

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра минералогии и геохимии

Л.А. Зырянова, А.А. Пешков, К.В. Бестемьянова

**МИНЕРАЛОГИЯ РУД
ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И ЛЁГКИХ МЕТАЛЛОВ**

Учебное пособие

Томск
Издательство Томского государственного университета
2022

УДК 553.2+553.3/3.4
ББК 26.325.1
397

Зырянова Л.А., Пешков А.А., Бестемьянова К.В.

397 Минералогия руд черных, цветных и лёгких металлов : учеб. пособие. – Томск : Издательство Томского государственного университета, 2022. – 84 с.

В учебном пособии рассматривается состав руд как полиминерального природного агрегата, включающего рудные и нерудные минералы. Описаны руды различных генетических типов месторождений черных, цветных и лёгких металлов. Особое внимание уделено собственно рудным минералам с детализацией их химического состава для определения комплекса потенциальных попутных ценных компонентов и вредных примесей руд.

Описанию минералогии руд предшествуют краткие сведения о геохимии соответствующего металла и требованиям, которые предъявляются к его рудам перерабатывающей промышленностью.

Для студентов геологических специальностей вузов.

УДК 553.2+553.3/3.4
ББК 26.325.1

Рецензенты:

доктор геолого-минералогических наук *А.И. Чернышов*;
кандидат геолого-минералогических наук *Л.Я. Кабанова*

Предисловие

Настоящее пособие включает описание минералогии руд черных, цветных и лёгких металлов месторождений различных генетических типов.

Согласно систематике промышленных минералов, основанной на принципе использования, рудные минералы относятся к типу промышленных минералов металлургического сырья. Этот тип с учетом технологии производства конечной продукции (металлов) включает промышленно-технологические группы, представленные промышленными минералами и рудами их содержащими, переработкой которых занимаются соответствующие отрасли металлургической промышленности.

Так промышленно-технологическая группа минералов черных и лигирующих металлов включает минералы железа, марганца, хрома, ванадия. Промышленно-технологическая группа минералов цветных (и рассеянных металлов) включает минералы меди, свинца, цинка, никеля, кобальта, сурьмы, ртути. Промышленно-технологическая группа лёгких металлов включает минералы алюминия и титана. Именно в такой последовательности в пособии рассмотрены руды перечисленных металлов.

В пособии использованы два варианта подачи материала, в виде описательной части и в виде обобщающих таблиц по материалам описательной части. Описательная часть содержит краткую информацию о геохимической индивидуальности промышленного металла, приводятся краткие сведения о требованиях, предъявляемых перерабатывающей промышленностью к руде. Перечисляются промышленные минералы металла, обращая внимание на классы соединений и детали химического состава.

При характеристике минерального состава руд каждого генетического типа указываются главные, второстепенные и редкие рудные минералы, основные нерудные минералы как постоянные компоненты руд, комплекс и содержание попутных ценных компонентов и вредных примесей с детализацией их форм нахождения.

В отличие от описания минералов в курсе общей минералогии, здесь не приводится информация о физических свойствах рудных минералов. Основное внимание уделяется особенностям химического состава рудных минералов, характерным парагенезисам руд месторождений каждого генетического типа.

Поскольку руды представляют природный минеральный агрегат с определенными структурными и текстурными характеристиками, что определяет их технологические свойства и качество конечной продукции, то приводится их краткая характеристика на макро- и реже микроуровне.

Приведенные в пособии рисунки, иллюстрирующие распределение запасов, ресурсов и расположение основных месторождений руд металлов по регионам России, отражают принципиальную картину состояния минерально-сырьевой базы и добывающей отрасли на 2020 год. Эти данные заимствованы из Государственного доклада «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации на 2020 год». Если потребуется точная количественная информация на текущий момент по тому или иному металлу, её надо уточнять.

Порядок изложения и детальность подачи материала при характеристике руд разных металлов могут отличаться. Отличается также детальность информации об условиях образования руд разных генетических типов одного и того же металла. Более детально описаны условия образования в том случае, когда это облегчает понимание индивидуальности как минерального, так и химического состава образующихся руд.

1. Основные понятия минералогии руд

Руды являются важнейшими полезными ископаемыми. Под полезными ископаемыми понимается то, что извлекается из недр земли с целью практического использования.

Существующая классификация полезных ископаемых учитывает различные признаки. Все полезные ископаемые с учетом агрегатного состояния делятся на газообразные, жидкие и твердые.

Дальнейшее разделение твердых полезных ископаемых базируется на принципе использования. С учетом извлекаемых компонентов (металлы, неметаллы, химические соединения и др.) выделяют нерудные и рудные полезные ископаемые.

К рудным полезным ископаемым (рудам) относят те твердые полезные ископаемые, из которых извлекаются металлы. Извлечением металлов из руд занимаются различные отрасли металлургической промышленности. Дальнейшая классификация рудных полезных ископаемых предполагает их разделение на промышленно-технологические группы, объединяющие руды тех металлов, переработкой которых и получением конечной продукции (металлов) занимаются соответствующие отрасли металлургической промышленности. Такими промышленно-технологическими группами являются руды черных и лигирующих металлов, руды цветных металлов, руды лёгких металлов, руды редких металлов и редкоземельных элементов, руды благородных металлов и др.

Руда – это природный минеральный агрегат, из которого технологически возможно и экономически выгодно извлекать металлы.

Понятие руда понятие экономическое и в то же время историческое. То, что это экономическое понятие, следует из определения. А то, что это понятие историческое объясняется несколькими моментами.

Прежде всего, это то, что на протяжении всей истории существования человечества количество известных минералов неуклонно увеличивалось, а знания об их составе и свойствах расширялись и углублялись, выявляя новые возможности их практического применения, в том числе в качестве источников металлов как компонентов руд.

В то же время технические и технологические возможности извлечения металлов из минералов становились всё более совершенными, позволяя вовлекать в промышленное производство новые минералы известных металлов, ранее не используемые в качестве рудных. Кроме того, бурное развитие со второй половины прошлого столетия новых отраслей промышленности таких, как атомная энергетика, точное приборостроение и др. потребовало получения металлов, неостребованных прежде. Поэтому список промышленных минералов непрерывно расширяется, появляются новые рудные минералы и новые типы руд.

Есть и другая тенденция. Часть минералов, хоть и небольшая, может переходить из группы главных и второстепенных в группу редких по причине истощения их запасов. Это в основном относится к рудным минералам экзогенных месторождений близповерхностного залегания, многие из которых в настоящее время отработаны или почти отработаны.

Таким образом, в историческом времени перечень рудных минералов меняется, исходя из потребностей промышленности на текущий исторический момент.

Химический состав руд. Из руды может извлекаться только один металл (простые металлы) или несколько промышленно равнозначных металлов (сложные комплексные руды). Кроме основных извлекаемых металлов в составе руды могут присутствовать попутные ценные компоненты и вредные примеси.

Попутные ценные компоненты – это металлы, неметаллы или минералы, которые не представляют основную ценность руды, но могут попутно извлекаться на экономически выгодной основе. Для попутных ценных компонентов руд важна их форма нахождения. Чаще всего это изоморфные примеси в рудных, а иногда и в нерудных минералах. Это могут быть и самостоятельные минеральные фазы элементов, представляющих интерес как ценные компоненты руд. Часто в качестве попутных ценных компонентов в руде выступают рассеянные или редкие металлы, для которых наиболее обычной формой нахождения является изоморфное вхождение в состав рудных минералов. Для ряда редких и редкоземельных металлов присутствие в рассеянном состоянии в составе рудных, а подчас и нерудных минералов является единственным источником их получения. Обычно комплекс попутных ценных компонентов руд отражает генетическую индивидуальность рудных объектов.

Вредные примеси – это металлы, неметаллы, минералы, которые отрицательно влияют на процесс переработки руд или на качество конечной продукции. Обычно при оценке качества руды учитывается минимально допустимое содержание вредных примесей, превышение которого делает процесс переработки руды по меньшей мере нерентабельным.

Минеральный состав руд. Руда представляет собой полиминеральный агрегат, в состав которого входят рудные и нерудные минералы.

Рудные минералы – это те минералы, которые являются источником извлекаемого металла. Не любой минерал содержащий необходимый металл является рудным. Основными условиями отнесения минерала к рудному являются:

- высокий кларк концентрации металла в минерале;
- наличие промышленной технологии извлечения металла из минерала;
- экономичности этой технологии;
- действующая технология извлечения металла должна оказывать минимальное отрицательное влияние на окружающую среду.

Рудные минералы с учетом их промышленной значимости делятся на главные (основные источники извлекаемого металла), второстепенные (с содержанием 1–5 % от количества главных) и редкие (присутствующие в незначительном количестве, менее 1 %).

Если главные и второстепенные минералы определяют технологические свойства руд, то редкие нет.

Следует различать минералы носители и минералы концентраторы извлекаемых металлов. *Минералы носители* – это те минералы, в которых заключены основные запасы объекта, это главные минералы руд. *Минералы концентраторы* – минералы с максимально высоким содержанием извлекаемого металла. Не всегда минералы носители извлекаемого металла, одновременно являются его минералами концентраторами.

При характеристике руд важно учитывать класс соединений каждого из рудных минералов, поскольку технологические свойства рудных минералов и руд, их содержащих, часто контрастно отличаются для минералов разных классов соединений, следовательно, будет отличаться технология их переработки, в том числе методы обогащения. Количество извлекаемых рудных минералов определяет количество разделительных операций при обогащении.

Нерудные минералы – это те минералы природного агрегата руд, которые не являются на текущий момент источником извлекаемого металла.

Среди них выделяют собственно нерудные минералы и потенциально рудные. К собственно нерудным относятся минералы с весьма низким кларком концентрации извлекаемого

го металла или вовсе его не содержащие. С потенциально рудными минералами ситуация несколько сложнее. Это могут быть минералы порой даже с высоким кларком концентрации, но встречающиеся обычно в качестве акцессорных минералов пород, или это те минералы, технология извлечения которых на текущий момент является дорогостоящей. Такие минералы могут перейти в группу промышленных тогда, когда запасы такого минерала будут столь крупными, что их добыча становится экономически оправданной. Обычно это редкие промышленные объекты.

Структурно-текстурные характеристики руд. Руды как природный минеральный агрегат характеризуются структурно-текстурными признаками на макро- и микроуровне, которые наряду с другими показателями определяют технологические свойства и качество руд. Характеристика руд будет неполной без учета сопутствующего комплекса нерудных минералов и описания структур и текстур минерального агрегата.

Структура – строение минерального агрегата, обусловленное формой, размерами, внутренним строением, пространственной ориентировкой и характером срастания минеральных индивидов. Таким образом, морфологическая единица структуры – минеральный индивид.

Текстура – строение руды, обусловленное формой, распределением, характером срастания минеральных агрегатов. Минеральный агрегат – совокупность минеральных индивидов, продуктов одной стадии минералообразования, представляющих соответствующий парагенезис. Морфологическая единица текстуры – минеральный агрегат.

При всем многообразии структурно-текстурных характеристик для каждого генетического типа руд часть из них, отражая условия минералообразования, становится в некотором смысле типоморфными. Так для руд магматического и скарнового генезиса характерны зернистые структуры, неоднородные, вкрапленные до массивных (сплошных) текстуры. Для руд метаморфического генезиса обычны сланцеватые текстуры и зернистые структуры. А для экзогенных руд – порошокватые, землистые, пористые структуры, неоднородные текстуры. Для морских осадочных руд характерны оолитовые структуры, полосчатые текстуры и т.д.

Поскольку руды после добычи поступают на переработку, то ряд их показателей строго регламентируется перерабатывающей промышленностью. Так появляются *промышленные кондиции* – требования, предъявляемые к качеству руд перерабатывающей промышленностью. Основными кондиционными требованиями являются:

– минимальное промышленное содержание извлекаемого металла в руде, индивидуальное для каждого извлекаемого металла;

– максимально допустимое содержание вредных примесей.

Кондиции, как и само понятие руда, тоже являются показателями историческими. Они формируются, исходя из потребностей промышленности в том или ином металле и реально имеющихся запасов на текущий момент. Ввиду истощения запасов для некоторых металлов кондиции имеют тенденцию со временем снижаться.

Таким образом, прежде, чем ответить на вопрос, является ли минеральный агрегат, содержащий рудные минералы, рудой, необходимо знать действующие на текущий момент промышленные кондиции для интересующего нас металла. Учитывая содержание металла в конкретном промышленном минерале и содержание этого минерала в агрегате, решать вопрос о принадлежности этого агрегата к руде. При характеристике руд для перерабатывающей промышленности важны химический и минеральный состав, возможные попутные цен-

ные компоненты и вредные примеси, структурно-текстурные характеристики агрегата. Вопрос о принадлежности того или иного объекта к проявлению или месторождению решается после подсчета запасов металла.

2. Минералогия руд черных металлов

2.1. Железо (Fe)

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



Рис. 1. Действующий карьер по отработке железных руд одного из месторождений КМА (Курская магнитная аномалия, Европейская часть России) https://rosmining.ru/wp-content/uploads/2017/04/IMG_1058.jpg

Вредными компонентами руд являются сера, фосфор и цветные металлы (Cu, Pb, Zn). Качественными показателями железных руд являются содержание и доля нерудных компонентов – шлакообразующих примесей. Для этого рассчитывается кремниевый модуль, равный отношению оксида кремния к оксиду алюминия, который не должен превышать 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. При значении КО < 0,7 руды считаются кислыми и требуют при переработке введения флюса в виде известняка. Лучшими считаются руды с КО = 0,7–1,1, их называют самофлюсующимися. Руды с КО > 1,1 относят к основным. Часто железные руды отрабатываются открытым способом (рис. 1).

К минералогии железных руд. Промышленными минералами железа являются оксиды магнетит (Fe 72,4 %), гематит (Fe 70 %), гидроксиды гётит, гидрогётит (Fe 48–63 %), в меньшей мере карбонаты сидерит, сидероплезит (Fe 45–48 %) и алюмосиликаты со слоистой структурой лептохлориты – шамозит, тюрингит (Fe 27–38 %).

Показательно, что *сульфиды железа (пирротин и пирит) не являются промышленными минералами железа*, они выступают в качестве химического сырья при получении серной кислоты. Железо же, образующееся при получении серной кислоты, выступает при этом в качестве попутного продукта.

Железные руды принято называть железняками. Руды, состоящие в основном из магнетита, получили название магнитных железняков (рис. 2), из гематита – красных железняков, из гётита и гидрогётита – бурых железняков (рис. 3). Не трудно заметить, что в названии отражено основное диагностическое свойство каждого рудного минерала.

Общие замечания по условиям образования промышленных минералов железа. Как известно, железо в минералах присутствует в степени окисленности Fe^{+2} и Fe^{+3} . Поэтому образование каждого минерала происходит при соответствующем режиме кислорода в минералообразующей среде, а их месторождения формируются в соответствующей генетической обстановке.

В *магнетите* – $FeFe_2O_4$ железо одновременно имеет 2 степени окисленности, низшую – Fe^{+2} и высшую – Fe^{+3} . Поэтому магнетит образует промышленные скопления только в *эндогенных процессах*, при недостатке кислорода. Магнетит, как и все *шпинелиды*, к которым он относится, характерен для наиболее высокотемпературных эндогенных процессов, таких как магматический, метаморфический, скарновый. В экзогенных условиях магнетит окисляется. Однако процесс окисления оксидов с двухвалентным железом (магнетита и ильменита) протекает намного медленнее, чем кислородных солей с двухвалентным железом, в том числе сидерита и лептохлоритов. Это объясняется тем, что в оксидах связь $Fe^{2+} - O^{2-}$ значительно прочнее, чем связь Fe^{2+} – радикал. Поэтому магнетит и ильменит в поверхностных условиях оказываются достаточно устойчивыми и даже могут накапливаться в россыпях. Однако в геологическом времени в окислительной обстановке поверхностных условий они переходят в гётит и гидрогётит.

Для гематита $Fe^{+3}_2O_3$ эндогенные условия образования также характерны, однако его образование происходит при более высоком, чем для магнетита, потенциале кислорода в минералообразующей среде. При повышении потенциала кислорода в ходе минералообразования может происходить замещение гематитом магнетита с образованием псевдоморфоз. Псевдоморфозы гематита по магнетиту носят название мартита, а процесс замещения – *мартитизации*. Известно, что процесс мартитизации может протекать как в эндогенных, так и в экзогенных условиях. Противоположный процесс замещения магнетитом гематита с образованием псевдоморфоз назван мушкетовитизацией, а сами псевдоморфозы магнетита по гематиту – *мушкетовитом*. Гематит в экзогенной обстановке может образоваться и будет устойчив в случае недостатка воды. Однако он не является конечной формой существования железа в природе и в присутствии воды гидратируется, переходя в гётит и гидрогётит.

Сидерит $Fe[CO_3]$ и сидероплезит $(Fe,Mg)[CO_3]$ содержат железо в низшей степени окисленности (Fe^{+2}), что предполагает их образование при недостатке кислорода. Эндогенные месторождения для этих минералов, где они является главными рудными, немногочисленные.

