульфата свинца чрезвычайно мала, благодаря чему свинец фиксируется в зоне окисления сначала в виде сульфата (англезита), который затем замещается карбонатом – церусситом с содержанием Pb 77,5%, реже минералами других классов соединений. Таким образом, очень часто зоны окисления сульфидных месторождений оказываются практически пустыми относительно цинка, в то время как первичные сульфидные руды обычно содержат цинка в разы, а иногда и на порядок больше, чем свинца. Что касается свинца, то он не только не выносится за пределы зоны окисления, но и концентрируется, слагая богатые окисленные руды, содержание свинца в которых оказывается намного выше, чем его содержание в первичных сульфидных рудах. Если содержание свинца в первичных сульфидных рудах составляет обычно первые проценты, то содержание его в окисленных рудах может достигать 60-70%.

В полиметаллических же месторождениях в зоне окисления наряду со свинцовыми минералами присутствуют также кислородные соединения меди и тогда зоны окисления приобретают медно-свинцовый профиль.

Минеральный состав окисленных экзогенных руд свинца и цинка резко отличается от состава первичных сульфидных руд. Это разнообразные кислородные соединения свинца и цинка: сульфаты, карбонаты, редко ванадаты, молибдаты и даже силикаты. Основным минералом свинца в окисленных рудах является наиболее устойчивый карбонат – церуссит, в значительно меньшем количестве отмечается англезит и другие сульфаты (биверит, осаризаваит – структурные аналоги алуниита-ярозита).

Что же касается промышленных гипергенных минералов цинка, то они представлены в основном смитсонитом и монгеймитом, которые фиксируются в зоне окисления только в том случае, если во вмещающих первичное сульфидное оруденение породах присутствовали карбонаты. Небольшое количество цинка, обычно не более первых процентов, может переотлагаться в виде позднего смитсонита или монгеймита на нижних горизонтах гипергенного разреза даже при отсутствии вмещающих карбонатных пород. При наличии в зоне окисления глинистых минералов, особенно минералов подгруппы смектитов (монтмориллонит), обладающих высокими адсорбционными свойствами, цинк, адсорбируясь, в небольшом количестве может фиксироваться в них. Каламин, редко виллемит – промышленные силикаты цинка, образуют промышленные скопления лишь на позднем (щелочном) этапе формирования зон окисления, когда начинается миграция кремнезема, освобождающегося при выветривании вмещающих алюмосиликатных пород. Силикаты цинка обычно присутствуют в глубоко проработанных зонах окисления. Применительно к силикатным цинковым рудам, сложенным каламином, иногда используется термин «галмейные руды».

Окисленные руды имеют обычно порошковатые, землистые, часто натечные, кристаллическизернистые структуры, сплошные, вкрапленные, прожилково-вкрапленные текстуры.

Медь

Минеральный состав руд. Промышленные минералы меди представлены довольно многочисленной группой, представленной разнообразными классами соединений, среди которых основную промышленную значимость составляют сульфиды. По содержанию меди среди них можно выделить высокомедные сульфиды (халькозин – 80% Cu, борнит – 63% Cu, ковеллин – 66% Cu) и маломедные (халькопирит – 34,5% Cu, кубанит – 24% Cu). Несмотря на невысокое содержание Cu, основным промышленным минералом является халькопирит, поскольку именно он наиболее распро-

странен в природе и обеспечивает большую часть запасов медных руд. К промышленным минералам относятся также медные сульфосоли, такие как блеклые руды и энаргит, карбонаты, представленные малахитом и азурином, сульфаты – брошантит, хлорид – атакамит. На некоторых месторождениях с развитой зоной окисления заметное значение приобретают оксиды меди (куприт, меньше тенорит) и самородная медь. Силикат меди – хризоколла как промышленный минерал имеет небольшое значение.

Таким образом, промышленную ценность эндогенных месторождений медных руд представляют минералы класса сульфидов и их аналогов (сульфосоли), а экзогенных – кислородные соединения и на ряде объектов так называемые вторичные сульфиды, представленные в основном халькозином и значительно меньше ковеллином и борнитом.

Комплексность руд. Медные руды, как правило, комплексные. Вместе с медью промышленную ценность этих руд составляют Zn, Pb, Mo, Fe, Ni. В качестве попутных ценных компонентов медные руды содержат Au, Ag, Se, Te. Руды отдельных промышленных типов месторождений в переменных количествах содержат Re, Cd, Ge, In, Tl, Ga, Co, Pt и др. На ряде объектов халькопирит оказался носителем необычного для этих руд ценного компонента – вольфрама, который может присутствовать в нем в промышленных количествах.

Эндогенные руды с учетом условий образования и комплексности представлены следующими группами.

Магматические ликвационные медно-никелевые (Cu-Ni) руды, генетически связанные с дифференцированными массивами основных и ультраосновных пород. Руды концентрируются преимущественно в придонной части интрузивов, реже во вмещающих интрузивы породах. Обычно руды представляют сплошные до густовкрапленных сульфидные агрегаты, сложенные минералами собственно магматической стадии – пирротином, халькопиритом, пентландитом и кубанитом с переменным количеством магнетита и платиноидов. На руды магматической стадии накладывается более поздний гидротермальный парагенезис, связываемый рядом исследователей с автотасоматическими явлениями, включающий целый комплекс разнообразных сульфидов, сульфоарсенидов, что весьма усложняет как минеральный, так и химический состав этих руд.

В случае небольших глубин и более быстрого остывания магматической камеры процесс ликвации магмы с пространственным обособлением сульфидной и силикатной составляющей не доходит до конца. В этом случае возникают руды вкрапленной текстуры.

Магматические ликвационные медно-никелевые руды характеризуются весьма богатым набором попутных ценных компонентов, среди которых наибольшую ценность имеют платиноиды.

Медно-порфировые руды представляют собой крупные скопления медной (Cu) или медно-молибденовой (Cu-Mo) прожилково-вкрапленной минерализации в порфировых интрузивах умеренно кислого состава. Рудные тела имеют форму штокверков. Штокверк представляет собой некоторый объем интрузивного тела, содержащий прожилково-вкрапленную рудную минерализацию. В плане такие штокверки кольцевой или овальной формы при цилиндрической или конической в разрезе. Медно-порфировые руды относятся к *высокотемпературным гидротермальным образованиям*. Рудная минерализация, представленная в основном халькопиритом и молибденином в разных соотношениях, приурочена к кварцево-сульфидным прожилкам. В рудах присутствуют также в различных соотношениях борнит, халькозин, сульфосоли меди, галенит, сфалерит, пирит, иногда самородное золото, серебро. Руды содержат попутные ценные компоненты (Se, Te, Re, Au, Ag, Zn, Pb). Вмещающие породы метасоматически изменены, что выражается в окварцевании, пропицитизации и аргиллизации.

Медноколчеданные (Cu), колчеданные медно-цинковые (Cu-Zn), полиметаллические и колчеданно-полиметаллические (Cu-Pb-Zn) руды в вулканогенно-осадочных толщах относятся к *среднетемпературным образованиям*. Основным промышленным минералом меди в них является халькопирит. В значительно меньшем количестве в них отмечаются такие медные минералы как эндогенные борнит и халькозин, медные сульфосоли. Постоянные компоненты этих руд Pb-Zn представлены галенитом и сфалеритом. В рудах в переменном количестве постоянно присутствует пирит. В случае трехкомпонентных руд (Cu-Pb-Zn) при небольшом количестве пирита они относятся к полиметаллическим. При этом основные рудные компоненты находятся в соотношении $Cu < Pb < Zn$. В случае более высокого содержания желтых сульфидов – халькопирита и особенно пирита они относятся к колчеданно-полиметаллическим. Большинство этих месторождений согласно последним представлениям относятся к гидротермально(вулканогенно)-осадочному типу и приурочены к вулканогенно-осадочным толщам связанным в одних случаях с гомодромным, в других с антидромным базальт-риолитовым магматизмом.