И карбонаты, и лептохлориты – главные минералы экзогенных железных руд. Безусловно, их промышленные скопления образуются при недостатке кислорода, а это становится возможно лишь морским осадочным путем при удалении от береговой линии.

Гидроксиды Fe^{+3} (гётит, гидрогётит) предполагают резко окислительную обстановку и являются конечными формами существования Fe в природе. Их промышленные скопления образуются как продукты выветривания эндогенных месторождений железных руд (бурые железняки), так и в верхней части зон окисления сульфидных месторождений («железные шляпы»).

Промышленные минералы железа имеют разную изоморфную емкость, что определяет для руд разного минерального состава комплекс попутных ценных компонентов.

Среди эндогенных рудных минералов железа своей высокой изоморфной емкостью выделяется магнетит с ярко выраженным типохимизмом. Комплекс элементов-примесей в нем индивидуален для каждого генетического типа месторождений и может рассматриваться в качестве индикатора этих условий. Именно изоморфные примеси в магнетите определяют набор попутных ценных компонентов эндогенных руд. Кроме изоморфных примесей в магнетите попутные ценные компоненты железных руд могут находиться в виде собственных минеральных фаз и механических включений в рудных и нерудных минералах. Их набор также определяется генетическим типом руд.

Остановимся подробнее на минеральном составе, комплексности, попутных ценных компонентах железных руд разных генетических типов.

В рудах *магматического генезиса*, связанных с комплексами пород ультраосновного-основного состава, промышленный минерал так называемый титаномагнетит, который является продуктом распада твердого раствора и представляет собой магнетит с пластинчатыми



Рис. 2. Магнетитовая железная руда (магнитный железняк)

https://www.memotest.ru/ImageUpload/8fcdabd1-79af-4f23-ab0b-ec98a59d7598/Ruda_b.jpg

вростками ильменита $FeTiO_3$. Для железных руд магматического генезиса характерно также обогащение их ванадием, формами нахождения которого являются изоморфная примесь V в магнетите, реже собственная минеральная фаза в виде вростков кульсонита FeV_2O_4 . В результате формируются *магматические комплексные железо-титан-ванадиевые (Fe-Ti-V) руды*. В качестве попутного ценного компонента магматические железные руды могут содержать платиноиды.

Основные нерудные минералы представлены оливином, пироксенами, в меньшем количестве амфиболами, серпентином, основными плагиоклазами и вторичными минералами в виде хлоритов, эпидота.

Для руд характерны зернистые структуры, вкрапленные, гнездово-вкрапленные до сплошных текстуры. Руды являются легко обогатимыми.

Основным промышленным минералом *железных руд карбонатитов* является магнетит с повышенным содержанием магния, титаномагнетит, реже гематит и сидерит. Необычен состав попутных ценных компонентов карбонатитовых железных руд. Карбонатиты, представляющие собой эндогенные скопления карбонатов, входящие в комплекс щелочных ультраосновных пород, оказываются обогащены Ti, Nb, Ta, Zr, Sc, редкоземельными элементами.

Карбонатитовые железные руды наследуют этот типоморфный для карбонатитов комплекс элементов в виде попутных ценных компонентов, представленных в основном собственными минеральными фазами, чаще это пиррохлор и бадделеит.

Нерудные минералы представлены в основном карбонатами (кальцитом, доломитом, анкеритом), апатитом, флогопитом, форстеритом.

Структуры руд зернистые, текстуры вкрапленные, гнездово-, прожилково-вкрапленные, прожилковые, массивные.

Основным промышленным минералом железных руд *известково-скарновых месторождений* выступает магнетит, в качестве второстепенного – гематит. В рудах часто присутствуют цветные металлы, наиболее характерными из которых являются Cu и Co, иногда Zn, образующие собственные минеральные фазы, обычно представленные сульфидами и сульфоарсенидами, реже арсенидами.

При небольшом их содержании эти элементы, как и сера сульфидов, являются вредными примесями. При более высоком они выступают в качестве попутных ценных компонентов скарновых железных руд. Кроме собственных минеральных фаз носителем кобальта в таких рудах оказывается Co-пирит. Нередко в качестве попутного ценного компонента присутствует самородное золото.

Промышленные концентрации магнетита в известково-скарновых рудах формируются в конце стадии «сухих скарнов» вслед за гранатами и пироксенами. Основная масса гематита при этом образуется уже позднее, в стадию водных скарнов при нарастании потенциала кислорода. Для известково-скарновых руд при смене режима кислорода становится нередкостью образование псевдоморфоз гематита по магнетиту – процесс мартитизации. Образование поздних генераций магнетита может привести к обратному явлению – образованию псевдоморфоз магнетита по гематиту, мушкетовиту. Сульфиды выделяются в водную среднетемпературную стадию скарнового процесса.

Показательно, что известково-скарновые железные руды часто заметно отличаются наличием вредных примесей, что отражается на их технологических свойствах.

Нерудные минералы представлены пироксенами (диопсидом, салитом, геденберgitом), гранатами кальциевого ряда (гроссуляром, андрадитом), амфиболами (роговой обманкой, актинолитом), эпидотом, кальцитом, кварцем, хлоритом.

Руды имеют зернистую структуру, вкрапленную, гнездово-вкрапленную, сплошную, друзовую, иногда полосчатую текстуры.

Промышленными минералами *магнезиально-скарновых месторождений* являются магнетит и гематит. Нерудные минералы представлены в основном магнезиальными силикатами и алюмосиликатами: форстеритом, хондродитом, клиногумитом, диопсидом, флогопитом, серпентином, а также кальцитом. Структура руд зернистая, текстуры вкрапленные, прожилково-, гнездово-вкрапленные.

В немногочисленных месторождениях железных руд *вулканогенно-осадочного генезиса* промышленными минералами железа являются гематит, магнетит, меньшее значение имеет сидерит. В ряде случаев руды являются комплексными Fe-Mn. Руды бывают обогащены германием, который при достаточном его содержании может выступать в качестве попутного ценного компонента. В составе руд часто присутствуют в качестве вредных примесей сульфиды Cu, Pb, Zn, Fe. Руды входят в состав вулканогенно-осадочных, кремнисто-карбонатных

яшмовидных пород. Нерудные минералы представлены кварцем, карбонатами, слоистыми алюмосиликатами (хлоритом, серицитом).

Структура руд от мелко- до тонко- и скрытозернистых, текстуры от полосчатых и тонкополосчатых до сланцеватых.

Руды железистых кварцитов, являющихся продуктом метаморфизма железисто-кремнистых осадков, относятся к монометальным, практически лишенным попутных ценных компонентов. Промышленными минералами в них являются магнетит, гематит, мартит и значительно реже сидерит. В этих рудах интерес в качестве потенциального попутного ценного компонента представляет только Ge, изоморфно входящий в структуру магнетита. Гематит – минерал с низкой изоморфной емкостью, практически не содержит примесей.

Нерудные минералы представлены в основном кварцем, актинолитом, щелочными амфиболами, хлоритом, реже кальцитом.

Структуры руд зернистые для магнетита и листоватые для гематита. Текстуры сланцеватые, полосчатые, тонко-, мелкослоистые.

Технологические свойства эндогенных руд определяются соотношением в них основных рудных минералов магнетита и гематита. Гематитовые руды, представленные тонкочешуйчатými агрегатами («железная слюдка»), относятся к труднообогатимым.

Наибольшее промышленное значение среди руд экзогенного генезиса представляют *осадочные карбонатные и силикатные железные руды* среди карбонатно-терригенных отложений. Их основными промышленными минералами являются *сидерит* $\text{Fe}[\text{CO}_3]$, сидероплезит $(\text{Fe}, \text{Mg})[\text{CO}_3]$ – карбонаты Fe^{+2} , и *лептохлориты* – основные алюмосиликаты Fe^{+2} , образование которых предполагает восстановительные условия при резком недостатке кислорода. Такая обстановка возникает в морях и океанах на некоторой глубине при ограниченном доступе кислорода.



Рис. 3. Гётит-гидрогётитовая железная руда (бурый железняк)
https://studopedia.ru/1_66034_opisanie-mineralov.html

Осадочные хемогенные руды железа, как и алюминия и марганца, образуются при коагуляции соответствующих коллоидных растворов, поступающих в морские бассейны с континентов. Различная устойчивость коллоидов этих металлов приводит к их последовательной коагуляции и возникновению определенной зональности в расположении их руд относительно береговой линии. Менее устойчивы коллоидные растворы гидроксида алюминия, они и выпадают первыми, формируя осадочные бокситы. Далее отлагаются руды железа. Руды марганца оказываются наиболее удаленными от береговой линии (рис. 4). Существующая последовательность отложения осадочных руд Al, Fe, Mn предопределяет потенциальную комплексность осадочных руд. Возможно формирование комплексных Al-Fe и Fe-Mn осадочных руд с соответствующим минеральным составом.

Компонентами осадочных железных руд, кроме карбонатов и алюмосиликатов железа, являются также гётит и гидрогётит. Они отлагаются вблизи береговой линии, где обстановка является ещё окислительной в отличие от более глубоких условий. Таким образом возникает определенная фациальная зональность минерального состава осадочных руд железа. В процессе осадконакопления наблюдается последовательная смена минерального состава же-

лезных руд от береговой линии в глубь водоема от оксидных и гидроксидных к карбонатным и далее к силикатным.

В морских осадочных железных рудах комплекс попутных ценных компонентов ограничен присутствием марганца, ванадия, связанного с органикой, и редко германия. В рудах встречаются фосфаты и пирит, которые являются вредными примесями.

Для руд характерны бобово-оолитовые структуры, слоистые текстуры.

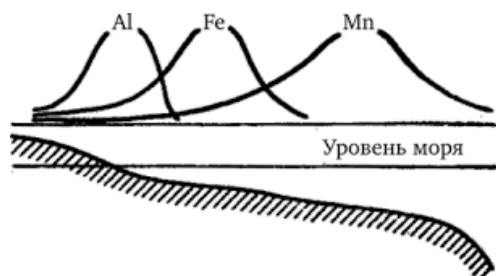


Рис. 4. Последовательность отложения осадочных руд алюминия, железа и марганца относительно береговой линии (модель по Н.М. Страхову) [15]

Осадочные железные руды силикатно-карбонатного состава при выходе в условия дневной поверхности активно окисляются и переходят в гётит-гидрогётитовые бурые железняки.

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} . Оба минерала являются конечными продуктами существования железа в условиях земной поверхности и выступают основными компонентами уже неоднократно упоминавшихся бурых железняков и «железных шляп».

По сравнению с гематитом, образующимся в окислительной обстановке, но при недостатке влаги, гидроксиды железа характерны для условий с избыточной влажностью. Гётит, гидрогётит, гематит, гидрогематит являются основными компонентами руд, возникающих при окислении эндогенных и осадочных железных руд.

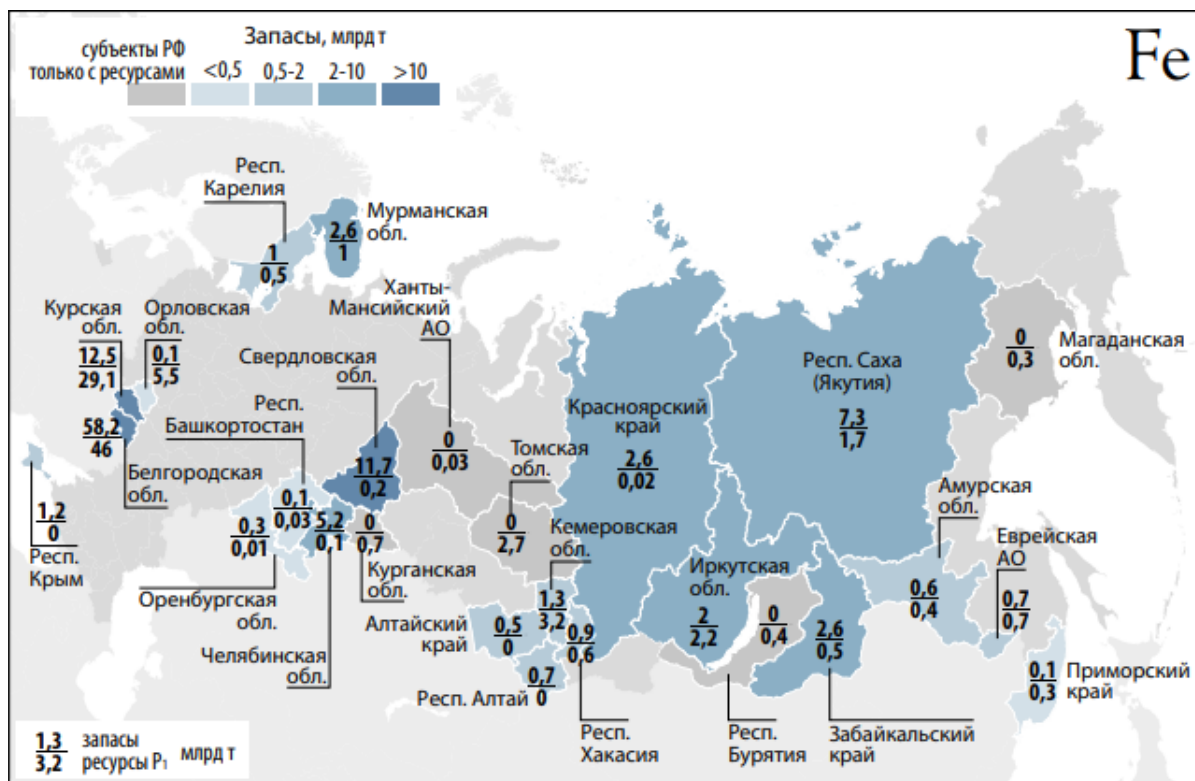


Рис. 5. Запасы и ресурсы железных руд в России [8]

При выветривании ультраосновных пород и отчасти основных пород богатых железом возникают так называемые самолигирующиеся буро-железные руды, отличающиеся при-

сутствием природного комплекса металлов-примесей, которые при получении сталей с особыми прочностными характеристиками специально вводятся в качестве лигирующих добавок. Такими лигирующими металлами, представленными собственными экзогенными либо реликтовыми минералами, в буро железняковых рудах являются перешедшие из ультраосновных пород Cr, Ni, Mn, Co и некоторые др. элементы. Источником большей части этих металлов являются оливин и меньше пироксены, в которых они присутствуют в виде изоморфных примесей в количествах, не представляющих никакого практического интереса.

Приведенные на рис. 5, 6 картины размещения на территории России запасов железных руд и объектов добычи позволяют получить общее представление о состоянии минерально-сырьевой базы черной металлургии.

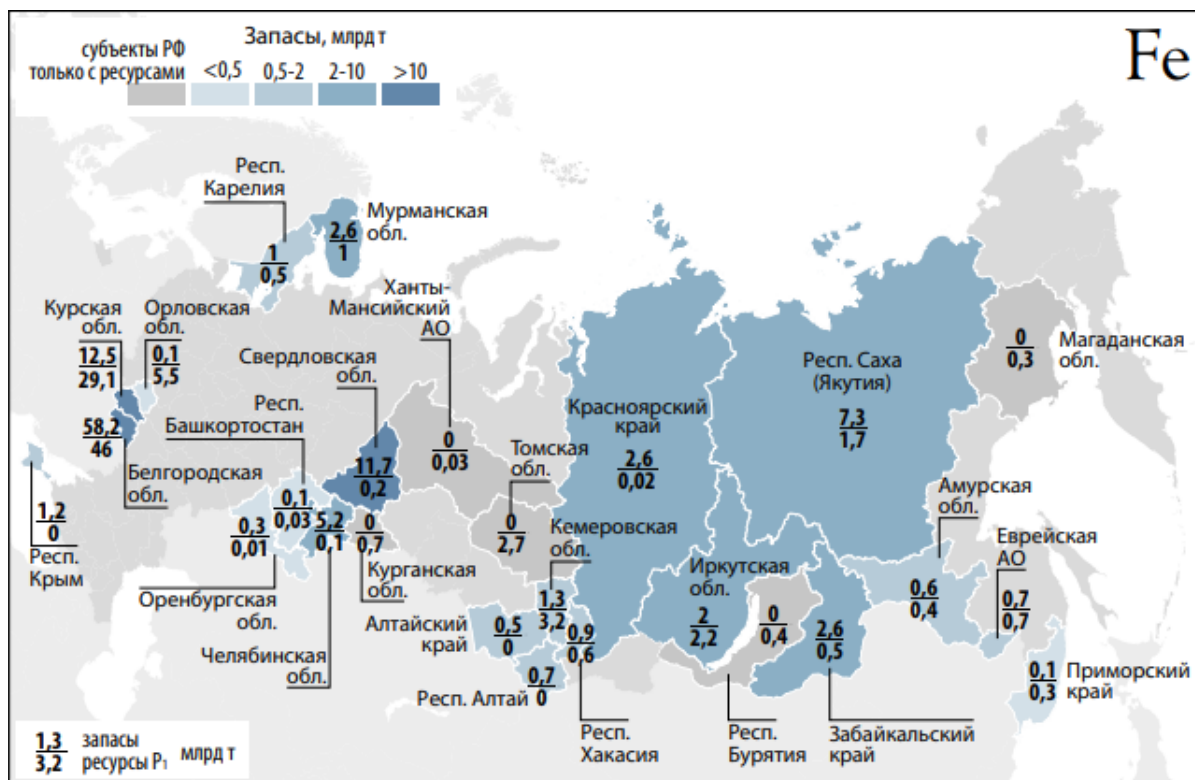


Рис. 6. Добыча железных руд в России (основные разрабатываемые месторождения) [8]

Вопросы для самоконтроля

1. Названия и формулы рудных минералов эндогенных руд. Почему пирит и пирротин, несмотря на высокий кларк концентрации в них железа, не являются промышленными минералами железа.
2. Минеральный состав силикатных железных руд, условия их образования.
3. Рудные, нерудные минералы магматических железных руд. Комплексность этих руд. Формы нахождения извлекаемых металлов.
4. Промышленные минералы железа известково-скарновых руд, время выделения каждого из них в скарновом процессе. Почему в этих рудах наиболее часто присутствует мартит.
5. Минеральный состав осадочных железных руд и фациальная изменчивость минерального состава относительно береговой линии.
6. Промышленный минерал карбонатитовых железных руд, их попутные ценные компоненты. Причины столь необычного их набора.

7. Состав и условия образования самолегирующихся железных руд. Источники и формы нахождения в них лигирующих металлов.

8. Минеральный состав и условия образования железистых кварцитов. Причина их бедности попутными ценными компонентами.

2.2. Марганец (Mn)

Требования к руде. В металлургии используются руды с содержанием марганца 30–36 %. Минимальные промышленные содержания марганца в легкообогатимых рудах (окисленные и оксидные) – 10 %, в труднообогатимых (карбонатные) – 20 %.



Рис. 7. Агрегаты иссиня-черного пиролюзита – основного промышленного минерала марганца
https://www.fabreminerals.com/specimens/s_imagesAG5/Pyrolusite-NJ56AG5f.jpg?big=1

Вредным компонентом руд является фосфор.

К минералогии марганцевых руд. Наибольшее промышленное значение имеют минералы марганца, относимые к оксидам. Это пиролюзит (рис. 7), вернадит, псиломелан, гаусманит), оксисиликат (браунит) и гидроксид (манганит). Меньшее промышленное значение имеют карбонаты марганца (марганцевистый кальцит, олигонит, родохрозит). Марганцевый шпинелид (якобсит) и водосодержащие оксиды (тодорокит и бернессит) могут рассматриваться в рудах только как второстепенные, а обычно как редкие имеющие значение лишь для месторождений определенных генетических типов. Тодорокит и бернессит присутствуют в

заметных количествах, а чаще являются основными минералами марганца лишь в глубоководных железомарганцевых конкрециях. Силикат двухвалентного марганца – родонит, в настоящее время в качестве рудного минерала не рассматривается (рис. 8). Он находит применение только как ювелирно-поделочный камень. Родонит вместе с родохрозитом и другими силикатами Mn^{+2} (бустамитом – $(Mn,Ca)_3[Si_3O_9]$, спессартином) образует крупные скопления в метаморфических породах, при выветривании и окислении которых формируются богатые «марганцевые шляпы», состоящие из оксидов и гидроксидов двух- и четырехвалентного марганца, запасы которых уже имеют промышленное значение.

Так что родонит опосредованно имеет отношение к минералогии руд марганца.

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

Как известно, 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. 8), а Mn^{4+} – в черный (рис. 9). Это используется при диагностике марганцевых минералов.



Рис. 8. Родонит с продуктами окисления
https://maxpark.com/static/u/article_image/12/04/01/%D0%A0%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D0%BD%D0%B8%D1%82-02x8_qtb.jpeg

Общие замечания по условиям образования промышленных минералов марганца. Марганец – элемент с переменной степенью окисленности. В природе встречаются минералы, содержащие 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. Промышленные минералы, содержащие одновременно Mn^{+2} и Mn^{+3} (браунит, гаусманит) образуются в основном в эндогенных процессах. Они являются основными промышленными минералами немногочисленных вулканогенно-осадочных и метаморфизованных месторождений марганцевых руд, в которых могут присутствовать также карбонаты Mn^{+2} . В экзогенных процессах минералы, содержащие только Mn^{+2} (карбонаты), возникают при недостатке кислорода, чему соответствуют условия морского осадконакопления в области шельфа, в которых и формируются карбонатные марганцевые руды. В окислительной обстановке в экзогенных условиях минералы Mn^{+2} и Mn^{+3} неустойчивы и переходят в оксиды Mn^{+4} (пирролюзит и вернадит) или в минералы с одновременным содержанием Mn^{+2} и Mn^{+4} (псиломелан, манганит).



Рис. 9. Окисленные пирролюзит-гётит-гидрогётитовые марганцевые руды
<https://www.crystalradio.net/minerals/>

Минералы Mn^{+4} (пирролюзит, вернадит) промышленные скопления образуют только в окислительной обстановке в экзогенных процессах. *Большинство месторождений марганцевых руд являются продуктами экзогенных процессов, формируя крупные по запасам осадочные месторождения или более мелкие месторождения «марганцевых шляп».*

Геолого-промышленная типизация марганцевых руд учитывает класс соединений минералов марганца, что предопределяет условия их образования. Выделяются следующие технологические (промышленные) типы марганцевых руд: оксидные, смешанные оксидно-карбонатные, карбонатные и окисленные. Наибольшее промышленное значение имеют оксидные руды.

Оксидные руды – главными рудными минералами являются оксиды (пирролюзит, псиломелан, вернадит) и гидроксид (манганит). Свое название они получили по ведущему классу соединений промышленных минералов. Месторождения этих руд относятся к осадочным морским. Руды характеризуются высоким содержанием марганца (более 25 %) и относятся к легко обогатимым. Среди них особо выделяют пероксидные руды, основным рудным минералом которых является пирролюзит (MnO_2).

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 входят в состав осадочных и вулканогенно-осадочных часто комплексных железомарганцевых месторождений.



Рис. 10. Типичные окисленные руды натечно-ноздреватой текстуры, сложенные псиломеланом
<https://origin-production.wikiwand.com/en/Roman%C3%A8chite>

Оксидно-карбонатные руды сложены как оксидами (браунит, гаусманит) так и карбонатами марганца при содержании Mn около 25 %. Это вулканогенно-осадочные, шельфовые осадочные или метаморфизованные осадочные марганцевые руды.

Окисленные руды (обратить внимание на то, что термин генетический) – образуются в результате окисления руд, сложенных карбонатами и силикатами марганца, а также браунитом и гаусманитом, при выходе их в условия дневной поверхности (рис. 9, 10). Окисленные руды формируют так называемые «марганцевые шляпы». Они сложены оксидами и гидроксидом с Mn^{+4} и характеризуются содержанием марганца более 40 %.



Рис. 11. Запасы, ресурсы и основные месторождения марганцевых руд в России [8]

Марганцевые руды оксидного типа часто являются монометальными. К комплексным принадлежат только не крупные по запасам вулканогенно-осадочные месторождения Mn-Fe руд (см. минералогию руд железа) и некоторые окисленные псиломелан-пирролюзитовые руды с асболоном (Mn-Co руды) или с тунгомеланом (Mn-W руды). Рисунок 11 позволяет получить общее представление о состоянии минерально-сырьевой базы руд марганца.

Метаморфогенные месторождения, сложенные силикатами Mn^{+2} (родонит, тефроит, спессартин, бустамит) с небольшой примесью гаусманита, браунита и карбонатов Mn^{+2} . Промышленного интереса как руда на марганец они не представляют. Чаще они рассматриваются как месторождения поделочных камней.

Весьма перспективны месторождения *глубоководных железомарганцевых конкреций* (ЖМК) и железомарганцевых корок, покрывающие большие площади дна большинства океанов (рис. 12). Это исключительно комплексные руды, основными компонентами которых являются Fe, Mn, Ni, Co, Cu. В них присутствуют в промышленных количествах Mo, V, PЗЭ, платиноиды, Au, Ag и др., всего порядка 18 элементов. Все эти элементы могут представлять

промышленный интерес. Именно сложностью химического состава железомарганцевые конкреции отличаются от осадочных марганцевых руд зоны шельфа, которые часто являются практически монометальными.



Рис. 12. Глубоководные железомарганцевые конкреции
https://phys.org/news/2020-01-nodules-bottom-sea.html?_escaped_fragment_=&deviceType=mobile

Запасы железомарганцевых конкреций и корок колоссальные и могут обеспечить потребности человечества в металлах на протяжении многих тысячелетий, однако их добыча пока производится только некоторыми странами в виду технической сложности, трудоемкости и затратности их извлечения.

Структуры и текстуры руд. Структура от кристаллической, скрыто- и тонкозернистой до колломорфной и порошковатой. Поскольку большинство промышленных руд марганца относятся к

экзогенным продуктам, для них наиболее типичны плотные текстуры в сочетании с ноздреватыми, натечными, пористыми, губчатыми, а также, землистыми, реже оолитовыми. Плотные массивные текстуры характерны для руд вулканогенно-осадочного и метаморфогенного генезиса.

Вопросы для самоконтроля

1. Степень окисленности Mn и классы соединений минералов экзогенных руд.
2. Общие диагностические признаки минералов Mn классов оксидов-гидроксидов.
3. Условия образования и минеральный состав экзогенных оксидно-карбонатных руд.
4. Минеральный состав и комплексность вулканогенно-осадочных руд Mn.
5. Условия образования родонита, его практическое значение.
6. Минеральный состав шельфовых осадочных руд Mn, их структуры и текстуры.
7. В чем отличие минерального и химического состава осадочных шельфовых руд Mn и глубоководных железомарганцевых конкреций.
8. Минеральный состав Mn кор выветривания (окисленные руды).

2.3. Хром (Cr)

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 FeO (Fe общее), SiO_2 (менее 10 %), CaO .

К минералогии руд. Из немногочисленных минералов хрома промышленное значение имеют только хромшпинелиды, в которых содержание Cr_2O_3 колеблется в широком диапазоне значений от 18 до 65 %. Содержание же хромшпинелидов в рудах составляет от 30 % в убогих до 90 % и выше в богатых сплошных (рис. 13). Среди хромшпинелидов широко распространен изоморфизм, поэтому состав минералов подгруппы хромшпинелидов может быть представлен общей формулой – $(\text{Mg,Fe})^{2+}(\text{Cr,Al,Fe})^{3+}_2\text{O}_4$. В группе хромшпинелидов с учетом состава выделяют: магнохромит – $(\text{Mg,Fe})\text{Cr}_2\text{O}_4$, собственно хромит – FeCr_2O_4 , алюмохромит – $(\text{Fe,Mg})(\text{Cr,Al})_2\text{O}_4$, хромпикотит – $(\text{Mg,Fe})(\text{Cr,Al})_2\text{O}_4$ и субферрихромит – $(\text{Fe,Mg})(\text{Cr,Fe})_2\text{O}_4$. Основными промышленными минералами хрома в отечественных месторождениях являются магнохромит $(\text{Mg,Fe})\text{Cr}_2\text{O}_4$ и алюмохромит $(\text{Fe,Mg})(\text{Cr,Al})_2\text{O}_4$. Очень часто минералы хрома в рудах объединяют общим термином хромит.



Рис. 13. Полосчатые (а) и нодулярные (б) хромитовые руды в дунитах
https://geo.web.ru/druza/33_fo_29.htm

Попутными ценными компонентами руд хрома обычно являются минералы элементов платиновой группы (минералы Pt, Os, реже Ir), которые также, как и хром генетически связаны с ультраосновными породами.

Присутствующие в рудах сульфиды (пирротин, пентландит, халькопирит, кубанит, пирит и др.), магнетит, апатит ухудшают качество руд.

Ряд известных минералов хрома таких как *уваровит* (хромовый гранат кальциевого ряда), *фуксит* (хромовый мусковит), *кочубеит* и *кеммерицит* (хромсодержащие хлориты), *хромдиопсид*, *хромвезувиан* и др. являются индикаторами присутствия хрома и имеют только поисковое значение (рис. 14).

Общие замечания по условиям образования рудных минералов хрома. Хром является типоморфным элементом ультраосновной магмы. Поэтому месторождения хромовых руд пространственно и генетически связаны исключительно с комплексами ультраосновных пород и относятся к магматическим.



а



б

Рис. 14. Минералы индикаторы руд хрома: а – кристаллические щеточки уваровита в прожилках сплошных хромитовых руд (Сарановское месторождение, Урал) <http://insminerals.ru/Ural9.htm>; б – хромсодержащий хлорит на хромите <https://www.leonmin.ru/images/products/3998s-116003871.jpg>

Рудными минералами являются хромшпинелиды. Нерудные представлены оливином, меньше ромбическими пироксенами. И те, и другие обычно присутствуют в качестве реликтов среди активно серпентинизированного агрегата ультраосновных пород. По трещинам в хромшпинелидах развиваются поздние уваровит, хлориты, тремолит, тальк.



Рис. 15. Запасы, ресурсы и основные месторождения хромовых руд в России [8]

Структуры и текстуры руд. Руды хрома характеризуются зернистой структурой, густо вкрапленной до массивной текстурами. Весьма характерна для руд хорошо узнаваемая нодулярная текстура, которая проявляется в том, что на фоне обычно серпентинизированного агрегата ультраосновных пород четко выделяются различные по величине округлые образования (нодулы), сложенные хромшпинелидами.

Хромшпинелиды весьма устойчивы в поверхностных условиях и способны накапливаться в элювиальных, делювиальных и прибрежно-морских россыпях. Однако россыпные месторождения хрома имеют ограниченное самостоятельное промышленное значение. Обычно,

формируясь как продукт выветривания эндогенных месторождений хромшпинелидов, россыпные месторождения отрабатываются попутно с ними.

Рисунок 15 дает представление о состоянии минерально-сырьевой базы руд хрома.

Основные минералы группы шпинелидов

Элементы	Al ³⁺	Fe ³⁺	Cr ³⁺	Ti ⁴⁺	V ³⁺
	Минеральные виды				
Mg ²⁺	Шпинель MgAl ₂ O ₄	Магнезиоферрит MgFe ₂ O ₄	Магнохромит MgCr ₂ O ₄		
Fe ²⁺	Герцинит FeAl ₂ O ₄	Магнетит FeFe ₂ O ₄	Хромит FeCr ₂ O ₄	Ульвошпинель Fe ₂ TiO ₄	Кульсонит FeV ₂ O ₄
Mn ²⁺	Галаксит MnAl ₂ O ₄	Якобсит MnFe ₂ O ₄			
Zn ²⁺	Ганит ZnAl ₂ O ₄	Франклинит ZnFe ₂ O ₄			
Ni ²⁺		Треворит NiFe ₂ O ₄			

Вопросы для самоконтроля

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

2.4. Ванадий (V)

Требования к руде. Подавляющее большинство месторождений, из руд которых извлекается ванадий, являются комплексными. Это комплексные Fe-Ti-V, Cu-Pb-V, U-V руды. Минимальным промышленным содержанием V₂O₅ в титаномагнетитовом концентрате считается содержание 0,3 %.

Вредные компоненты руд CaO и P.

К минералогии руд 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 в основном находится в рассеянном состоянии и входит в виде изоморфной примеси в титаномагнетит, ильменит, рутил, сфен и в породообразующие минералы (амфиболы, пироксены, гранаты).

Основными промышленными минералами-носителями и концентраторами ванадия в эндогенных процессах являются титаномагнетит (до 9 % V₂O₅), магнетит (до 0,6 % V₂O₅), магномагнетит (до 1,6 % V₂O₅), рутил (до 1 % V₂O₅), ильменит (до 0,4 % V₂O₅).

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

Минералы V⁺⁵ представлены кислородными солями – *ванадатами* (рис. 16). Промышленные ванадаты (ванадинит, деклуазит), в которых содержание V₂O₅ составляет около 20 %,

промышленные скопления образуют в экзогенных процессах и концентрируются только в окисленных рудах ряда месторождений.



Рис. 16. Ванадинит: *а* – гексагональные кристаллы при увеличении; *б* – в виде кристаллических корочек в образце окисленной свинцовой руды
http://www.jewel.ru/stone/kamen_vanadinit.html

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. Возможно, что повышенное содержание V в каменных углях связано с присутствием этого сульфида, имеющего ту же природу образования, что и в асфальтитах.

Условия образования руд ванадия. Эндогенные месторождения комплексных Fe-Ti-V руд относятся к *магматическим в связи с комплексами основных-ультраосновных пород* (см. минералогию руд железа). Это титаномагнетитовые, магнетит-ильменитовые, ильменит-гематитовые руды в пироксенитах, горнблендитах, оливинитах, габбро, норитах, анортозитах, габбро-диабазам (рис. 17). Ванадий в этих рудах присутствует в магнетите в виде изоморфной примеси, в меньшем количестве в виде тонких механических включений ванадиевого шпинелида кульсонита (FeV_2O_4). При среднем невысоком содержании V_2O_5 в рудах – 0,1–1 % запасы ванадийсодержащих руд на некоторых месторождениях достигают нескольких миллионов тонн.