Руды имеют зернистые, реже колломорфные структуры, сплошные, слоистые, вкрапленные, прожилково-вкрапленные текстуры. Вмещающие породы обычно интенсивно метасоматически изменены, особенно со стороны лежащего бока рудных тел. Это выражается в окварцевании, серицитизации, хлоритизации, аргиллизации, реже карбонатизации и отальковании. Соответствующие названным процессам минералы представляют нерудную составляющую руд.

Ряд месторождений меди относятся к скарновому типу. Медносульфидные руды соответствуют среднетемпературной гидротермальной стадии, наложенной на собственно скарновый парагенезис, представленный гранат пироксеновым агрегатом с амфиболами, эпидотом. В состав нерудного агрегата входят и более поздние кварц, кальцит, хлорит. Основным рудным минералом меди является халькопирит. Обычно руды этого типа комплексные. Помимо меди в них промышленную ценность представляют железо (магнетит), свинец (галенит), цинк (сфалерит), золото, кобальт (в составе пирита), реже молибден (молибденит).

Промышленные скопления самородной меди, генетически относящиеся к *низкотемпературным гидротермальным образованиям*, обычно являются близповерхностными и связаны с основными породами. Это жильная либо вкрапленная минерализация, представленная бессульфидными минеральными комплексами, в состав которых входят такие низкотемпературные минералы, как пренит, цеолиты, кальцит, хлорит. Источником меди в этом случае выступают основные породы, которые характеризуются повышенным кларком меди. Поднимающиеся гидротермальные растворы рафинируют из пород медь и вблизи дневной поверхности переотлагают её в самородной форме. И хотя количество подобных месторождений невелико, а их запасы небольшие, они интересны в генетическом плане.

Экзогенные медные руды слагают зоны окисления, сформированные за счет вышеописанных эндогенных объектов. Основными минералами окисленных руд являются кислородные соли, среди которых явно преобладают карбонаты и сульфаты. На некоторых объектах промышленное значение в окисленных рудах приобретают самородная мель, куприт и вторичные сульфиды, представленные в основном халькозином.

Длительно существующие хорошо проработанные зоны окисления имеют обычно зональное строение, наиболее четко выраженное на месторождениях с рудами сложного минерального и элементного состава. Так в процессе формирования зоны окисления за счет полиметаллических (Cu-Pb-Zn) руд происходит перераспределение элементов по вертикали. В идеальном варианте в разрезе зоны окисления таких месторождений формируются следующие подзоны, сложенные характерными минералами и имеющие соответствующий геохимический профиль Верхняя часть рудных

тел, когда-то вышедших в условия дневной поверхности, сложена полностью окисленными и выщелоченными образованиями, представляющими «железную шляпу», состоящую из гидроксидов и оксидов железа с примесью глинистых минералов, кремнезема и др. Далее вниз по разрезу располагается *горизонт сульфатов (ярозит) и богатых окисленных руд карбонатного состава* с церусситом, малахитом и азуритом, который на глубине часто сменяется горизонтом *богатых оксидных руд*, сложенных в основном оксидом меди (купритом) и самородной медью с примесью церуссита. Далее, ниже уровня грунтовых вод располагается горизонт, называемый *подзоной вторичного сульфидного обогащения*, основными компонентами которого являются гипергенные сульфиды меди – халькозин и меньше ковеллин часто с реликтами первичных сульфидов, в том числе свинца и цинка. Таким образом, в гипергенном разрезе полиметаллических месторождений происходит переход сверху вниз от «железной шляпы», сложенной в большей мере оксидами и гидроксидами железа практически при полном отсутствии Cu, Pb, Zn к карбонатным рудам Pb-Cu состава и далее к рудам существенно Cu состава, сложенных вторичными сульфидами и самородной медью, которые на глубине уже за пределами зоны гипергенеза переходят в первичные сульфидные Cu-Pb-Zn состава (рис.).

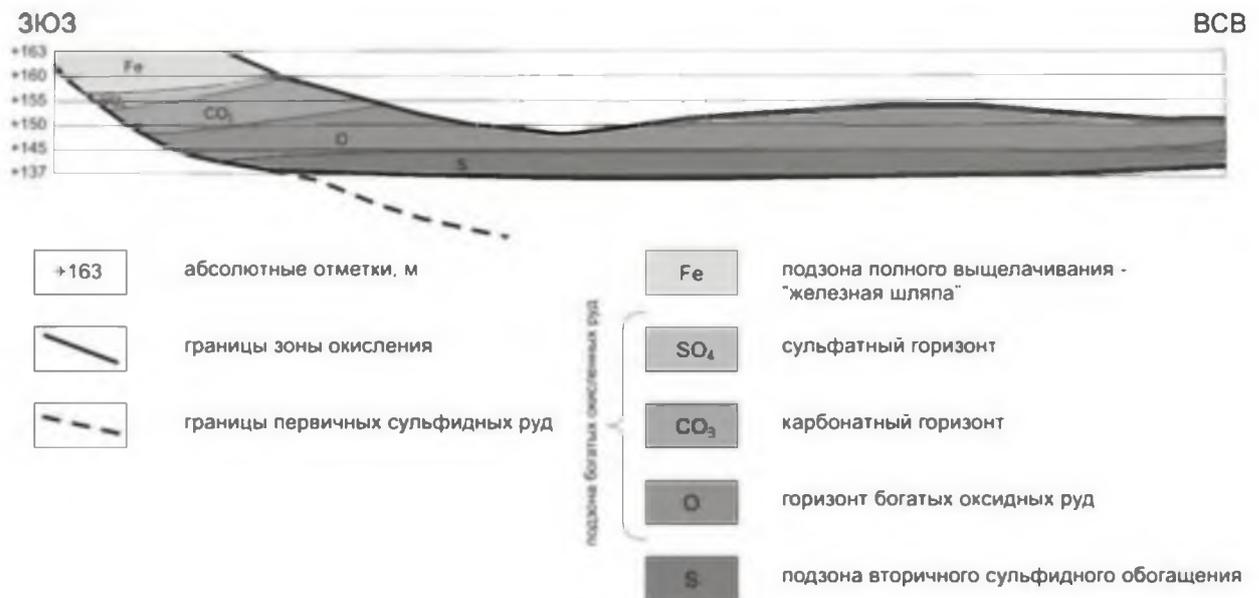


Рис. Идеализированный разрез зоны окисления одного из рудноалтайских колчеданно-полиметаллических месторождений.



а)



б)

Рис. Окисленные медные карбонатные малахит-азуритовые руды: а) штуфной образец; б) стенка забоя шахты.

Установлено, что появления в окисленных рудах в заметных количествах медного силиката – хризоколлы, отмечается лишь при окислении скарных медных руд. Считается, что присутствующие в первичных рудах гранаты в процессе выветривания становятся источником кремнезема, необходимого для образования хризоколлы.



Рис. Основные районы расположения месторождений медных руд и их балансовые запасы в России.

Окисленные руды характеризуются зернистыми, порошковатыми, колломорфными структурами, сплошными, вкрапленными, натечными, прожилковыми, друзовыми текстурами. Часто окисленные руды по содержанию меди относятся к богатым.