Известны немногочисленные *вулканогенные гидротермальные магномагнетитовые месторождения* в областях распространения траппов, в которых ванадий присутствует в виде примеси в магномагнетите и представляет интерес в качестве попутного ценного компонента железных руд.

Экзогенные месторождения ванадиевых руд связаны с *зонами окисления ряда рудных месторождений*. Чаще это зоны окисления полиметаллических месторождений. Минералы ванадия – деклуазит, купродеклуазит и ванадинит в парагенезисе с церусситом, малахитом, азуритом, смитсонитом входят в состав окисленных свинцово-медных (Pb-Cu-V) и медных руд. При этом в первичных сульфидных рудах содержание ванадия составляет всего лишь сотые и тысячные доли процента. Концентрация же ванадия в окисленных рудах достигает 5–6 % V_2O_5 и обычно возникает в связи с появлением внешнего источника ванадия.

Среди экзогенных выделяются также карнититовые и роскоэлитовые комплексные уран-ванадиевые (U-V) руды в пестроцветных отложениях (алевролитах, песчаниках, гравелитах, конгломератах) осадочного чехла с содержанием V_2O_5 до 1–5 %.

Патронитовые в асфальтитах руды известны лишь в одном месторождении в Перу, находящемся на высоте 4700 м. Главное рудное тело расположено среди осадочных пород и прослежено по простираию на 100 м при мощности от нескольких сантиметров до 9–12 м. Руда сложена черным аморфным патронитом в асфальтоподобном веществе, содержащем серу и примесь вторичных сернистых соединений никеля (бравойита $(\text{Fe,Ni,Co})[\text{S}_2]$). Руды очень богатые и содержат V до 15 %, Ni – 1,5 %, Mo – 0,5–1,5 %. В золе содержание V_2O_5 достигает 50 %. 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 частично окислялся до самородной серы, частично же осаждал из грунтовых вод V, Ni и Mo в виде соответствующих 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*, представляя там попутный ценный компонент. В бокситах содержание V_2O_5 составляет 0,02–0,04 %.



Рис. 17. Отработка открытым способом магматических комплексных железо-титан-ванадиевых руд
<https://zen.yandex.ru/media/zavodfoto/kachkanarskii-gok-5b826d9fe9d9d000a95474b7?from=channel&rid=1311115860.244808.1535553587120.22125>

Обращает внимание нахождение ванадия в поверхностных условиях в связи с органикой. Довольно типична концентрация ванадия в фосфоритах (ванадиеносные фосфориты с содержанием 0,1–1 % V_2O_5), в пластах каменного угля. Месторождения осадочных ванадиеносных *углеродисто-кремнистых сланцев* представлены 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: углистое вещество с участием карбонатов, ванадатов, фосфатов, а также барита, роскоэлита и др.

Повышенные содержания ванадия *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 морских мидий и галатурий*, с целью последующего извлечения накопленного в их тельцах ванадия.

Ванадий присутствует и *в глубоководных железомарганцевых конкрециях дна океанов* (до 0,1 % V_2O_5) и может рассматриваться как перспективный источник ванадия.

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

Вопросы для самоконтроля

1. Степень окисленности V и его формы нахождения в эндогенных рудах. Комплексность и условия образования эндогенных руд.
2. Название, формула сульфида V, степень окисленности V. Условия образования этого минерала.
3. Минералогия ванадия в зонах окисления сульфидных месторождений. Источник ванадия.
4. Нетрадиционные источники V.
5. Названия и формулы минералов V в U-V рудах. Условия их образования.

3. Минералогия руд цветных металлов

3.1. Свинец (Pb), цинк (Zn)

К геохимии свинца и цинка. В эндогенных процессах свинец и цинк являются элементами, имеющими тесную геохимическую связь. Источниками свинца и цинка являются остаточные очаги 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 плутоногенными гидротермальными среднетемпературными. Свинцово-цинковые руды могут формировать типичные жильные гидротермальные месторождения. В месторождениях скарнового типа свинцово-цинковые руды являются наложенными на скарны и соответствуют среднетемпературной гидротермальной стадии формирования объектов. Наиболее же известны вулканогенно-осадочные и гидротермально-метасоматические месторождения сульфидных руд в вулканогенно-осадочных толщах, относимые к месторождениям колчеданного типа.

Минералогия руд свинца и цинка. Промышленные минералы свинца и цинка представлены различными классами соединений, среди которых удобно выделить 2 группы, отличающиеся условиями образования: минералы сульфидов и их аналогов и минералы классов кислородных солей. Если для минералов первой группы необходима восстановительная обстановка (для большинства за редким исключением – эндогенные условия), то для вторых – резко окислительная обстановка (экзогенные условия). Поэтому отдельно рассматривается минералогия эндогенных и экзогенных руд. Такой подход оправдан ещё и тем, что эндогенные сульфидные и экзогенные руды зоны окисления имеют различные технологические свойства и соответственно различные режимы переработки, что требует их отдельной (селективной) добычи.

Химический и минеральный состав эндогенных руд. Основными промышленными минералами свинца и цинка являются сульфиды, галенит и сфалерит, которые являются главными рудными минералами свинцово-цинковых, полиметаллических и колчеданно-полиметаллических руд. Принято к *свинцово-цинковым* рудам относить те, в которых именно свинец и цинк составляют основную промышленную ценность. К *полиметаллическим* (многометальным) – сульфидные руды, из 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) их относят к *колчеданно-полиметаллическим*.

Требования к сульфидным рудам. Минимальное суммарное промышленное содержание металлов Cu, Pb, Zn в полиметаллических рудах составляет порядка 3–3,5 %.

По содержанию металлов руды делятся на вкрапленные с суммой металлов до 20 % и суммой сульфидов до 50 % и сплошные с суммой металлов более 20 % и суммой сульфидов 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 рудные тела и в этом случае будет извлекаться селективно для целей химической промышленности. В то же время пирит может и часто оказывается но-

сителем и даже концентратором ряда попутных ценных компонентов, таких как Au, Se, Te, Co, 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 и тогда эти руды относят к барит-полиметаллическим. В строении барит-полиметаллических месторождений часто наблюдается вертикальная зональность. Обычно в разрезах таких объектов снизу-вверх происходит переход полиметаллических руд в барит полиметаллические и затем в баритовые с гематитом или без него. Барит, будучи сульфатом, является более поздним минералом относительно сульфидной минерализации. Нередко наблюдается пересечение полиметаллических руд поздними баритовыми жилами.

Попутные ценные компоненты эндогенных руд. Основные сульфиды полиметаллических руд галенит и сфалерит, практически всегда оказываются *носителями ряда попутных ценных компонентов*, что ещё более оправдывает применимый к этим рудам термин «полиметаллические».

Cd, Ga, Ge, In, являясь рассеянными элементами, извлекаются в основном из этих руд. Носителем и концентратором этих элементов является *сфалерит*, который почти всегда содержит их в виде изоморфных примесей. Наиболее промышленно важной примесью в сфалерите является Cd, содержание которого составляет обычно не более 1-3 %. Более охотно кадмий изоморфно замещает цинк в вюртците, относимом к второстепенным, а чаще редким рудным минералам цинка. Это объясняется тем, что сульфид кадмия гринокит CdS изоструктурен с вюртцитом (оба гексагональные), и вхождение Cd в состав вюртцита становится кристаллохимически предпочтительным. Однако основным, практически единственным источником для получения кадмия всё-таки является сфалерит.

Интересно поведение в рудах *Ga, Ge*. 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 алюмосиликатах, в основном в сериците, обычном компоненте околорудных метасоматитов. В случае же карбонатных или кремнистых вмещающих пород Ga и Ge полностью концентрируются в сфалерите, не уходя в минералы вмещающих пород.

Ag, Bi, Se, Te часто присутствуют в виде изоморфных примесей в *галените*, который становится носителем или даже концентратором этих попутных ценных компонентов. Косвенным свидетельством того, что *Ag* и *Bi* являются изоморфными примесями в галените, является их значимая положительная корреляция в рудах, когда реализуется гетеровалентный изоморфизм замещения по схеме $2Pb^{2+} \leftarrow Ag^{1+} + Bi^{3+}$.

Часть серебра и висмута может выделяться в виде самостоятельных минеральных фаз, представляя тогда редкие минералы полиметаллических руд – *Bi* в виде висмутина и даже самородного висмута. Для *Ag* наиболее типичны самостоятельные фазы в виде самородного серебра и акантита (низкотемпературной модификации Ag_2S). Наиболее богаты серебром оказываются полиметаллические и барит-полиметаллические руды. Причем минералы серебра как правило входят в состав позднего высокомедного парагенезиса с борнитом и халькозином, которые даже могут рассматриваться как индикаторные минералы на повышенную сереброносность этих руд.

Носителями, а часто и концентраторами Se и Te выступают пирит, халькопирит и галенит, в которых эти элементы являются изоморфными примесями. *Se* и *Te* могут присутство-

вать также как самостоятельные минеральные фазы в виде редких селенидов и теллуридов свинца (алтаита, клаусталита и др.).

В полиметаллических рудах в качестве попутного ценного компонента часто выступает самородное золото, которое обычно оказывается связанным с *пиритом и халькопиритом*, находясь в них в основном в тонкодисперсном состоянии.

В барит-полиметаллических рудах барит выступает в качестве попутного извлекаемого минерала.

С учетом извлекаемых попутных ценных компонентов полиметаллические руды условно являются многокомпонентными.

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

Основу вкрапленных и прожилково-вкрапленных руд представляют гидротермально измененные породы, представленные часто березитами, пропилитами, хлоритолитами, серицитолитами, кварцитами и др. Нерудная составляющая при изучении руд безусловно заслуживает внимания, поскольку оказывает соответствующее влияние на технологические свойства руд. Кроме того, серицит, являясь одним из основных минералов березитов, может оказаться носителем Ga и Ge.

В условиях метаморфизма, который часто испытывают древние первичные сульфидные руды, обычно не происходит миграции свинца и цинка, наблюдается лишь некоторое перераспределение их в пределах рудных тел, сопровождающееся частичной перекристаллизацией рудных минералов. Обращает внимание тот факт, что в рудах, испытавших в той или иной степени метаморфизм, увеличивается доля пирротина, который в неметаморфизованных рудах нехарактерен.

Руды экзогенного генезиса, возникающие в результате окисления первичных сульфидных руд при выходе их на эрозионный срез, формируют зоны окисления. Показательно, что в экзогенных условиях в пределах зоны окисления свинец и цинк геохимически разделяются.

Общее представление о состоянии минерально-сырьевой базы руд свинца и цинка дают рис. 18, 19.

Рассмотрим поведение основных промышленных металлов Cu, Pb, Zn при окислении сульфидных полиметаллических руд, которое объясняет смену геохимического профиля окисленных руд. Поведение металлов в зоне окисления связано с *разной растворимостью их сульфатов*, которые являются первыми продуктами окисления соответствующих сульфидов, оказавшихся в условиях дневной поверхности.

Растворимость сульфата свинца чрезвычайно мала, благодаря чему *свинец фиксируется в зоне окисления* сначала в виде нерастворимого сульфата – минерала англезита, который со временем может заместиться карбонатом – церусситом с содержанием Pb 77,5 %. Реже англезит переходит в минералы других классов соединений (арсенатов, ванадатов и др.) при наличии источников соответствующих элементов.

Сульфаты цинка и меди являются хорошо растворимыми соединениями и легко мигрируют в экзогенной обстановке. В условиях зоны окисления эти элементы могли бы фиксироваться в виде плохо растворимых в воде соответствующих карбонатов. Однако в зоне окисления фиксируется в основном медь в виде основных карбонатов малахита и азурита, а цинк

активно выносятся за пределы зоны окисления. *Он может фиксироваться лишь в форме карбонатов цинка (смитсонита, реже монгеймита и олигонита), образующихся метасоматическим путем при замещении карбонатных пород, встречающихся на пути мигрирующих сульфатных цинксодержащих растворов.* Такое поведение меди и цинка объясняется с позиций сформулированного в 1941 г.

А. И. Перельманом принципа торможения химических реакций: если в системе один из реагентов присутствует в количестве, недостаточном для реализации всех возможных реакций, то протекают из них те, которые имеют наименьшее произведение растворимости (ПР). Дефицитным реагентом для образования карбонатов выступает бикарбонат-ион. ПР для карбонатов меди меньше, чем карбонатов цинка. Поэтому в зоне окисления в виде карбонатов охотно фиксируется медь, что «тормозит» осаждение карбонатов цинка. Поэтому цинк в виде водорастворимого сульфата выносится за пределы зоны окисления. Смитсонит в небольших количествах может возникать на заключительных этапах формирования зоны окисления, а особенно в пределах зоны вторичного сульфидного обогащения в результате уменьшения содержания в растворе меди и увеличения содержания цинка.

Как известно, в зоне вторичного сульфидного обогащения происходит замещение халькозином первичных сульфидов. Замещение происходит в результате реакции взаимодействия сульфидов первичных руд с сульфатом меди, поступающим с верхних горизонтов. Медь, будучи более активным металлом, вытесняет из сульфидов менее активные. При замещении сфалерита халькозином в раствор поступает заметное количество цинка, который и расходуется на образование позднего смитсонита.

Таким образом, длительно существующие хорошо проработанные зоны окисления сульфидных месторождений часто 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 %. Окисленные руды приобретают резко выраженный свинцовый геохимический профиль.

В полиметаллических месторождениях в зоне окисления наряду со свинцовыми минералами фиксируются также кислородные соли меди (чаще это основные карбонаты меди – малахит и азурит). В этом случае зоны окисления приобретают медно-свинцовый профиль.

Учитывая описанный механизм экзогенного преобразования первичных сульфидных руд, можно сделать следующие обобщения. Как говорилось выше *минеральный состав окисленных экзогенных руд свинца и цинка* резко отличается от состава первичных сульфидных руд. Это разнообразные кислородные соединения свинца и цинка: карбонаты, меньше сульфаты, редко ванадаты, молибдаты (вульфенит – $Pb[MoO_4]$) и даже силикаты. Основным минералом свинца в окисленных рудах является наиболее устойчивый карбонат – церуссит, в значительно меньшем количестве отмечается англезит и другие сульфаты такие, как биверит – $Pb(Cu,Fe,Al)_3[SO_4]_2(OH)_6$, осаризаваит – $PbCuAl_2[SO_4]_2(OH)_6$ – структурные аналоги минералов ряда алунита-ярозита.



Рис. 18. Запасы, ресурсы и основные месторождения цинковых руд в России [8]

Что же касается промышленных гипергенных минералов цинка, то они представлены в основном смитсонитом и реже 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 перерождаться 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 (монтмориллонита), обладающих высокими адсорбционными свойствами, цинк, адсорбируясь, в небольшом количестве может фиксироваться в них. Каламин, редко виллемит – второстепенные, а скорее редкие промышленные силикаты цинка, образуют заметные 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 свинцово-цинковых сульфидных руд. Применительно к силикатным цинковым рудам, сложенным каламином, иногда используется термин «галмейные руды». В составе окисленных руд в заметном количестве присутствуют гидроксиды железа (гётит, гидрогётит).

Окисленные руды имеют обычно порошокватые, землистые, часто натечные, зернистые структуры, сплошные, вкрапленные, прожилково-вкрапленные, друзовые текстуры.

Из всего сказанного следует, что минералогия и геохимия эндогенных и экзогенных руд свинца и цинка резко отличается, поэтому выделяются промышленные типы первично сульфидных и окисленных руд.



Рис. 19. Запасы, ресурсы и основные месторождения свинцовых руд в России [8]

При наличии переходной зоны от собственно окисленных к первичным сульфидным рудам сложного минерального состава выделяют смешанные руды. На месторождениях с современной или ископаемой зоной окисления часто присутствуют все три типа руд, которые имеют совершенно разные технологические свойства и предполагают исключительно селективную добычу. Окисленные руды располагаются на верхних горизонтах месторождений, сменяясь с глубиной смешанными и далее первичными сульфидными. В климатической зоне нашей страны окисленные руды распространяются обычно до глубины порядка 100 метров от поверхности. Многие месторождения глубокого залегания при отсутствии зон окисления оказываются представленными только типом первичных сульфидных руд.

Вопросы для самоконтроля

1. Чем объясняется тесная связь свинца и цинка в эндогенных рудах.
2. Чем отличается минеральный состав полиметаллических и колчеданно-полиметаллических руд.
3. Каков комплекс попутных ценных компонентов свинцово-цинковых руд.
4. Для каких горизонтов в разрезе характерны барит-полиметаллические руды. Почему.
5. Характерный состав околорудных метасоматитов полиметаллических руд в вулканогенно-осадочных толщах.
6. Наиболее характерные классы соединений свинца и цинка в окисленных рудах. Почему нарушается геохимическая связь этих элементов в окисленных рудах.
7. Когда могут формироваться силикатные цинковые руды. Их минеральный состав.

3.2. Медь (Cu)

К геохимии меди. Медь формирует как эндогенные, так и экзогенные месторождения. В эндогенных процессах она является элементом бимагматичным и связана как с кислым, так и с основным магматизмом.