Алюминий (Al) –

Главные рудные минералы:

гидроксиды: **гиббсит (гидраргиллит) – $Al(OH)_3$** , бёмит – $\gamma-AlO(OH)$, диаспор – $\alpha-AlO(OH)$,
 алюмосиликаты: **нефелин – $KNa_3[AlSiO_4]_4$** ;
 сульфаты: алуниит – $KAl_3(OH)_6[SO_4]_2$.

Второстепенные рудные минералы:

алюмосиликаты: лейцит – $K[AlSi_2O_6]$.

Потенциальные рудные минералы:

силикаты: дистен (кианит) – $Al_2O[SiO_4]$, андалузит – $Al_2O[SiO_4]$, силлиманит – $Al_2O[SiO_4]$,
 каолинит – $Al_4[Si_4O_{10}](OH)_8$;
 карбонаты: давсоит – $NaAl(OH)_2[CO_3]$;
 сульфаты: алломинит – $Al_2(OH)_2[SO_4] \cdot 7H_2O$

Генетический тип месторождений	Главные рудные минералы Al	Второстепенные и попутные рудные минералы	Главные нерудные минералы	Попутные ценные компоненты	Характерные структуры и текстуры руд	Примеры месторождений
1. Бокситовые месторождения кор выветривания (в том числе переотложенные) по породам основного, среднего и кислого состава в условиях тропиков и субтропиков	Моногидратные бокситы: бёмит; тригидратные бокситы: гиббсит	Диаспор, рутил, гематит, гётит	Каолинит	Ga, V , Ti, Sc, Fe	Землистая; полосчатая, сланцеватая, псевдобобовая	Висловское (Россия), Африка, Индия, Южная Америка, Австралия
2. Бокситовые месторождения осадочные: а) континентальные озёрно-болотной фации; б) прибрежно-морские (переотложенные)	а) Гиббсит, бёмит; б) диаспор, бёмит	а) Гётит; б) гиббсит, гётит, гематит	а) Каолинит, карбонаты, углефицированный материал; б) карбонаты, глинистые минералы	Fe	а) Каменистая, рыхлая, глинистая; обломочная, оолитобобовая, брекчиевая, сплошная; б) оолитовая, обломочная; слоистая	а) Тихвинская, Тиманская группа, Восточная Сибирь (Россия); б) Северо-Уральский бокситовый район (Россия), Венгрия, Франция, Южная Америка
3. Магматическое в связи со щелочными породами: а) уртиты, ийолиты, тералиты; б) сынныриты	а) Нефелин; б) нефелин	а) Апатит, лопарит, титаномагнетит б) лейцит	а) Пироксены, полевые шпаты, сфен; б) калиевый полевой шпат, пироксен	а-б) Ga , Rb, Cs, Y, Sr, Nb, Ti б) K	Зернистая; массивная, пятнистая	Кузнецкий Алатау, Кольский полуостров, Северное Прибайкалье, Забайкалье (Россия)

Генетический тип месторождений	Главные рудные минералы Al	Второстепенные и попутные рудные минералы	Главные нерудные минералы	Попутные ценные компоненты	Характерные структуры и текстуры руд	Примеры месторождений
<p>4. Гидротермальные:</p> <p>а) в связи с процессами алунитизации алломосиликатных пород в районах молодого вулканизма;</p> <p>б) низкотемпературные близповерхностные</p>	<p>а) Алунит</p> <p>б) давсонит</p>	<p>а) Диаспор</p> <p>б) киноварь, галенит</p>	<p>а) Кварц, глинистые минералы, барит</p> <p>б) карбонаты, флюорит, кварц</p>	<p>а) Ba, P, V, Ga;</p> <p>б) Hg, F</p>	<p>а) Зернистая, землистая; вкрапленная, сплошная;</p> <p>б) зернистая; вкрапленная, прожилково-вкрапленная</p>	<p>а) Загликское (Кавказ), Казахстан, Приморье (Россия);</p> <p>б) Кузнецкий Алатау (Россия), Италия, Канада, США</p>
<p>5. Метаморфогенные:</p> <p>высокоглинозёмистые сланцы амфиболитовой фации</p>	<p>Дистен, силлиманит, андалузит</p>	<p>Ставролит</p>	<p>Кварц, слюды</p>	<p>–</p>	<p>Зернистая; вкрапленная, сланцеватая</p>	<p>Кольский полуостров, Урал, Иркутская область, Красноярский край (Россия)</p>
<p>6. Экзогенные:</p> <p>а) коры выветривания глинистого профиля по кислым и щелочным породам;</p> <p>б) воздействие сернокислых растворов на терригенно-карбонатные породы</p>	<p>а) Каолинит;</p> <p>б) алюминит</p>		<p>а) Кварц, галлуазит, нонтронит;</p> <p>б) Карбонаты, глинистые минералы</p>	<p>–</p>	<p>а) Порошковатые, сплошные массы;</p> <p>б) натёчные, сплошные массы</p>	<p>а) Франция, Южная Америка;</p> <p>б) Восточная Сибирь (Россия), Германия, Франция</p>

Медь (Cu) –

Главные рудные минералы: *самородные:* медь – Cu;
сульфиды: халькопирит – CuFeS₂, халькозин – Cu₂S, борнит – Cu₅FeS₄, кубанит – CuFe₂S₃;

Второстепенные рудные минералы: *сульфиды:* ковеллин – CuS; *сульфосоли:* блеклые руды – Cu¹⁺₁₀Cu²⁺₂(As, Sb)₄S₁₃, энаргит – Cu₃AsS₄;

оксиды: куприт – Cu₂O, тенорит – CuO;

кислородные соли: малахит – Cu₂(OH)₂[CO₃], азурит – Cu₃(OH)₂[CO₃]₂, брошаитит – Cu₄(OH)₆[SO₄], атакамит – Cu₂Cl(OH)₃;

силикат: хризоколла – Cu₄(OH)₄[Si₄O₁₀]·nH₂O

Генетический тип месторождений	Главные рудные минералы	Второстепенные и попутные рудные минералы	Главные нерудные минералы, породы	Попутные ценные компоненты	Характерные структуры и текстуры руд	Примеры месторождений
1. Магматический медно-никелевый в расщепленных интрузивах формаций базит-гипербазитового ряда Cu-Ni	Халькопирит, кубанит, пентландит, пирротин	Борнит, халькозин, ковеллин, магнетит, ильменит, платиноиды	Пироксены, основные плагиоклазы, оливин	Co, Pt, Ag, Au, Se, Te	Гнездово-вкрапленная, брекчиевидная, сплошная, массивная	Норильская, Печенгская группа (Россия), Канада, ЮАР
2. Карбонатитовый в ультраосновных щелочных породах Cu	Борнит, халькопирит	Магнетит, бадделейт (ZrO ₂), кубанит	Кальцит, анкерит, оливин, флогопит, апатит	Fe, P, Zr, U, Th, Au, Ag	Вкрапленная	Сибирь, Кольский полуостров (Россия), Палабора (ЮАР)
3. Гидротермальный высокотемпературный, <i>меднопорфировый</i> в порфировых интрузивах кислого состава Cu, Cu-Mo	Халькопирит, борнит	Молибденит, блеклые руды, энаргит, халькозин, пирит, магнетит, сфалерит, галенит	Кварц, полевые шпаты, слюды	Mo, Re, Au, Ag, Se, Te	Прожилково-вкрапленная, штокверковая	Песчанка (Чукотка, Россия), Коунрад (Казахстан), Каджаран (Армения), Кальмакыр (Узбекистан), Чили, Мексика, США, Канада, Монголия, Китай
4. Гидротермальные низкотемпературные в связи с основными породами (бессульфидные) Cu	Самородная медь	Куприт, малахит	Кальцит, цеолиты, пренит, хлорит, эпидот	–	Вкрапленная, прожилковая	Урал, Кольский полуостров, Горная шория (Россия), Казахстан, США
5. Скарновый, известковоскарновый Fe-Cu, Fe-Cu-Co	Халькопирит, борнит,	Пирит, магнетит, пирротин, молибденит, сфалерит	Пироксены, гранаты, эпидот, кальцит, скаполит	Fe, Au, Ag, Co, Pb, Zn, Mo, Se, Te	Вкрапленная, прожилково-вкрапленная	Турьинская группа (Урал, Россия), Юлия (Сибирь, Россия), Саякское (Казахстан), США, Мексика
6. Вулканогенно-осадочные колчеданные, колчеданно-полиметаллические, полиметаллические, в вулканогенных и вулканогенно-осадочных базальтоидных формациях Cu, Cu-Zn, Cu-Pb-Zn	Халькопирит, сфалерит, пирит, галенит,	Борнит, блеклые руды, халькозин	Кварц, кальцит, сидерит, хлорит, серицит, барит	Au, Ag, Zn, Pb, Se, Te, Cd, In, Co	Массивная, полосчатая, вкрапленная, прожилковая	Гайское, Сибайское, Учалинское, Блявинское (Урал), Урупское (Кавказ), Золотушинское, Тишинское, Корбалихинское, Степное (Рудный Алтай), Канада, Япония, Финляндия, Испания, Австралия

<p>7. Стратиформные красноцветных (медистых) песчаников и сланцев Cu, Cu-Mo, Cu-U</p>	<p>Халькопирит, борнит, халькозин, энаргит иногда сам медь</p>	<p>Пирит, сфалерит, галенит, магнетит, молибденит, кобальтин</p>	<p>Карбонатно-терригенные отложения</p>	<p>Ag, Se, Te, Zn, Pb, Mo, Re, Ni, Co</p>	<p>Прожилково-вкрапленная, вкрапленная</p>	<p>Удоканское (Россия), Джезказган (Казахстан), Германия, Африка</p>
<p>8. Зоны окисления (в том числе <i>вторичного сульфидного обогащения</i>) месторождений всех генетических типов Cu-Pb, Cu-Pb-Zn, Cu-Pb-V</p>	<p>Самородная медь, куприт, малахит, азурит, халькозин</p>	<p>Брошантит, хризоколла, атакамит, ковеллин, тенорит, церуссит, смитсонит, ванадинит</p>	<p>Гётит, гидрогётит, кварц, барит, ярозит, глинистые минералы</p>	<p>Pb, Ag, Au, V</p>	<p>Вкрапленная, прожилково-вкрапленная, сплошная</p>	<p>Рубцовское, Захаровское, Степное (Рудный Алтай, Россия), Джезказган (Казахстан), Удокан (Россия), Александринское, Западно-Озерное (Урал, Россия), Африка, Австралия, США</p>
<p>9. Сульфидные руды мирового океана медно-цинкового состава: металлоносные осадки и массивные сульфиды – «чёрные курильщики» Cu-Zn</p>	<p>Халькопирит, кубанит, сфалерит, вюртцит, пирит, марказит</p>	<p>Галенит, халькозин, борнит, блеклые руды, молибденит, пирротин, халькантит, атакамит, гидроксиды железа</p>	<p>Кремнезем</p>	<p>Zn, Ag, Au, Pb, Mo, Ni</p>	<p>Сплошная, брекчиевидная, вкрапленная</p>	<p>Зоны Восточно-Тихоокеанского поднятия, Срединно-Атлантического хребта</p>

Свинец (Pb) –

Главные рудные минералы: сульфид: галенит – PbS ;
карбонат: церуссит – $Pb[CO_3]$;
сульфаты: англезит – $Pb[SO_4]$, биверит – $Pb(Fe, Cu, Al)_3(OH)_6[SO_4]_2$.

Второстепенные рудные минералы: сульфосоли: буланжерит – $Pb_5Sb_4S_{11}$, бурнонит – $PbCuSbS_3$;
теллурид: алтаит – $PbTe$; селенит: клаусталит – $PbSe$;
кислородные соли: илюмбоярозит – $Pb_{0,5}Fe_3(OH)_6[SO_4]_2$, пироморфит – $Pb_5[PO_4]_3Cl$, ванадинит – $Pb_5[VO_4]_3Cl$, миметезит – $Pb_5[AsO_4]_3Cl$

Цинк (Zn) –

Главные рудные минералы: сульфиды: сфалерит – ZnS , вюртцит – ZnS ;
карбонат: смитсонит – $Zn[CO_3]$.

Второстепенные рудные минералы: карбонат: гидроцинкит – $Zn_5(OH)_6[CO_3]_2$;
силикаты: каламин – $Zn_4(OH)_2[Si_2O_7] \cdot H_2O$, виллемит – $Zn_2[SiO_4]$

Генетический тип месторождений	Главные рудные минералы Pb, Zn	Второстепенные и попутные рудные минералы	Главные нерудные минералы	Попутные ценные компоненты	Характерные структуры и текстуры руд	Примеры месторождений
1. Гидротермальные (жильные) <i>свинцово-цинковые</i> Pb-Zn	Галенит, сфалерит	Халькопирит, пирит, блеклые руды	Кварц, карбонаты, барит	Ag, Au, Cu, Cd, Se, Te	Зернистая; вкрапленная, брекчиевидная, прожилково-вкрапленная	Садонское, Згидское (Северный Кавказ), Средняя Азия, Германия, Канада
2. Вулканогенно-осадочные полиметаллические, барит-полиметаллические, колчеданно-полиметаллические в вулканогенных и вулканогенно-осадочных толщах: Cu-Pb-Zn	Сфалерит, галенит, халькопирит	Пирит, блеклые руды, алтаит, клаусталит, борнит, халькозин, вюртцит, барит	Кварц, серицит, хлорит, карбонаты,	Cu, Cd, Au, Ag, Se, Te, Tl, Sb, As, Ba	Зернистая; сплошная, полосчатая, вкрапленная, прожилковая	Тишинское, Малеевское, Золотухинское, Корбалихинское, (Рудный Алтай), Озерное (Забайкалье); Япония, Канада, Испания, Швеция
3. Вулканогенно-осадочные колчеданно-полиметаллические в терригенных (часто углеродистых) толщах, испытавшие метаморфизм Cu-Pb-Zn, Cu-Zn	Сфалерит, галенит	Пирит, халькопирит, пирротин, сульфосоли	Кварц, слюды, карбонаты, графит, амфиболы	Au, Ag, Cu, Cd, As, Tl	Зернистая; слоистая, массивная, гнездово-, прожилково-вкрапленная	Холоднинское (Бурятия), Горевское (Енисейский край, Сибирь), Канада, Австралия