В связи с основным (базальтовым) магматизмом она концентрируется в составе минералов ликвационных магматических, скарновых руд и вулканогенно(гидротермально)-осадочных (так называемых колчеданных) рудах. В связи с основными магматическими породами возникают низкотемпературные гидротермальные бессульфидные месторождения самородной меди. С кислым магматизмом связаны типичные постмагматические плутоногенные гидротермальные месторождения.

В экзогенных условиях в процессе окисления и гипергенного преобразования первичных сульфидных руд медь концентрируется в зонах окисления и вторичного сульфидного обогащения. Экзогенным путем в терригенных осадках возникают также месторождения медистых песчаников и сланцев, относимых к стратиформным, не имеющим прямой связи с магматическими породами. Эти месторождения многими исследователями рассматриваются как полигенные и полихронные.

Минеральный состав руд меди весьма разнообразен и включает минералы различных классов соединений, для которых подобно минералам свинца и цинка можно выделить также две группы: сульфиды и их аналоги и несульфидные в основном кислородные соединения. Условия образования минералов каждой группы и соответственно руд, сложенных этими минералами, заметно отличаются. Поэтому для руд меди также выделяется минералогия эндогенных и экзогенных руд.

Минералогия эндогенных руд. Промышленные минералы меди составляют довольно многочисленную группу, представленную сульфидами и их аналогами. В качестве промышленного минерала эндогенных руд редких весьма специфических по условиям образования месторождений выступает самородная медь. Промышленные сульфиды по содержанию меди делятся на высокомедные (халькозин – 80 % Cu, борнит – 63 % Cu, ковеллин – 66 % Cu) и маломедные (халькопирит – 34,5 % Cu, кубанит – 24 % Cu). Основным промышленным минералом, несмотря на невысокое содержание Cu, является халькопирит, поскольку именно он, будучи широко распространенным минералом, обеспечивает большую часть запасов меди промышленных объектов, выступая на них в качестве основного минерала-носителя меди. К промышленным минералам относятся также медные сульфосоли, такие как блеклые руды и энаргит. Всё разнообразие минералов меди класса сульфидов отражено на рис. 20.

Требования к эндогенным рудам. К богатым относят руды с содержанием меди 2,5-3 %, к бедным – менее 0,5 %. Руды редко являются монометальными, обычно это комплексные руды с рядом попутных ценных компонентов.

Комплексность эндогенных руд. Медные руды, как правило, комплексные. Вместе с медью промышленную ценность этих руд составляют Zn, Pb, Mo, Ni, Fe. В качестве попутных ценных компонентов, непосредственно входящих в состав промышленных сульфидов меди, выступают Au, Ag, Se, Te. В последнее время установлено, что халькопирит может содержать необычный для медных руд в качестве попутного ценного компонента вольфрам. Комплексные руды конкретных генетических типов, в составе которых кроме меди присутствуют и другие извлекаемые металлы, могут содержать в качестве попутных ценных ком-

понентов Re, Cd, Ge, In, Tl, Ga, Co, Pt и др., которые связаны с промышленными минералами этих других металлов.

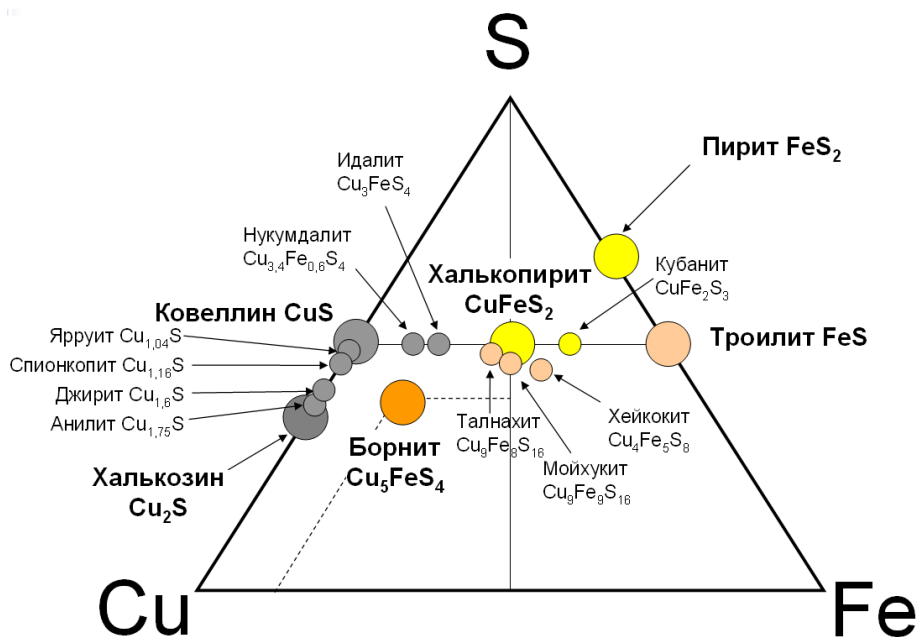


Рис. 20. Диаграмма состава сульфидов меди и железа, отражающая количественное содержание меди в минералах <https://dereksiz.org/k-geohimii-alyuminiya.html>

Эндогенные руды с учетом условий образования и комплексности представлены различными генетическими типами, на характеристике которых остановимся подробнее, уделяя внимание деталям их состава и образования.

Магматические ликвационные медно-никелевые (Cu-Ni) руды, генетически связанные с дифференцированными массивами основных и ультраосновных пород. Процесс ликвации магмы основного состава, обогащенной металлами и серой, приводит к тому, что силикатная составляющая будучи более легкой концентрируется в верхней части магматической камеры, а тяжелая сульфидная – в её нижней. Поэтому обычно руды концентрируются преимущественно в придонной части интрузивов, реже, будучи выжатыми, за его пределами во вмещающих породах. Это сплошные, вкрапленные до густо вкрапленных сульфидные агрегаты, сложенные минералами собственно магматической стадии кристаллизации – пирротинном, халькопиритом, пентландитом и кубанитом. В переменном количестве в них присутствуют магнетит и платиноиды, также являющиеся собственно магматическими. На руды магматической стадии накладывается более поздний гидротермальный парагенезис, связываемый рядом исследователей с аутометасоматическими 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. Сульфидная составляющая исходной магмы не успевает полностью опуститься на дно камеры. В этом случае возникают руды вкрапленной текстуры, пространственно приуроченные к всяческому боку рудных тел.

Магматические ликвационные медно-никелевые руды характеризуются высоким содержанием главных извлекаемых металлов (Cu и Ni). Кроме того, они отличаются весьма бо-

гатым набором попутных ценных компонентов (Co, Ag, Au, Se, Te и др.), среди которых наибольшую ценность составляют платиноиды, представленные многочисленными собственными минеральными фазами.

Основными нерудными минералами ликвационных руд являются плагиоклазы, пироксены, оливин.

Для руд этого типа характерны полнокристаллические, порфирировидные, субграфические, каплевидные структуры, массивные, петельчатые, полосчатые, вкрапленные, прожилково-вкрапленные, брекчиевые текстуры.

Медно-порфировые руды относятся к типичным плутоногенным гидротермальным. Они являются в основном комплексными и представляют собой крупные скопления медной (Cu), золото-медной (Au-Cu) или медно-молибденовой (Cu-Mo) прожилковой и прожилково-вкрапленной минерализации в порфирировых интрузивах умеренно кислого состава. Рудные тела имеют форму штокверков, представляющих собой некоторый объем интрузивного тела, содержащий прожилково-вкрапленную рудную минерализацию. В плане такие штокверки имеют кольцевую или овальную форму при цилиндрической или конической в разрезе.

Медно-порфировые руды относятся к *высокотемпературным гидротермальным образованиям*. Основными промышленными минералами в рудах являются халькопирит и молибденит в разных соотношениях, приуроченные в основном к кварцево-сульфидным жилам и прожилкам. В рудах присутствуют также в различном количестве второстепенные борнит, халькозин, сульфосоли меди, галенит, сфалерит, пирит, самородное золото, серебро. В качестве попутных ценных компонентов выступают Se, Te (обычно в виде изоморфных примесей в халькопирите), Re (изоморфная примесь в молибдените или редкий сложный сульфид меди и рения – джесказганит), Au, Ag, Zn, Pb в виде собственных минералов классов самородных элементов и сульфидов. Нерудные минералы в составе кварцевых жил и прожилков представлены ортоклазом, альбитом, флюоритом, карбонатами, сульфатами (барит), цеолитами, каолинитом. Вмещающие породы метасоматически изменены, что выражается в их окварцевании, пропилитизации и аргиллизации.

Руды полнокристаллической неравномернозернистой структуры, прожилковой, вкрапленной, гнездово-вкрапленной, прожилково-вкрапленной текстуры.

Вулканоогенно-осадочные руды колчеданного типа. Руды приурочены к вулканоогенно-осадочным толщам, связанным в одних случаях с гомодромным (Урал), в других с антидромным (Рудный Алтай) базальт-риолитовым магматизмом. По условиям образования они являются среднетемпературными гидротермальными связанными с подводным вулканизмом.

С учетом минерального состава и комплексности среди них выделяют медноколчеданные (Cu), колчеданные медно-цинковые (Cu-Zn), полиметаллические и колчеданно-полиметаллические (Cu<Pb<Zn) руды. Основным промышленным минералом меди в них является халькопирит. В значительно меньшем количестве отмечаются такие медные минералы как эндогенные борнит (наибольшее количество его характерно для медноколчеданных и колчеданных медно-цинковых руд), халькозин, медные сульфосоли. Постоянные компоненты этих руд Zn, меньше Pb представлены соответственно сфалеритом и галенитом. В рудах в переменном, часто существенном количестве (до 90 %) присутствует пирит. Собственно приставка «колчеданные» появляется в случае заметного количества в рудах желтых сульфидов халькопирита и пирита, последнего обычно более 10 %.

Руды имеют разнозернистую до тонко- и скрытозернистой, реже колломорфную структуры, сплошные, слоистые, вкрапленные, прожилково-вкрапленные текстуры. Тонко-, скрытозернистые руды сплошной текстуры получили название сливных. Несмотря на присутствие в них сульфидов желтого цвета, они образуют темно-серый довольно однородный агрегат.

Вмещающие породы обычно интенсивно метасоматически изменены, особенно со стороны лежачего бока рудных тел. Это выражается в окварцевании, серицитизации, беризитизации, хлоритизации, пропицитизации, аргиллизации, реже карбонатизации и отальковании. Минералы околорудных метасоматитов представляют нерудную составляющую вкрапленных и прожилково-вкрапленных руд.

К эндогенным относятся также месторождения меди *скарнового типа*. Медносульфидные руды соответствуют среднетемпературной гидротермальной стадии, наложенной на собственно скарновый минеральный парагенезис, представленный гранат-пироксеновым агрегатом с амфиболами, эпидотом. В состав нерудного агрегата входят и более поздние кварц, кальцит, хлорит. Основным рудным минералом меди в скарнах является халькопирит, реже борнит и халькозин. Обычно руды этого типа комплексные. Помимо меди промышленную ценность в них в разных объектах представляют железо (магнетит), свинец (галенит), цинк (сфалерит), золото, кобальт (кобальтин или изоморфная примесь кобальта в пирите), реже молибден (молибденит).

Промышленные скопления самородной меди, генетически относящиеся к *низкотемпературным гидротермальным* образованиям, обычно являются близповерхностными и связаны с основными породами. Самородная медь входит в состав жильной либо вкрапленной минерализации, представленной бессульфидным минеральным парагенезисом, включающим такие низкотемпературные минералы, как пренит, цеолиты, кальцит, хлорит, эпидот. При этом вмещающие породы оказываются гематитизированными и приобретают характерный красноватый оттенок. Источником меди для таких объектов выступают основные породы, которые характеризуются повышенным кларком меди. Поднимающиеся гидротермальные растворы рафинируют из них медь и вблизи дневной поверхности переотлагают её в самородной форме в составе бессульфидного парагенезиса. Именно бессульфидного, поскольку при наличии серы в гидротермальном растворе образовались бы сульфиды меди ввиду ярко выраженной халькофильности этого элемента. И хотя количество подобных месторождений невелико, они интересны в генетическом плане.

Минералогия экзогенных руд. В гипергенном разрезе медносульфидных месторождений сверху вниз выделяют зону окисления с резко окислительной обстановкой и зону вторичного сульфидного обогащения, расположенной ниже уровня грунтовых вод с восстановительной обстановкой. Минеральный состав руд каждой зоны существенно отличается и рассматривается отдельно.

Основными промышленными минералами окисленных руд, формирующихся непосредственно в зоне окисления, предполагающей резко окислительную обстановку с обилием кислорода и воды, являются кислородные соединения, представленные основными карбонатами, малахитом и азуритом (рис. 21), в меньшей мере сульфатом – брошантитом, иногда сульфатами более сложного состава (осаризаваитом), редко в небольшом количестве хлоридом – атакамитом. На некоторых месторождениях с длительно формирующейся зоной окисления в её низах иногда в заметном количестве появляются оксиды меди (куприт, меньше тенорит) и самородная медь. Силикат меди – хризоколла как промышленный минерал имеет небольшое

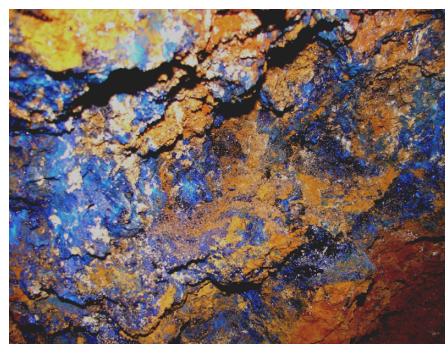
промышленное значение. В заметных количествах он образуется лишь на позднем щелочном этапе формирования зон окисления месторождений скарнового типа, когда, как считается, в растворы поступает кремнезём, высвобождающийся при выветривании гранатов кальциевого ряда (гроссуляра и андрадита).

Многие зоны окисления формируются за счет полиметаллических (Cu-Pb-Zn) и колчеданно-полиметаллических руд и приобретают Cu-Pb профиль при почти полном отсутствии в них Zn, а основным промышленным минералом Pb в них выступает церуссит. Такая специфика состава зон окисления и механизм их образования объяснены при описании экзогенных руд свинца и цинка. В окисленных рудах в качестве основных фоновых минералов присутствуют гидроксиды железа (гётит, гидрогётит), сульфаты (ярозит), кальцит, доломит, кварц, глинистые минералы.

Экзогенные руды зоны вторичного сульфидного обогащения формируются ниже уровня грунтовых вод в восстановительной обстановке. Основным промышленным минералом в них является халькозин при значительно меньшем количестве ковеллина и совсем незначительном борнита. Эти высокомедные минералы образуются в процессе замещения первичных сульфидов (пирита, халькопирита, галенита, сфалерита) халькозином в результате химического взаимодействия их с раствором сульфата меди, поступающего из вышележащей зоны окисления. Медь, будучи более активным металлом, вытесняет Fe, Pb, Zn из соответствующих сульфидов, замещая их халькозином. Нередко в зоне вторичного сульфидного обогащения появляется самородная медь. В результате руды зоны вторичного сульфидного обогащения приобретают существенно медный профиль и являются очень богатыми. Присутствие небольшого количества свинца и цинка в них связано в основном с реликтами незамещённых соответствующих первичных сульфидов, а также с образованием незначительного количества смитсонита и англезита. Зона вторичного сульфидного обогащения не всегда бывает отчетливо выражена в разрезе. Часто она проявляется в виде горизонта, сложенного так называемыми «сажистыми рудами», которые представляют собой порошокватые агрегаты халькозина, неравномерно распределенного во вмещающих породах, придавая им черный цвет.



a



б

Рис. 21. Окисленные медные карбонатные малахит-азуритовые руды:
a – штучной образец, 0,7 нат. величины; *б* – стенка забоя шахты, 1x0,7 м (Рубцовское месторождение).
Фото Зыряновой Л.А.

Длительно существующие хорошо проработанные зоны окисления обычно имеют зональное строение, наиболее четко выраженное на месторождениях со сложным минеральным и элементным составом первичных сульфидных руд. Идеализированная модель зональ-

ности разреза зоны окисления предполагает следующие горизонты, сложенные характерными минералами и имеющие соответствующий геохимический профиль.

Верхняя часть рудных тел, когда-то вышедших в условия дневной поверхности, со временем оказывается сложенной полностью окисленными и выщелоченными образованиями, получившими название «*железной шляпы*», состоящей из гидроксидов и оксидов железа с примесью глинистых минералов, кремнезема и др. «*Железная шляпа*», как правило, пуста относительно промышленных металлов.



Рис. 22. Самородок меди с выросшими на нем кристаллами куприта из окисленных руд. Рубцовское месторождение. Фото Зыряновой Л.А.

Далее вниз по разрезу располагается *горизонт сульфатов* (минералы группы *ярозита*) и далее *горизонт богатых окисленных медно-свинцовых руд карбонатного состава* с церусситом, малахитом и купритом, который на глубине часто сменяется *горизонтом богатых окисдных медных руд*, сложенных в основном оксидами меди (купритом, теноритом) с самородной медью (рис. 22). Считается, что оксид Cu куприт в заметном количестве образуется за счет окисления халькозина в случае понижения уровня грунтовых вод, когда существенно халькозиновые руды оказываются в окислительной обстановке. И тогда

наблюдаются реликты сплошных агрегатов халькозина среди окисленных руд (рис. 23).