Генетический тип месторождений	Главные рудные минералы Pb, Zn	Второстепенные и попутные рудные минералы	Главные нерудные минералы	Попутные ценные компоненты	Характерные структуры и текстуры руд	Примеры месторождений
4. Стратиформные свинцово-цинковые в карбонатных толщах Pb-Zn	Сфалерит, галенит	Пирит, халькопирит, сульфосоли, барит,	Кальцит, доломит, кварц, флюорит	Te, Ge, Cd, Ag	Зернистая; вкрапленная, прожилково-вкрапленная, сплошная, сливная	Сардана (Россия), Миргалимсай, Ачисай (Казахстан), Узбекистан, Канада, Италия
5. Скарновые свинцово-цинковые Pb-Zn	Галенит, сфалерит	Халькопирит, бурнонит, буланжерит, арсенопирит, пирротин, пирит	Гранаты кальциевого ряда, пироксены, роговая обманка, эпидот, хлориты	Bi, Cd, Ag, Au	Зернистая; массивная, пятнистая, полосчатая, вкрапленная	Дальнегорское (Приморье, Россия), Средняя Азия, Казахстан, Южная Америка
6. Зоны окисления сульфидных месторождений всех генетических типов Cu-Pb, Cu-Pb-Zn, Cu-Pb-V	Церуссит, англезит, малахит, азурит, халькозин	Смитсонит, куприт, плюмбоярозит, ванадинит, пирроморфит, миметезит, самородная медь, виллемит, каламин, гидроцинкит, деклуазит	Глинистые минералы, гетит, гидрогетит	Cu, Ag, Au, V	Порошковая, землистая, зернистая; сплошная, натечная, друзовая	Рубцовское, Захаровское, Риддерское, Золотушинское и др. (Рудный Алтай, Россия), Африка, Австралия

НИКЕЛЬ (Ni), КОБАЛЬТ (Co) –

Главные рудные минералы: *сульфиды:* пентландит – $Ni_4Fe_4(Co,Ni,Fe,Ag)S_8$;
сульфоарсениды: герсдорфит – $Ni[AsS]$, кобальтин – $Co[AsS]$;
арсениды: саффлорит – $Co[As_2]^{2-}$, раммельсбергит – $Ni[As_2]^{2-}$, шмальтин – $Co^{3+}_4[As_4]^{4-}_3$, хлоантит – $Ni^{3+}_4[As_4]^{4-}_3$,
скуттерудит – $(Co,Ni)^{3+}_4[As_4]^{4-}_3$;
силикаты: гарниерит – $Ni_4[Si_4O_{10}](OH)_4 \cdot 4H_2O$, никелевый ионитроит – $(Fe,Al,Ni)_2[Si_4O_{10}](OH)_2 \cdot nH_2O$,
никелевые хлориты – $(Mg,Fe,Ni,Al)_6[(Si,Al)_4O_{10}](OH)_8$.

Второстепенные рудные минералы: *сульфиды:* миллерит – NiS , никелистый пирротин – $(Fe,Ni)S$, кобальтовый и никелевый пирит – $(Fe,Ni,Co)[S_2]$,
полидимит – $Ni^{2+}Ni^{3+}_2S$, линнеит – $Co^{2+}Co^{3+}_2S_4$;
арсениды: никелин – $NiAs$;

Гипергенные минералы – индикаторы оруденения: *арсенаты:* эритрин – $Co_3[AsO]_2 \cdot 8H_2O$, аннабергит – $Ni_3[AsO]_2 \cdot 8H_2O$

Генетический тип месторождений (комплексность руд)	Главные рудные минералы Ni, Co	Второстепенные и попутные рудные минералы	Главные нерудные минералы	Попутные ценные компоненты	Характерные текстуры руд	Примеры месторождений
1. Магматические медно-никелевые в расслоенных интрузивах формаций базит-гипербазитового ряда Cu-Ni	Пентландит, халькопирит, кубанит, пирротин	Герсдорфит, кобальтин, миллерит, магнетит, ильменит, платиноиды	Пироксены, основные плагиоклазы, оливин	Co, Pt, Ag, Au, Se, Te, Ti, Sn	Гнездово-вкрапленная, брекчиевидная, массивная	Норильская, Печенгская группа (Россия), Канада
2. Гидротермальные среднетемпературные арсенидные и сульфоарсенидные (пятиэлементная формация) Co-Ni-Ag-Bi-U	Кобальтин, герсдорфит, шмальтин, хлоантит, никелин, скуттерудит	Саффлорит, раммельсбергит, сам. серебро, аргентит, электрум, висмутин, сам. висмут, киноварь, антимонит, уранинит	Кальцит, доломит, гематит, кварц, хлорит, барит	Au, Sb, Hg	Вкрапленная, прожилковая, прожилково-вкрапленная, полосчатая, брекчиевидная	Хову-Аксы, Северо-Восток (Россия), Канада, Марокко
3. Скарновые, известковоскарновые железорудные Fe-Cu-Co	Кобальтовый пирит	Магнетит, халькопирит, кобальтин	Гранаты кальциевого ряда, пироксены, эпидот, кальцит, кварц	Fe, Cu	Зернистая, сплошная, вкрапленная	Соколовское, Сарбайское (Казахстан), Дашкесанское (Азербайджан), Абаканское (Хакасия)
4. Латеритное выветривание по основным, ультраосновным породам (никеленосные силикатные коры выветривания) Ni-Fe	Гарниерит, нонитронит, асболан (Сопсилломелан)	Никелевые хлориты, гидроксиды железа и марганца	Серпентиниты, магнетит, халцедон	Co	Порошковая, рыхлая, землистая, прожилковая	Кимперсайское, Аккермановское, Серовское, Черемшанское, Синарское, Липовское, Буруктальское (Урал), США, Куба, Бразилия, Австралия, Индонезия
5. Глубоководные железо-марганцевые конкреции дна океана (ЖМК) (многокомпонентные)	Псилломелан, вернадит,	Гидрогётит, тодорокит, бернессит	Опал, рутил, анатаз, барит, карбонаты, монтмориллонит, филлипсит	Ni, Co, Cu, Mo, V, TR, Zp и др.	Конкреции	Тихий океан (зона Кларифон Клиппертон)

ВОЛЬФРАМ (W) –

Главные рудные минералы: *вольфраматы:* **вольфрамит** – $(\text{Mn,Fe})[\text{WO}_4]$, ферберит – $\text{Fe}[\text{WO}_4]$, гюбнерит – $\text{Mn}[\text{WO}_4]$, **шеелит** – $\text{Ca}[\text{WO}_4]$.

Гипергенные минералы – индикаторы оруденения: *гидроксид:* тунгстит – $\text{WO}_2(\text{OH})_2$;
вольфраматы: ферритунгстит – $\text{Ca}_2\text{Fe}^{2+}_2\text{Fe}^{3+}_2[\text{WO}_4]_7 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, купротунгстит – $\text{Cu}_2(\text{OH})_2[\text{WO}_4]$.

МОЛИБДЕН (Mo) –

Главные рудные минералы: *сульфид:* молибденит – MoS_2 .

Второстепенные рудные минералы: *молибдаты:* вульфенит – $\text{Pb}[\text{MoO}_4]$, молибдошеелит – $\text{Ca}[(\text{W,Mo})\text{O}_4]$, ферримолибдит – $\text{Fe}^{3+}_2[\text{MoO}_4]_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$

Гипергенные минералы – индикаторы оруденения: *молибдат:* новеллит – $\text{Ca}[\text{MoO}_4]$;
оксид: молибдит – MoO_3

Генетический тип месторождений (комплексность руд)	Главные рудные минералы	Второстепенные и попутные рудные минералы	Главные нерудные минералы	Попутные ценные компоненты	Характерные структуры и текстуры руд	Примеры месторождений
1. Гидротермальные в связи с кислым магматизмом, жильные и штоковые: <i>высокотемпературные</i> а) молибденовые Mo б) медно-молибденовые Cu-Mo в) вольфрам-молибденовые W-Mo г) олово-вольфрамовые Sn-W	а) молибденит б) молибденит, халькопирит в) молибденит, вольфрамит, шеелит г) касситерит, вольфрамит д) серебро-золото-вольфрамовые Ag-Au-W	а) пирит, халькопирит, галенит, сфалерит, висмутин, вольфрамит б) пирит, блеклые руды, борнит, галенит, сфалерит в) халькопирит, висмутин г) шеелит, молибденит, висмутин, халькопирит д) арсенопирит, пирит, халькопирит, сфалерит	а) кварц, флюорит б) кварц, серицит, полевые шпаты, биотит, каолинит в) кварц, мусковит г) кварц, турмалин, мусковит, серицит, флюорит д) кварц	а) Cu , Pb, Zn, Bi, W б) Re , Au, Ag, Bi, Se, Te, Ge в) Cu , Bi г) Bi , Ta , Nb , Sc, Cu д) Sb	Прожилковая, прожилково-вкрапленная, режеквиевидная, вкрапленная	а) Клаймакс (США), Ульматта, Шахмата, Жирекен (Россия); б) Сорское (Россия), Каджаран (Армения), Чукикамата (Чили) в) Калгутинское (Россия), Китай, Аргентина; г) Иультин (Чукотка, Россия), Холтосон, Бом-Горхон, Букука (Забайкалье, Россия), Богуты (Казахстан), Китай, Канада, Бирма, Великобритания; д) Дальний Восток (Россия)

е) ртутно-сурьмяно-вольфрамовые Hg-Sb-W (стратиформный ?)	е) киноварь-антимонит-ферберитовые	е) антимонит	е) кварц	е) Cu, Zn		е) Бурун-Шивея (Забайкалье, Россия), Грузия;
2. Скарновые, известковоскарновые вольфрам-молибденовые и олово-вольфрамовые W-Mo, Sn-W	Шеелит, молибденит	Молибдошеелит, вольфрамит, висмутин, касситерит, сфалерит, халькопирит, магнетит, пирротин	Пироксены, гранаты, плагиоклаз, кварц, эпидот, хлорит, карбонаты	Bi, Be, Cu, Au, Ag	Вкрапленная, массивная, реже брекчиевидная, прожилковая, полосчатая	Тырныауз (Кавказ), Восток-2 (Россия), Чорух-Дайрон, Игличке (Средняя Азия), Китай, Канада
3. Грейзеновые: вольфрам-молибденовые, олово-висмутовые Mo-W-Sn-Bi	Вольфрамит, касситерит, молибденит	Шеелит, висмутин, берилл, касситерит, станнин	Кварц, топаз, мусковит, биотит, турмалин, флюорит, циннвальдит	Nb, Ta, Be, Au, Li	Вкрапленная, друзовая, прожилковая	Спокойнинское (Россия), Акчатау, Кара-Оба (Казахстан), Монголия, Китай, Австралия
4. Россышные вольфрамовые W	Вольфрамит, шеелит	Касситерит	Кварц	Sn, Bi, Au	Рыхлая	Бурятия, Якутия, Казахстан, Китай, Монголия

Олово (Sn) –

Главные рудные минералы:

оксид: **касситерит** – SnO_2 ;

сульфиды: станнин – $\text{Cu}_2(\text{Fe,Zn})\text{SnS}_4$, тиллит – PbSnS_2 ;

сульфостаннаты: цилиндрит – $\text{Pb}_3\text{Sn}_4\text{Sb}_2\text{S}_{14}$, франкеит – $\text{Pb}_5\text{Sn}_3\text{Sb}_2\text{S}_{14}$;

гидростаннаты: мушистонит – $(\text{Cu,Zn,Fe})\text{Sn}(\text{OH})_6$, натанит – $\text{FeSn}(\text{OH})_6$, висмирновит – $\text{ZnSn}(\text{OH})_6$,

варламовит – $(\text{Fe,Sn})\text{O}(\text{OH})$;

Второстепенные рудные минералы:

силикат: малайяит – $\text{CaTiO}[\text{SiO}_4]$;

сульфид: канфильдит – Ag_8SnS_6 ;

бораты: норденшельдин – $\text{CaSn}[\text{BO}_3]_2$, оловоносный людвицит – $(\text{Mg,Fe})(\text{Fe,Sn})\text{O}[\text{BO}_3]$,

гулсит – $(\text{Fe,Mg})_2(\text{Fe,Sn})\text{O}_2[\text{BO}_3]$;

Потенциальные рудные минералы:

оловоносные силикаты: гранаты, пироксены, амфиболы;

интерметаллические соединения: звягенцевит – $(\text{Pd,Pt})_3(\text{Pb,Sn})$, таймырит – Pd_2CuSn , паоловит – Pd_2Sn