Таким образом, в пределах зоны окисления полиметаллических сульфидных месторождений происходит смена геохимического профиля руд сверху вниз от «*железной шляпы*», сложенной в основном оксидами и гидроксидами железа (Fe), к существенно карбонатным рудам медно-свинцового ($Cu-Pb$) состава, далее к окисдным медного (Cu) состава. Гипергенный разрез завершается рудами зоны вторичного сульфидного обогащения существенно медного (Cu) состава, который на глубине сменяется первичными сульфидными рудами медно-свинцово-цинкового ($Cu-Pb-Zn$) состава.

Окисленные руды характеризуются зернистыми, порошковатыми, колломорфными структурами, сплошными, вкрапленными, натечными, прожилковыми, друзовыми текстурами. Почти всегда окисленные руды по содержанию свинца и меди относятся к богатым. Причем в хорошо проработанных зонах окисления содержание как свинца, так и меди может в разы превышать их содержание в первичных сульфидных рудах. Если учесть, что окисленные медно-свинцовые руды перерабатываются часто без обогащения, то они становятся весьма привлекательными для металлургической промышленности. Однако ограниченность месторождений с неотработанными ещё зонами



Рис. 23. Реликты халькозина зоны вторичного сульфидного обогащения (черное) в типичных окисленных медно-свинцовых рудах после понижения уровня грунтовых вод (забой шахты, $1 \times 0,7$ м). Рубцовское месторождение. Фото Зыряновой Л.А.

окисления с одной стороны, локальностью их проявления, небольшими запасами окисленных руд с другой, переводят окисленные руды в категорию второстепенных промышленных.

Месторождения медистых песчаников и сланцев. Это стратиформные месторождения, которые большинством исследователей в настоящее время относят к полигенным и полихронным. Они связаны с формациями красноцветных, пестроцветных, сероцветных песчано-сланцевых и вулканогенно-осадочных толщ. Руды имеют пластовую форму залегания, обычно высокое содержание меди (до 6–9 % при среднем содержании около 3 %), и крупные запасы. Это важный в промышленном плане тип руд.



Рис. 24. Запасы, ресурсы и основные месторождения медных руд в России [8]

Руды имеют довольно простой минеральный состав, соответствующий восстановительной обстановке. Основным промышленным минералом меди является высокомедный сульфид халькозин, вторым по значимости – также высокомедный борнит, в переменном количестве в порядке убывания отмечаются халькопирит, галенит, сфалерит, молибденит, пирит, магнетит, самородные золото и серебро и др. Руды характеризуются разнообразными попутными компонентами, среди которых выделяются Ag, Au, Bi, Se, Te, Mo, Re, Co и даже U, TR. На каждом конкретном объекте комплекс попутных ценных компонентов индивидуален. Основу руд составляют песчаники, гравелиты, кварциты, аргиллиты и сланцы.

Руды характеризуются зернистыми структурами, вкрапленными, прожилково-вкрапленными, цементационными, мелкодрозовыми, полосчатыми текстурами.

Территориально в пределах России месторождения медных в том числе комплексных руд сосредоточены в восточных районах, также на Урале и Кольском полуострове (рис. 24).

Потенциальными источниками меди являются сульфидные руды мирового океана («черные курильщики» и металлоносные осадки), а также глубоководные железомарганцевые конкреции дна мирового океана, в которых сосредоточены огромные запасы большинства цветных металлов, иногда в тысячи раз превышающие известные запасы на суше.

Вопросы для самоконтроля

1. Какой промышленный минерал меди является основным носителем меди, а какие концентраторами.
2. Какой минеральный парагенезис характерен для магматических руд. Комплексность этих руд и тип магматизма.
3. Когда возникают магматические руды сплошной, а когда вкрапленной текстуры.
4. Минеральный состав, характерные текстуры медно-молибденовых руд, состав вмещающих пород.
5. Почему зоны окисления полиметаллических (Cu-Pb-Zn) руд имеют Cu-Pb геохимический профиль.
6. Почему парагенезис гидротермальных руд самородной меди является бессульфидным.
7. Объяснить появление в гипергенном разрезе полиметаллических месторождений зоны вторичного сульфидного обогащения. Какая химическая реакция является здесь ведущей. Почему эту зону можно назвать зона вторичного медного обогащения.
8. Для зон окисления каких по генезису медных руд характерна хризоколла. Почему.
9. Что представляют собой медистые песчаники.

3.3. Никель (Ni), кобальт (Co)

Никель и кобальт также, как и рассмотренные ранее свинец и цинк, являются в эндогенных процессах элементами геохимически тесно связанными. Подобно меди никель и кобальт элементы бимагматические. Их промышленные концентрации образуются в связи с основным магматизмом в виде уже описанных магматических ликвационных медно-никелевых руд, а в связи с кислым магматизмом в виде типичных жильных гидротермальных месторождений так называемой пятиэлементной (Co-Ni-Ag-Bi-U с As) формации. Как попутные ценные компоненты Co и меньше Ni известны для некоторых скарново-магнетитовых руд и в месторождениях медистых песчаников. Экзогенные силикатные в основном никелевые руды представляют собой коры выветривания латеритного типа по ультраосновным породам.

Требования к руде. Богатыми считаются эндогенные руды с содержанием Ni более 1 %, Co более 0,5 %, бедными с содержанием Ni 0,1 %, Co 0,02 %. Для силикатных руд эти значения несколько выше, так для никеля богатые руды с содержанием 2 %, а бедные 1–1,3 %. В качестве вредных примесей для руд сульфидного типа считаются Pb, Zn, As, для силикатных – Cu, Cr и P.

Минералогия руд никеля и кобальта довольно сложная. Подобно другим цветным металлам для них выделяют эндогенную и экзогенную минералогию. При большом числе (около 40) эндогенных минералов никеля и (около 30) кобальта промышленными являются далеко не все из них. Эндогенные промышленные минералы представлены сульфидами, сульфидарсенидами и арсенидами. Экзогенные минералы относятся к слоистым силикатам группы серпентина и немногие к оксидам.

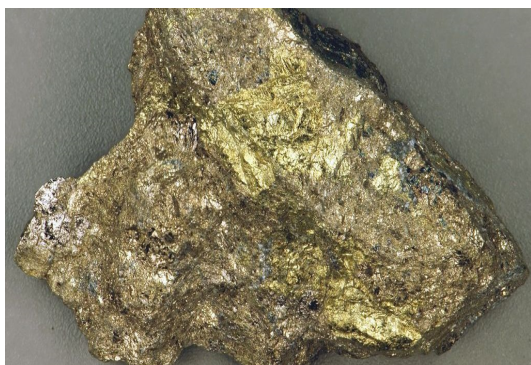


Рис. 25. Богатые Cu-Ni (пирротин-халькопирит-пентландитовые) магматические ликвационные сульфидные руды сплошной текстуры
<https://rossaprimavera.ru/news/d39402be>

ется пентландит, находящийся в тесной генетической связи с пирротином, халькопиритом и кубанитом (рис. 25). Благодаря большей доле в составе руд пирротина и пентландита визуально руды имеют часто бронзово-желтый цвет. Остальные из вышеприведенного списка сульфиды кобальта и никеля образуются в этих рудах несколько позднее и связаны с наложением на магматические руды продуктов гидротермальной стадии. В рудах не исключается присутствие сульфоарсенидов и арсенидов никеля и кобальта, образование которых также связывают с проявлением гидротермальной стадии, однако эти минералы не представляют собой промышленной значимости и являются на подобных объектах в лучшем случае второстепенными рудными.

Руды с учетом структуры являются полнокристаллическими, разнозернистыми. Как уже отмечалось для магматических руд этого генетического типа характерны сплошные текстуры в случае кристаллизации хорошо дифференцированных продуктов. При малоглубинном положении рудной камеры и не полностью завершившейся ликвации магмы образуются руды вкрапленной текстуры. По суммарному содержанию металлов руды сплошной текстуры относятся к богатым. Руды отличаются широким набором попутных ценных компонентов, основную ценность среди которых представляют платиноиды.

*Типичные плутоногенные гидротермальные среднетемпературные жильные руды, генетически связанные с кислым магматизмом, имеют меньшее промышленное значение. Руды этого типа относятся к комплексной так называемой пятиэлементной формации – Co-Ni-Ag-Bi-U с As (As – за счет основного участия в составе руд сульфоарсенидов и арсенидов Co и Ni). Основными рудными минералами кобальта и никеля в них является арсениды и сульфоарсениды при почти полном отсутствии сульфидов, что отличает их от магматических ликвационных руд. Основными минералами других элементов формации являются аргентит, висмутин, уранинит. Долевое участие всех компонентов в рудах непостоянно. Обычно проявляются лишь фрагменты этой формации, наиболее часто в виде арсенидных и сульфоарсенидных руд Co-Ni состава. Особенностью гидротермальных руд этой формации является то, что нерудным жильным выполнением в них является не кварц, как это бывает на большинстве гидротермальных жильных месторождений, а *карбонаты*, представленные кальцитом, доломитом или анкеритом. В околорудных породах при этом активно проявляется *гематитизация*.*

Для руд этого типа характерны зернистые и колломорфные структуры, прожилковые и прожилково-, гнездово-вкрапленные текстуры.

Экзогенные ярко окрашенные водные арсенаты Ni и Co имеют лишь поисковое значение.

Минералы кобальта и никеля, имеющие отношение к минералогии руд, удобно представить в виде таблицы, группируя их по классам соединений.

Эндогенные руды Ni и Co представлены двумя генетическими типами. Это *сульфидные магматические медно-никелевые руды*, которые уже описаны при рассмотрении минералогии руд меди. Основным промышленным носителем никеля и отчасти кобальта на собственно магматической стадии кристаллизации в этих рудах явля-

Промышленная значимость месторождений этого типа и запасы таких руд не столь велики и значимы, как ликвационных магматических. Однако, как генетический тип они достаточно узнаваемые.

Промышленные минералы Ni и Co

Промышленные минералы никеля (Ni)	Промышленные минералы кобальта (Co)
<i>Сульфиды</i>	
Пентландит $Ni_4Fe_4(Co,Ni,Fe,Ag)S_8$	–
Миллерит NiS	–
Никелистый пирит Ni-пирит $(Fe,Ni)[S_2]$	Кобальтистый пирит Co-пирит $(Fe,Co)[S_2]$
Полидимит $NiNi_2S_4$	Линнеит $CoCo_2S_4$
<i>Сульфоарсениды</i>	
Герсдорфит $Ni[AsS]$	Кобальтин $Co[AsS]$
<i>Арсениды</i>	
Никелин $NiAs$	–
Хлоантит $Ni^{3+}_4[As_4]^{4-}_3$	Шмальтин $Co^{3+}_4[As_4]^{4-}_3$
Раммельсбергит $Ni[As_2]^{2-}$	Саффлорит $Co[As_2]^{2-}$
Скутгерудит $(Co,Ni)^{3+}_4[As_4]^{4-}_3$	
<i>Силикаты</i>	
Гарниерит $Ni_4[Si_4O_{10}](OH)_4 \cdot 4H_2O$	–
Ревденскит $(Ni,Mg)_6[Si_4O_{10}](OH)_8$	–
<i>Оксиды</i>	
–	Асболан (Со-псиломелан)
<i>Арсенаты (непромышленные, индикаторы Co и Ni минерализации)</i>	
Аннабергит $Ni_3[AsO_4]_2 \cdot 8H_2O$	Эритрин $Co_3[AsO_4]_2 \cdot 8H_2O$

Заслуживающим внимание источником кобальта на некоторых железорудных (магнетитовых) месторождениях скарнового типа выступает кобальтсодержащий пирит, который в этих рудах, будучи второстепенным минералом, выступает как носитель и концентратор кобальта. В этом случае кобальт становится попутным ценным компонентом руд железа. Часть, обычно меньшая, кобальта на таких объектах связана с сульфоарсенидом (кобальтином). Нерудная составляющая этих руд представлена типичными скарновыми минералами, диопсидом, гранатами гроссуляр-андрадитового (грандитового) ряда, эпидотом, кальцитом, кварцем. Образование кобальтсодержащего пирита связано с гидротермальной стадией скарнового процесса.

Для руд этого генезиса характерны зернистые структуры и вкрапленные и сплошные текстуры.

Экзогенные месторождения. Определенная, но не основная доля запасов никеля и отчасти кобальта связана с экзогенными месторождениями, в которых рудные минералы представлены совершенно другими классами соединений, а именно кислородными соединениями

ми – слоистыми силикатами никеля, и буквально на единичных объектах кобальтоносным псиломеланом – асболоном. Образование этих промышленных минералов Ni и Co связаны с процессами выветривания. Наиболее характерны такие экзогенные руды для никеля. Содержание Ni в силикатных никелевых рудах может достигать 10 %. Обычно колеблется от десятых долей процента до 4–5 %. Никеленосные коры выветривания формируются при глубоком химическом выветривании ультраосновных пород в условиях тропического (влажного жаркого) климата. Источником никеля для образования слоистых силикатов никеля, гарниерита и ревденскита, является оливин и лишь отчасти пироксены и серпентин, в которых никель присутствует в небольшом количестве в качестве изоморфной примеси. При этом эндогенный оливин и пироксены при незначительном содержании в них никеля не рассматриваются в качестве самостоятельных промышленных источников никеля. В парагенезисе с ревденскитом и гарниеритом находятся другие слоистые силикаты, такие как монтмориллонит и нонтронит из группы глинистых минералов, карбонаты Mg (аморфные магнезит и доломит с характерными агрегатами типа цветной капусты), гидроксиды Fe (гётит и гидрогётит), Mn и Co (асболоан). С такими объектами связаны проявления ювелирных хризопраза (разновидность халцедона, окрашенная в голубовато-зеленый цвет с примесью соединений Ni) и хризопала. Необходимый для их образования кремнезем высвобождается в процессе глубокого химического выветривания силикатов ультраосновных пород. Гарниерит и ревденскит тяготеют к низам гипергенного разреза. Руды рыхлые порошковатые зеленоватого цвета за счет участия в составе минералов никеля.

Основные месторождения никеля и кобальта эндогенного генезиса располагаются в пределах Красноярского края, Кольского полуострова и на Урале (рис. 26, 27).



Рис. 26. Запасы, ресурсы и основные месторождения никелевых руд в России [8]

Вопросы для самоконтроля

1. Какими основными промышленными минералами представлены кобальт и никель в магматических рудах. Ведущие текстуры этих руд.
2. К какому генетическому типу относятся руды так называемой пятиэлементной формации. Их минеральный состав и текстуры. Какой минерал является основным нерудным.
3. Какой распространенный сульфид может оказаться носителем кобальта в рудах скарнового типа.
4. Условия формирования силикатных руд никеля. Источник никеля при их формировании.

3.4. Сурьма (Sb)

К геохимии сурьмы. Отчётливой предпочтительной геохимической связи сурьмы с определённым типом магматизма не отмечается. Часто руды являются фактически монометалльными с ограниченным числом попутных ценных компонентов. В отдельных генетических типах эндогенных месторождений проявляется связь сурьмы с ртутью и мышьяком, сурьмы с вольфрамом и золотом, сурьмы с цинком, свинцом, серебром, что определяет в этом случае соответствующую комплексность руд.



Рис. 28. Сплошной агрегат антимонита с коркой желтых оксидов сурьмы (сурьмяных охр) на поверхности

<https://webmineral.ru/minerals/image.php?id=14886>

Требования к руде. Минимальное промышленное содержание сурьмы в эндогенных рудах составляет 0,7–1,5 %, что определяется текстурами руд.

Минералогия руд сурьмы. Подобно другим цветным металлам для сурьмы выделяют эндогенную и экзогенную минералогия.

Минералогия эндогенных руд сурьмы. Основным промышленным минералом сурьмы является сульфид антимонит (рис. 28), второстепенными – довольно многочисленные сурьмяные сульфосоли: бертьерит, гудмундит, в комплексных рудах ливингстонит, тетраэдрит, буланжерит, джемсонит. В качестве вто-

ростепенного рудного минерала рассматривается самородная сурьма, которая на отдельных объектах встречается в заметном количестве.

Руды сурьмы относятся в основном к гидротермальным жильного и прожилкового типа. Основным жильным минералом выступает кварц, реже появляются карбонаты, серицит и хлорит, часто присутствуют пирит и арсенопирит.

Среди эндогенных руд сурьмы, с учетом их связи с типом магматизма, выделены *плутоногенные и вулканогенные*.

Плутоногенные гидротермальные руды наиболее известны. Среди них уже с учетом комплексности выделяются два типа.

Практически монометалльные руды кварц-антимонитового состава. Руды жильного типа, с жилами разной мощности. Антимонит в виде тонкозернистых массивных агрегатов

слагает отдельные участки кварцевых жил или образует гнездообразные скопления и рассеянную вкрапленность. Сульфосоли сурьмы, другие сульфиды и самородная сурьма относятся в этих рудах к редким. В качестве попутных ценных компонентов часто присутствует самородное золото, реже серебро. Руды в основном приурочены к черносланцевым и глинисто-песчанистым отложениям, часто несут следы тектонических нарушений. Рудные жилы сопровождаются маломощными ореолами метасоматитов типа аргиллизитов.

Комплексные сурьмяные руды отличаются от монометалльных более сложным минеральным составом. Они также жильного типа. В составе кварцевых жил кроме антимонита в заметном количестве присутствуют сурьмяные сульфосоли и самородная сурьма, в меньшем количестве сульфиды Cu, Pb, Zn, Ag, Hg, вольфраматы (ферберит и шеелит), самородное золото, касситерит.

Вулканогенные гидротермальные руды являются монометалльными сурьмяными или комплексными. Главный рудный минерал – антимонит, иногда, но в заметных количествах оксихлорид – надорит, присутствуют блеклые руды, сфалерит, галенит. Руды жильного типа, вмещающими являются породы жерловой фации или известково-глинистые отложения. Комплексность руд определяется присутствием минералов мышьяка (реальгар, аурипигмент), серебра, олова (касситерит). Жильные минералы – халцедон, кварц, серицит, карбонаты.

Сурьмяные и комплексные ртутно-сурьмяные с мышьяком руды стратиформных месторождений джаспероидного типа, связанные с комплексами терригенно-карбонатных пород, испытавших окремнение (джаспероиды, карбонатные породы, испытавшие кремниевый метасоматоз). Главный промышленный минерал – антимонит, второстепенные – киноварь, свинцово-сурьмяные сульфосоли, в рудах присутствуют пирит, марказит, арсенопирит, сульфиды мышьяка (реальгар и аурипигмент). Нерудные минералы представлены кварцем, кальцитом, арагонитом, флюоритом, баритом, глинистыми минералами.

Для руд характерны в основном полнокристаллические структуры; вкрапленные, прожилково-, гнездово-вкрапленные, брекчиевые, друзовые, иногда метаколлоидные текстуры. Руды слагают тела пластообразной и линзообразной формы.

Минералогия экзогенных руд сурьмы. Эндогенные минералы сурьмы являются весьма неустойчивыми в поверхностных условиях и легко окисляются. При окислении сульфидных руд образуется неустойчивый сульфат сурьмы, который быстро переходит в желтые оксиды сурьмы сенармонтит, валентинит, сервантит, стибиконит – сурьмяные охры и более редкие красный кермезит и оксихлориды. Обычно оксидные руды слагают верхние горизонты эндогенных месторождений сурьмяных руд любых генетических типов и редко представляют промышленный интерес. Однако наличие рыхлых вторичных продуктов желтого, серовато-желтого цвета, представленных сурьмяными охрами, может использоваться как косвенный диагностический признак эндогенной сульфидной сурьмяной минерализации (рис. 28).

Вопросы для самоконтроля

1. Условия образования монометалльных руд сурьмы. Минеральный состав и возможные попутные компоненты руд. Вмещающие породы.
2. Характерный парагенезис комплексных стратиформных руд джаспероидного типа.
3. Какие образования являются индикаторами эндогенной сурьмяной минерализации.

3.5. Ртуть (Hg)

К геохимии ртути. Подобно сурьме для ртути отчётливой предпочтительной геохимической связи с определённым типом магматизма не отмечается. Часто руды являются фактически монометальными с ограниченным числом попутных ценных компонентов. В отдельных генетических типах эндогенных месторождений проявляется связь ртути с сурьмой и мышьяком, ртути с цинком, свинцом, серебром, что определяет в этом случае комплексность руд.

Требования к руде. Минимальное промышленное содержание ртути в эндогенных рудах составляет 0,2 %, богатые руды могут содержать более 1 % ртути.

Минералогия руд ртути достаточно проста. Руды ртути являются преимущественно эндогенными, в которых основным промышленным минералом является тригональный сульфид ртути (киноварь), на ряде месторождений заметную роль играет самородная ртуть, иногда метациннабарит (кубическая модификация HgS), в комплексных рудах сурьяно-ртутные сульфосоли (шватцит, левингстонит). В экзогенных условиях основной промышленный минерал ртути киноварь отличается устойчивостью так нехарактерной для сульфидов. За счет киновари в поверхностных условиях может образоваться самородная ртуть, реже хлорид ртути каломель.

Подобно эндогенным рудам сурьмы с учетом связи с типом магматизма для ртутных руд выделены плутоногенные и вулканогенные руды.

Плутоногенные гидротермальные руды относятся к низкотемпературным. Руды в основном жильного типа, часто образующие штокверки. С учетом их комплексности, состава нерудной составляющей жил и характера околорудных изменений выделяют руды кварц-хлорит-серицит-киноварной и магнезиально-карбонатно-киноварной (лиственитовой) формаций.

Руды кварц-хлорит-серицит-киноварной формации располагаются среди пород различного состава (терригенных, карбонатных, магматических и метаморфических силикатных). Руды отличаются комплексностью. Среди них выделяются ртутно-сурьянные (главные рудные минералы киноварь и антимонит), ртутно-золото-серебряные (главные рудные минералы киноварь, самородные золото, серебро), ртутно-вольфрам-мышьяковые (главные рудные минералы киноварь, ферберит, шеелит, арсенопирит), ртутно-полиметаллические (главные рудные минералы киноварь, швацит, сфалерит, галенит, халькопирит). Руды в основном жильного типа, низкотемпературные (термическая неустойчивость киновари). Главным жильным минералом является кварц, могут присутствовать флюорит и барит. Околорудные изменения пород проявились в окварцевании, хлоритизации, серицитизации.

Руды магнезиально-карбонатно-киноварной (лиственитовой) формации отличаются более простым составом, часто связаны с зонами глубинных разломов среди ультраосновных пород. Основным рудным минералом является киноварь, второстепенными пирит, арсенопирит, антимонит. Главные жильные минералы – карбонаты (доломит, анкерит, в меньшей мере кальцит, магнезит) и кварц. Околорудные изменения проявились в аргиллизации, карбонатизации, окварцевании и поздней лиственитизации с появлением фуксита, источником хрома для которого выступают вмещающие ультраосновные породы.

Вулканогенные гидротермальные руды месторождений, территориально приуроченных к районам современного или молодого вулканизма, также в основном жильного, штокверкового, реже пластового типа. Отличаются весьма сложным невыдержанным комплексом рудных и специфическим составом нерудных минералов.

Рудные минералы ртути представлены киноварью, метациннабаритом, самородной ртутью и хлоридами (каламелью и кардероитом). В рудах могут присутствовать реальгар, аурипигмент, антимонит, пирит, галенит, сфалерит, акантит, самородные золото, серебро. Среди нерудной составляющей весьма характерны опал и халцедон, присутствуют самородная сера, алунит, гипс, барит, каолинит, монтмориллонит, серицит, гидрослюда. Часто отмечается адуляр (калиевая аномалия).

Для руд характерны колломорфные, тонкозернистые структуры; массивные, вкрапленные, брекчиевые, прожилковые, крустификационные, друзовые текстуры, что явно отражает условия эксгалиационной низкотемпературной деятельности.

Ртутные руды стратиформных месторождений в карбонатных (джаспероидный тип) и терригенных породах слагают согласные залежи и линзы, пространственно совмещенные с рудами жильного и штокверкового типов.

Среди них выделяют руды как монометалльные (киноварные), так и сложного минерального состава (Hg-Sb-As). В последних главные рудные минералы – киноварь и антимонит, второстепенные – метациннабарит, иногда самородная ртуть, реальгар, аурипигмент, пирит, марказит, арсенопирит, галенит, сфалерит, халькопирит, сульфосоли (левингстонит, блеклые руды). Нерудные минералы представлены кварцем, карбонатами (кальцитом, доломитом, анкеритом), флюоритом, баритом, серицитом, глинистыми минералами. Околорудные изменения вмещающих пород проявились в окварцевании, серицитизации, аргиллизации.

Структуры руд полнокристаллические и метаколлоидные; текстуры массивные, брекчиевые, вкрапленные, прожилковые, гребенчатые, кокардовые, друзовые.

В экзогенных условиях основной промышленный минерал ртути киноварь химически достаточно устойчива, благодаря чему могут формироваться россыпи киновари, формирующиеся в непосредственной близости от коренных объектов, что связано уже с физической неустойчивостью минерала.

Вопросы для самоконтроля

1. Почему плутоногенные гидротермальные руды киновари относятся к низкотемпературным.
2. Особенность состава нерудной составляющей вулканогенных гидротермальных руд ртути. Возможные попутные ценные компоненты.
3. Комплексность стратиформных руд в карбонатных толщах. Их минеральный состав.

4. Минералогия руд легких металлов

4.1. Титан (Ti)

Требования к руде. Содержание в рудах коренных месторождений TiO_2 – более 10 %. В россыпных месторождениях в виду их большей экономичности при отработке требования к руде менее жесткие. Промышленными являются россыпные месторождения с содержанием ильменита ($FeTiO_3$) более 10 % или рутила (TiO_2) более 1,5 %.

Вредные компоненты руд: Cr, P и S.

Наиболее частые *попутные ценные компоненты* в рудах различного генезиса V, Sc, Zr, Ta, Nb, TR.



Рис. 29. Характерные двойники прорастания псевдокубических кристаллов лопарита в щелочных породах <https://wiki.web.ru/wiki/%D0%9B%D0%BE%D0%BF%D0%B0%D1%80%D0%B8%D1%82>

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 – по сфену, 97 % TiO_2 – по ильмениту), меньшее значение имеет анатаз. Рутил и анатаз являются полиморфными модификациями TiO_2 (диоксида титана). С ильменитом всех генетических типов месторождений связаны промышленные со-



Рис. 30. Сфениты – щелочные породы с высоким содержанием сфена (длиннопризматические бурые кристаллы) <https://catalogmineralov.ru/sample-all/sphene.html>

держания Sc и V, а с рутилом из россыпей – Ta, Nb, V. При комплексной переработке руд некоторых генетических типов месторождений титан извлекается попутно из титансодержащих минералов (лопарита $Ce,Na,Ca(Ti,Nb)O_3$ (рис. 29), титаномагнетита). Силикат титана – сфен $CaTiO[SiO_4]$ (рис. 30) пока рассматривается в качестве потенциально промышленного минерала. Лишь при его высоком содержании в породе и благоприятной экономической ситуации он становится извлекаемым рудным минералом титана. К потенциально промышленным минералам относится также сложный оксид титана – перовскит $CaTiO_3$.

Общие замечания по условиям образования рудных минералов титана. Титан, находясь в минералах в качестве видообразующего элемента, проявляет степень окисленности +4 и встречается только в виде кислородных соединений. Геохимически титан связан с ультраосновными, основными и щелочными породами.

Коренные месторождения титана в основном относятся к магматическим. Они пространственно и генетически связаны с основными магматическими породами габбро-анортозитовой формации и относятся к позднемагматическим. По минеральному составу это могут быть апатит-ильменитовые, ильменит-титаномагнетитовые и титаномагнетитовые руды. Часто руды являются комплексными железо-титан-ванадиевыми (Fe-Ti-V). Они рассмотрены в связи с минералогией руд железа.

Высокие содержания сфена до 80–90 % в щелочных магматических породах, называемых сфенитами (рис. 30), при их крупных запасах позволили рассматривать сфен в отдельных регионах России (Хибины, Кольский полуостров) в качестве потенциального промышленного минерала титана. Лопарит вместе с перовскитом является второстепенным минералом в малиньитах – темных мелкозернистых щелочных магматических породах (Ловозерские тундры, Кольский полуостров), где его содержание и запасы допускают использование в качестве рудного минерала для извлечения не только титана, но и Nb и редкоземельных элементов. Перовскит часто является типоморфным минералом карбонатитов. Однако для лопарита и перовскита основными источниками оказываются россыпные месторождения, возникающие за счет выветривания соответствующих магматических пород и карбонатитов. Технология извлечения титана из перовскита, также как из сфена пока остается сложной и дорогостоящей.

Рутил и анатаз в качестве акцессорных минералов встречаются в магматических породах, которые при выветривании становятся источниками диоксидов титана в россыпях. Появление рутила или анатаза в магматических породах связано с режимом железа в минералообразующей среде. Известно, что рутил появляется при наличии в минералообразующей среде железа, а анатаз при его отсутствии. Рутил кроме того является типичным минералом некоторых метаморфических пород.

Минералы титана устойчивы в поверхностных условиях и способны накапливаться в россыпях (рис. 31), 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 промышленно наиболее значимыми. Среди них различают ископаемые и современные прибрежно-морские и континентальные россыпи. Ископаемые россыпи в отличие от современных отличаются высоким содержанием лейкоксена. Прибрежно-морские комплексные титан-циркониевые россыпи часто с редкими землями по минеральному составу являются рутил-ильменит-лейкоксен-циркон-монацитовыми (рис. 31). 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, которые обеспечивают комплексность руд благодаря присутствию в них



Рис. 31. Окатанные зерна ильменита из прибрежно-морской россыпи
https://geo.web.ru/druza/m-ilmenit_0.htm

Выделяют также перспективные для получения алюминия минералы, для которых уже существуют технологии переработки, однако в настоящее время они пока остаются дорогостоящими. К таким потенциально промышленным минералам относятся силикаты дистен, андалузит, sillиманит, входящие в состав высокоглиноземистых метаморфических образований. В качестве перспективного рудного минерала рассматривается также каолинит. Для России в категорию перспективных попадают алюминиевый основной карбонат давсонит $\text{NaAl}(\text{OH})_2[\text{CO}_3]$ и водный основной сульфат алюминит $\text{Al}_2(\text{OH})_4[\text{SO}_4] \cdot 7\text{H}_2\text{O}$.

Руды алюминия каждого типа отличаются по технологическим свойствам, требованиям, предъявляемым к ним, а также по условиям образования. Их характеристики рассматриваются отдельно для каждого типа.

Бокситы – традиционная алюминиевая руда, состоящая из гидроксидов алюминия, оксидов и гидроксидов Fe^{3+} , примеси глинистых и др. минералов.

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

С учетом минерального состава бокситы делятся на моногидратные (бёмитовые и диаспоровые) и тригидратные (гиббитовые). Последние распространены несколько шире, поскольку бёмит и диаспор ещё не являются окончательно гидратированными образованиями, в то время как гиббсит уже полностью гидратированное соединение, являющееся конечным продуктом выветривания пород, содержащих алюминий. При образовании бокситов из коллоидных растворов в процессе старения коллоидов образуется сначала бёмит, который со временем переходит в гиббсит. Таким образом, в любом случае со временем моногидратные (бёмит-диаспоровые) бокситы переходят в тригидратные (гиббитовые). По текстуре среди бокситов различают каменистые, рыхлые, оолитовые, бобовые, брекчиевидные, яшмовидные и др. Чаще всего бокситы при сохранении в них гидроксидов железа имеют красный, красно-бурый, бурый цвет. Маложелезистые бокситы могут быть белыми, зеленоватыми, серыми до черных (рис. 33).

Промышленные требования к бокситам. Для производства глинозема содержание Al_2O_3 в бокситах должно быть не менее 22-28 %. Промышленно важной качественной характеристикой бокситов является кремниевый модуль, определяемый как отношение оксида алюминия к оксиду кремния, которой не должен быть менее 2. В зависимости от способа переработки в бокситах учитывается также содержание CO_2 , CaO , Fe_2O_3 , S.

Попутные ценные компоненты. 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.

Общие замечания по условиям образования бокситов. Бокситы являются продуктами экзогенных процессов. В континентальных условиях это коры выветривания латеритного типа, формирующиеся в обстановке влажного, теплого климата тропиков и субтропиков и представляющие собой конечные продукты выветривания кислых, средних, щелочных, основных пород. В общем виде процесс формирования континентальных бокситов происходит следующим образом.

В процессе химического выветривания пород неустойчивыми оказываются такие породообразующие минералы, как полевые шпаты, нефелин, пироксены, амфиболы и др. В результате выветривания в процессе гидролиза силикатов и алюмосиликатов происходит последовательный вынос основных породообразующих элементов, сопровождающийся разрушением одних минералов и возникновением других.