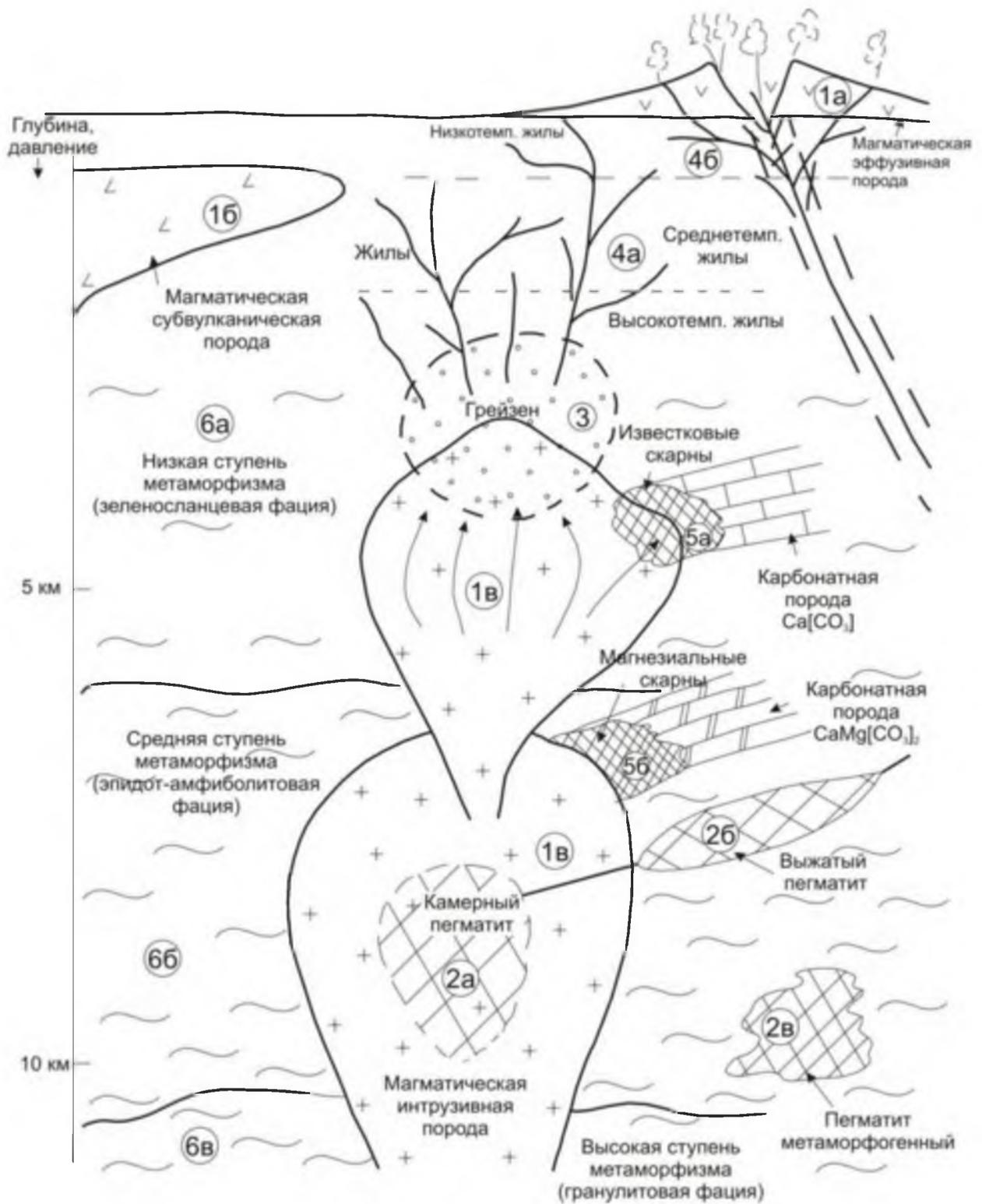
Генетический тип месторождений	Главные рудные минералы	Второстепенные и попутные рудные минералы	Главные нерудные минералы	Попутные ценные компоненты	Характерные структуры и текстуры руд	Примеры месторождений
1. Пегматитовые (редкометалльные пегматиты) W-Sn-Nb	Касситерит	Сподумен, петалит, амблигонит, танталит, вольфрамит	Кварц, микроклин, альбит, топаз, турмалин	Ta, Nb, Sc, Rb, Li	Вкрапленная	Восточная Сибирь (Россия), США, Канада
2. Грейзеновые по породам гранитных массивов и ороговикованным терригенным породам экзоконтакта Sn-W	Касситерит, вольфрамит	Циннвальдит, висмутин, сам. висмут, шеелит, халькопирит, сфалерит, галенит, молибденит, гематит	Кварц, альбит, ортоклаз, мусковит, флюорит, топаз, турмалин	Ta, Nb, Li, Mo	Прожилково-вкрапленная	Чукотка, Якутия, Забайкалье (Россия), США, КНР
3. Скарновые: а) известково-скарновые Sn-W б) магнезиально-скарновые Sn-B	а) Касситерит, шеелит, халькопирит, галенит, сфалерит, магнетит; б) касситерит, магнетит	а) Пирротин, пирит, станнин, тиллит, висмутин, сульфосоли (цилиндрит, франкеит), малайяит, б) норденшельдин, людвицит, пирротин	а) Пироксены, гранаты, гроссуляр-андрадитового ряда, амфиболы, флюорит, кальцит, хлорит; б) форстерит, тремолит, флогопит	а) Zn, Cu, Pb, Fe б) B, Fe	Вкрапленная, полосчатая, брекчиевидная	а) Приморье (Россия), Средняя Азия (Сарыбулак), КНР, Мексика б) Якутия
4. Плутоногенные гидротермальные высоко-, средне-, низкотемпературные	Касситерит	Станнин, цилиндрит, халькопирит, сфалерит, пирротин, арсенопирит, галенит, шеелит, висмутин	Кварц, турмалин, хлорит, адуляр, серицит, сидерит, анкерит	W, In, Bi	Прожилковая, брекчиевидная, полосчатая, друзовая, кокардовая	Россия: Чукотка (Валькумей), Якутия (Депутатское), Приморье (Хрустальное), Забайкалье (Хапчеранга, Шерловая гора), Канада. Австралия

Генетический тип месторождений	Главные рудные минералы Sn	Второстепенные и попутные рудные минералы	Главные нерудные минералы	Попутные ценные компоненты	Характерные структуры и текстуры руд	Примеры месторождений
5. Вулканогенно-гидротермальные	Касситерит (иногда деревянистое олово), станнын, висмутин	Франкеит, вольфрамит, халькопирит, сфалерит, галенит, аргентит, сам. серебро, пирротин	Кварц, турмалин, серицит, каолинит, опал, флюорит, барит, алуниит, халцедон	W, Ag, Pb, In	Прожилково-вкрапленная, друзовая, полосчатая	Джалинда, Хинганское (Россия), Боливия, Мексика, Япония
6. Зоны окисления олово-сульфидных месторождений	Гидростаннаты	Касситерит	Кварц, глинистые минералы	Cu, Zn, Pb	Рыхлая, землистая	Якутия (Россия), Мушiston (Таджикистан)
7. Россыпные: элювиальные, делювиальные, аллювиальные, прибрежно-морские, тектонических уступов	Касситерит, колумбит, танталит, золото	Циркон, сподумен, вольфрамит, шеелит,	Турмалин, кварц	Nb, Ta, Sc, W, Bi	Рыхлая	Россия: Чукотка (Пырькай), Якутия (Депутатское), Приморье (Воскресенское), Индонезия, Малайзия, Таиланд, КНР, Бразилия
8. Магматическое Sn в качестве попутного элемента в ликвидационных Cu-Ni рудах	См. минералы Cu и Ni	Интерметаллические соединения	Пироксены, плагиоклазы		Сплошная, вкрапленная	Норильская, Печенгская группа (Россия), Канада

Список вопросов по цветным металлам

1. Что относится к традиционным рудам Al. Минеральный состав этих образований. Структуры, текстуры.
2. Какие алюмосиликаты алюминия имеют промышленное значение. Их происхождение. Попутные ценные компоненты.
3. Минеральный состав высокоглиноземистых метаморфических пород. Их промышленное значение.
4. Условия образования бокситов кор выветривания. Почему они часто имеют красный цвет.
5. Класс соединения и формула алунита. Его происхождение.
6. Формула нефелина. Его практическое значение и диагностические признаки.
7. Происхождение, минеральный состав силикатных руд алюминия.
8. Какие минералы алюминия рассматриваются как потенциальные рудные. Условия их образования.
9. Зональность отложения относительно береговой линии осадочных руд Fe, Al, Mn. Чем объясняется такая зональность.
10. Какие по элементному составу месторождения называют полиметаллическими. Их основной минеральный состав и генезис.
11. Названия и формулы главных промышленных минералов эндогенных руд Pb и Zn.
12. Формула церуссита. Его диагностические признаки и условия образования.
13. Разновидности сфалерита. Его диагностические признаки. Попутные ценные компоненты, связанные с ним.
14. Минеральный состав Cu-Pb-V руд. Условия их образования. Источник V.
15. Какие месторождения называют колчеданно-полиметаллическими. Их основной минеральный состав и генезис.
16. Причина разделения Pb и Zn в зоне окисления сульфидных месторождений. В каком случае Zn фиксируется в зоне окисления.
17. Формула смитсонита, его диагностические признаки, условия образования.
18. Минеральный состав вулканогенно-осадочных месторождений. Комплексность этих руд. Структуры, текстуры.
19. Формула галенита, его диагностические признаки. Попутные ценные компоненты, связанные с ним.
20. Какие минералы называют сульфосолями. Какие сульфосоли Pb представляют промышленную ценность.
21. Какой минерал является носителем Cd в эндогенных рудах. Когда в этом минерале накапливается Ga и Ge.
22. Названия и формулы 4 основных промышленных минералов Cu эндогенных руд.
23. Условия образования, главные минералы Cu-Ni руд.
24. Минеральный состав высокотемпературных гидротермальных Cu-Mo руд. Характерные текстуры этих руд.
25. Названия, формулы и класс соединений минералов Cu зеленого цвета из окисленных руд.
26. Какие минералы относятся к сульфосолям. Названия и формулы промышленных медных сульфосолей.
27. Основные минералы собственно магматической стадии ликвационных Cu-Ni руд. Структуры и текстуры этих руд.
28. Положение в разрезе и минеральный состав подзоны вторичного сульфидного обогащения.
29. Формулы и названия промышленных минералов Cu класса карбонатов. Их диагностические признаки. Происхождение.

30. Элементный и минеральный состав вулканогенно-осадочных руд рудноалтайского типа. Их отличие от руд уральского типа.
31. Формула куприта. Его диагностические признаки, положение в разрезе зоны окисления и условия появления.
32. Происхождение, основной минеральный состав, комплексность Cu-Ni руд норильского типа.
33. Основной промышленный минерал Co, Ni класса сульфидов. Его происхождение и диагностические признаки.
34. Названия и формулы сульфоарсенидов Co, Ni. Их общие диагностические признаки.
35. Формула никелина. В рудах какого генезиса он является важным промышленным минералом. Структуры и текстуры этих руд.
36. Названия и формулы промышленных минералов Co, Ni в никеленосных корах выветривания.
37. Формулы пентландита и миллерита. К какому классу соединений они относятся и в рудах какого генезиса являются промышленными. Структуры и текстуры этих руд.
38. Общие диагностические признаки сульфоарсенидов и арсенидов Co, Ni, цвет их вторичных продуктов.
39. В рудах какого генезиса образуются никеленосный и кобальтоносный пирит. Нерудные минералы этих руд.
40. Формула ревденскита. Условия его образования. Источник никеля для его образования.
41. Формула пентландита. Носителем каких попутных ценных компонентов он является. Его диагностические признаки.
42. Основные промышленные минералы класса сульфидов Co, Ni магматических Cu-Ni руд. Структуры, текстуры этих руд.
43. Формулы смальтина и хлоантита. Их класс соединения и общие диагностические признаки.
44. Названия и формулы промышленных минералов W. Их распределение по температурам образования и характерные элементные парагенезисы.
45. Основной промышленный минерал Mo, его диагностические признаки и постоянный попутный ценный компонент, связанный с ним.
46. Основные промышленные минералы W и Mo скарновых руд. Нерудные минералы скарнов.
47. Высокотемпературный промышленный минерал W (название, формула). Его диагностические признаки. Характерные элементные парагенезисы.
48. Формула вольфрамита, его диагностические признаки и характерный низкотемпературный парагенезис.
49. Название и формула основного минерала вольфрама среднетемпературных гидротермальных руд. Диагностические признаки этого минерала.



Обобщенная модель протекания эндогенных и метаморфических процессов

1 – магматический процесс: 1а – эффузивный, 1б – субвулканический, 1в – интрузивный; 2 – пегматитовый процесс: 2а, 2б – магматогенный, 2в – метаморфогенный; 3 – пневматолитово-гидротермальный (грейзеновый) процесс; 4 – гидротермальный процесс: 4а – плутоногенный, 4б – вулканогенный; 5 – контактово-метасоматический (скарновый) процесс: 5а – известковоскарновый, 5б – магнезиальноскарновый; 6 – процесс регионального метаморфизма: 6а – фация зеленых сланцев, 6б – эпидот-амфиболитовая фация, 6в – гранулитовая фация.

Стрелками показаны восходящие флюидные и гидротермальные потоки.

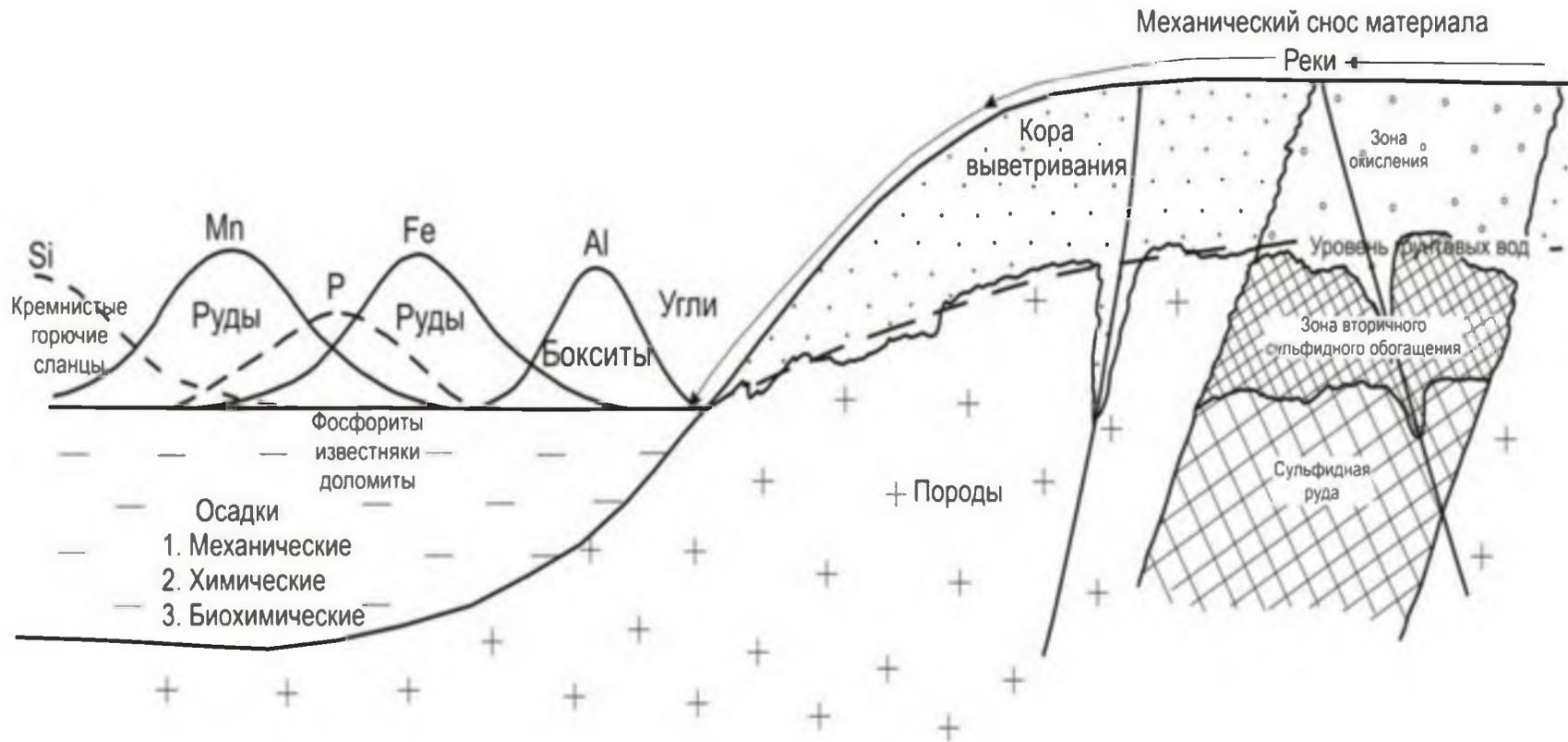
Мировой океан

Суша

Процессы

1. Осадконакопление
2. Выветривание подводное

1. Выветривание наземное
2. Осадконакопление



Обобщенная модель протекания экзогенных процессов в пределах суши и мирового океан