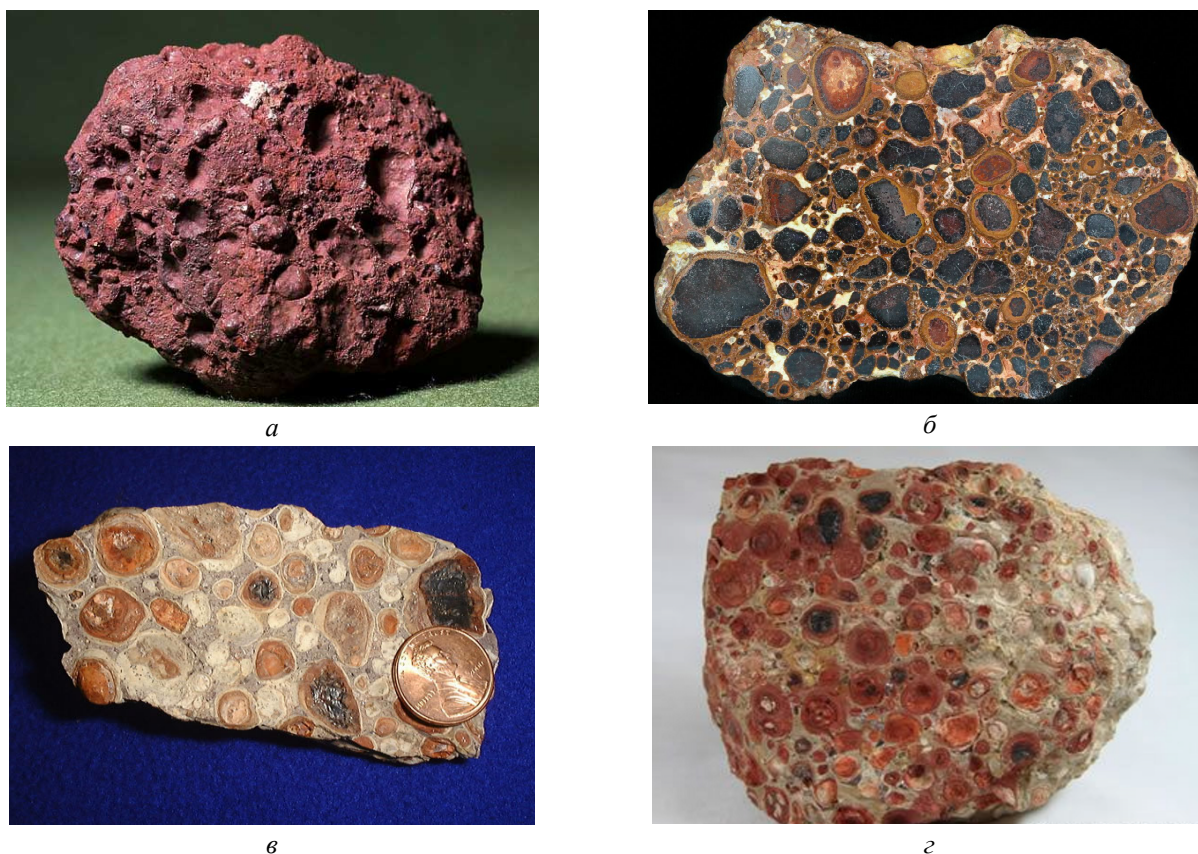


Рис. 33. Бокситы оолитовой текстуры с различным содержанием железа:
a – https://m.opt-union.ru/i_store/item_1000398498/rudy.html; *б* – <https://www.fossilera.com/minerals/4-2-polished-bauxite-aluminum-ore-slab-australia--2>; *в*, *г* – <https://jewel-spб.ru/poludragocennye/boksity-na-karte-mira.html>

Основные породообразующие элементы по степени подвижности располагаются в следующем порядке: К, Na (выносятся первыми), затем выносятся Ca, Mg, после чего еще сохраняется связь Si и Al и формируются глинистые коры выветривания. Дальнейшее развитие процесса выветривания приводит к выносу Si с сохранением в конечных продуктах Fe и Al в виде устойчивых гидроксидов, формирующих латеритные коры выветривания. После выноса Fe сохраняются лишь гидроксиды Al и устойчивые минералы Ti в основном в виде оксидов. Таким образом, конечными продуктами выветривания оказываются бокситы, состоящие из гидроксидов алюминия и устойчивых к выветриванию минералов титана. Так формируются месторождения бокситов. Большинство мировых запасов бокситов сосредоточено в тропическом поясе (рис. 34). В условиях умеренных широт с обилием влаги, но недостатком тепла, процессы химического выветривания не доходят до конца, ограничиваясь формированием глинистых кор выветривания. Отсюда дефицит традиционных алюминиевых руд в России. Немногочисленные месторождения бокситов в России являются остатками кор выветривания латеритного типа прошлых геологических эпох с благоприятной климатической обстановкой для их формирования.

Несколько менее распространены в континентальных условиях переотложенные бокситы осадочного генезиса. 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.

Переотложенные осадочные бокситы более характерны для морских условий. 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 (далее от береговой линии) – железные, а в нижней части шельфа – марганцевые руды.



Рис. 34. Добыча бокситов открытым способом (Африка)

<https://russian.alibaba.com/product-detail/raw-bauxite-ore-price-Price-of-62163504572.html>

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 (рис. 35). Основным промышленным минералом алюмосиликатных руд является нефелин $\text{KNa}_3[\text{AlSiO}_4]_4$, содержание Al_2O_3 в котором составляет около 34 %. Нефелиновые руды представлены алюмосиликатными щелочными породами (уртитам, ийолитам, тералитам, сынныритам). Промышленная ценность нефелиновых руд определяется содержанием в них нефелина. Содержание Al_2O_3 в нефелиновых 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, в качестве основных минералов содержат нефелин и клинопироксены. Содержание нефелина в урритах достигает 85 %, что обеспечивает содержание Al_2O_3 в количестве необходимом для отнесения их к нефелиновым рудам. Урриты представляют собой алюмосиликатные руды высокого качества, не нуждающиеся в предварительном обогащении. Обогащение нефелиновых пород другого состава позволяет получить концентраты с содержанием Al_2O_3 27–30 %. Отнесенные к алюминиевым рудам сынныриты, особые лейцитсодержащие щелочные породы, получившие название по Сыннырскому щелочному массиву в пределах Сыннырского хребта Юго-Восточного Прибайкалья, отличаются повышенным содержанием в них калия при содержании Al_2O_3 около 22 %. Основным носителем калия в них является лейцит $\text{K}[\text{AlSi}_2\text{O}_6]$.



Рис. 35. Карьер по добыче нефелиновых руд (Кемеровская область, Сибирь)
<https://www.avant-partner.ru/news/13895.html>

Переработка нефелиновых руд на глинозём представляет собой энергоёмкий процесс, требующий к тому же потребления большого количества карбонатных пород. Поэтому для промышленной оценки месторождений алюмосиликатных алюминиевых руд необходимо учитывать наличие вблизи перерабатывающих предприятий топливно-энергетических источников и месторождений карбонатных пород. Поэтому большинство заводов по производству глинозема в пределах России сосредоточено в Сибири, где располагаются основные месторождения нефелиновых руд и сосредоточены необходимые энергоресурсы (рис. 36).

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 алунизации. Алунитовые месторождения имеют географическую привязку и приурочены к районам вулканической деятельности, где близповерхностные воды обогащены сульфат-ионом. 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 до промышленного содержания глинозема в смеси.

К перспективным промышленным минералам Al для России можно отнести давсонит, основной карбонат алюминия, не крупные низкотемпературные гидротермальные месторождения и проявления которого известны в Сибири. Месторождения этого типа более распространены и обрабатываются за рубежом.



Рис. 36. Запасы и основные месторождения нефелиновых руд в России [8]



Рис. 37. Запасы, ресурсы и основные месторождения бокситов в России [8]

В качестве нетрадиционной высококачественной алюминиевой руды в случае значительных запасов могут рассматриваться также образования, содержащие водный основной сульфат алюминия – *алюминит*. Многочисленные (более 180) проявления алюминита известны в Сибири и могут рассматриваться как промышленно перспективные. Они известны в Иркутской области, Вилюйской и Тунгусской синеклизах, на Таймыре, в Алтае-Саянской складчатой области.

В настоящее время разработаны схемы извлечения глинозема из *каолиновых 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.

Для России основное промышленное значение имеют нетрадиционные (силикатные) алюминиевые руды и значительно меньшее – традиционные (бокситовые) руды (рис. 37). Все остальные варианты алюминиевых руд пока рассматриваются как перспективные.

Вопросы для самоконтроля

1. Что относится к традиционным рудам алюминия. Основные промышленные минералы алюминия этих руд, их класс соединений. Условия образования.
2. Условия образования остаточных бокситов. Почему они часто имеют красный цвет.
3. Минеральный состав, происхождение, алюмосиликатных пород, ставших традиционными рудами алюминия для России. Попутные ценные компоненты таких руд.
4. Минеральный состав и условия образования сульфатных руд алюминия. Класс соединения и формула алунита. Географическая приуроченность месторождений этих руд.
5. Высокоглиноземистые метаморфические минералы, которые могут рассматриваться в качестве потенциальных промышленных минералов алюмосиликатных алюминиевых руд.

5. Таблицы состава руд месторождений различных генетических типов

5.1. Железо (Fe)

Главные рудные минералы:

оксиды: магнетит – FeFe_2O_4 , гематит – Fe_2O_3 ;

гидроксиды: гётит – $\text{FeO}(\text{OH})$, гидрогётит – $\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$;

карбонаты: сидерит – $\text{Fe}[\text{CO}_3]$, сидероплезит – $(\text{Fe}, \text{Mg})[\text{CO}_3]$.

Второстепенные рудные минералы:

алюмосиликаты: шамозит, тюрингит (лептохлориты – $\text{Fe}_{6-n}\text{Al}_n[(\text{Al}_n\text{Si}_{4-n}\text{O}_{10})(\text{OH})_8]$).

Т а б л и ц а 1

Состав руд железа месторождений различных генетических типов

Генетический тип месторождения	Главные рудные (промышленные) минералы Fe	Второстепенные рудные и попутные рудные минералы	Главные нерудные и другие характерные непромышленные минералы, сопутствующие вмещающие породы	Основные (выделено) и попутные ценные компоненты	Характерные структуры и текстуры руд	Примеры месторождений России и Мира (страны, где есть месторождения)
1. Регионально метаморфизованные (железистые кварциты) фации зелёных сланцев и эпидот-амфиболитовой	Магнетит, гематит	Сидерит	Кварц, целочные амфиболы, пироксены, хлорит	Ge	Неравномерно зернистая, тонко-мелкозернистая; слоистая, сланцеватая, пльичатая	Месторождения Курской магнитной аномалии (КМА), Криворожского железорудного бассейна; Костомукшинское (Карелия), Малоярославское (Д. Восток), Чаро-Токкинский (Якутия)
2. Скарновые: а) известково-скарновые; б) магнезиально-скарновые	а) Магнетит, мушкетовит, мартит, гематит; б) магнетит, гематит	а) Со-пирит, халькопирит, сфалерит, кобальтин, сам. золото и серебро; б) людовигит (В)	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) Со, Си, Pb, Zn, Bi, Se, Te, Mo, Au, Ag; б) В	Неравномерно зернистая; вкрапленная, сплошная, прожилковая	а) Гороблагодатское (Урал), Абаканское, Тейское (Хакасия), Шерегешское, Таштагольское (Горная Шория), Соколовское, Сарбайское, Качарское (Казахстан), Дашкесан (Кавказ); б) Таёжное (В. Сибирь)

Продолжение табл. 1

Генетический тип месторождения	Главные рудные (промышленные) минералы Fe	Второстепенные рудные и попутные рудные минералы	Главные нерудные и другие характерные непромышленные минералы, сопутствующие вмещающие породы	Основные (выделено) и попутные ценные компоненты	Характерные структуры и текстуры руд	Примеры месторождений России и Мира (страны, где есть месторождения)
3. Магматические , связанные с комплексом основных пород габбро-анортозитовой формации	Магнетит, титаномагнетит, ильменит	Кульсонит (FeV_2O_4), ульвошинель ($FeTi_2O_4$), сам. платина	Пироксены, оливин, плагиоклаз, амфиболы, серпентин, эпидот, апатит	Ti, V, Sc, Co, Ni, Pt, Os	Зернистая; сплошная, вкрапленная, пятнистая	Качканарское, Куусинское (Урал), Чинейское (В. Сибирь)
4. Карбонатитовые в связи с комплексами щелочно-ультраосновных пород	Титаномагнетит, магнетит	Перовскит, пирохлор, бабделейт, ильменит, халькопирит	Апатит, форстерит, флогопит, кальцит, пирротин	Ti, Zr, Hf, Sc, Cu, P	Зернистая; массивная, полосчатая, вкрапленная	Ковдорское (Кольский полуостров), Гулинский массив (Сибирь)
5. Вулканогенно-термальные гидро-термальные 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	Коршунновское (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; порфириобластовые, 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 б) континентальные в глинисто-песчаных отложениях	а) гематит; а, б) Сидерит, лептохлориты, гидрогематит	Манганосидерит, родохрозит, гидрогематит	Карбонаты, кварц, полевой шпат, глаукоцит, глинистые минералы, пирит, вивианит	Mn, V, Ge	Оолитовая, пизолитовая	а) Ангаро-Питская группа; Керченское (Украина), Аятское, Бакчарское (Сибирь); б) Лисаковское (Казахстан)

Продолжение табл. 1

Генетический тип месторождения	Главные рудные (промышленные) минералы Fe	Второстепенные рудные и попутные рудные минералы	Главные нерудные и другие характерные непромышленные минералы, сопутствующие вмещающие породы	Основные (выделено) и попутные ценные компоненты	Характерные структуры и текстуры руд	Примеры месторождений России и Мира (страны, где есть месторождения)
9. Коры выветривания и зоны окисления (бурожелезняковые)						
а) зоны окисления по сидеритовым рудам;	а-б) Гётит, гидрогётит, гидрогематит;	а) Псиломелан, пирролизит, куприт, самсцит, малахит, азурит;	а) Кальцит, арагонит, гипс;	а) Mn, Cu ;		а) Бакальское (Урал);
б) зоны окисления по сидерит-лептохлоритовым рудам;	в) мартит, гётит, гидрогематит;	б) псиломелан, пирролизит, вернадит;	б) глинистые минералы;	б) Mn, V, Ge ;	Порошковая, землистая, оолитовая, брекчиевидная, кусковая	б) Керченское (Украина);
в) зоны окисления по железистым кварцитам;	г) мартит, гётит, гидрогематит, гидрогётит;	в) –	в) кварц;	в) –		в) Курская магнитная аномалия;
г) зоны окисления по скандино-магнетитовым рудам;	д) гётит, гидрогётит, сидерит	г) куприт, малахит, азурит, псиломелан, эритрин;	г) глинистые минералы, кальцит;	г) Co, Au ;		г) –
д) коры выветривания серпентинизированных ультраосновных пород – <i>руды природно-легированные</i>		д) пирролизит, псиломелан, хромшпинелиды	д) халцедон, опал, хлорит, глинистые минералы, магнезит	д) Cr, Co, Ni, V, Mn		д) Аккермановское, Елизаветинское (Урал), Малкинское (С. Кавказ)

5.2. Марганец (Mn)

Главные рудные минералы:

оксиды: пиролюзит – MnO_2 , вернадит – $MnO_2 \cdot nH_2O$, псиломелан – $BaMn^{2+}Mn^{4+}_9O_{20} \cdot nH_2O$ (или $mMnO \cdot nMnO_2 \cdot lH_2O$), 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: яковсит – $MnFe_2O_4$, тодорокит – $Mn^{2+}Mn^{4+}_3O_7 \cdot nH_2O$, бернессит – $Na_4Mn^{2+}_3Mn^{4+}_{11}O_{27} \cdot 9H_2O$

Т а б л и ц а 2

Состав руд марганца месторождений различных генетических типов

Генетический тип месторождения	Главные рудные (промышленные) минералы Mn	Второстепенные рудные и попутные рудные минералы	Главные нерудные и другие характерные непромышленные минералы, сопутствующие вмещающие породы	Основные (выделено) и попутные ценные компоненты	Характерные структуры и текстуры руд	Примеры месторождений России и Мира (страны, где есть месторождения)
1. Морские осадочные в прибрежно-морских (шельфовых) и в лагунных отложениях (оксидно-карбонатные руды)	Пиролюзит, псиломелан, манганит	Манганокальцит, олигонит, родохрозит	Барит, гипс, ширит, марказит; песчано-алевритистые и карбонатные осадки	V, Ge	Конкреции, оолиты, линзы, стяжения	Никопольское (Украина), Чиатурское (Грузия), Березовское (Северо-Уральская гр. месторождений, Россия)
2. Вулканогенно-осадочные в андезитовых диабаз-порфировых, кварц-кварцовых комплексах (оксидно-карбонатные руды)	Браунит, гаусманит, родохрозит, манганокальцит	Сидерит, сидероплезит, гематит, магнетит	Хлорит, серицит, кварц, опал, халледон (яшмы, кремнистые породы), доломит, анкерит	Fe, Zn, Pb, Ge, Au, Mo	Полосчатая, массивная	Западный Каражал (Казахстан); Россия: Мазульское, Дурновское, Усинское (Кузнецкий Алагау), Порожнинское (Красноярский кр.), Парнокское (Республика Коми)

Продолжение табл. 2

Генетический тип месторождения	Главные рудные (промышленные) минералы Mn	Второстепенные рудные и попутные рудные минералы	Главные нерудные и другие характерные непромышленные минералы, сопутствующие вмещающие породы	Основные (выделено) и попутные ценные компоненты	Характерные структуры и текстуры руд	Примеры месторождений России и Мира (страны, где есть месторождения)
3. Месторождения выветривания (марганцевые шпильки) по метаморфогенным силикатно-карбонатным породам и вулканогенно-осадочным рудам	Пиrolозит, псиломелан (окисленные руды)	–	Продукты выветривания	Fe	Порошковая, землистая, сплошная, нагечная	Мазульское, Дурновское, Усинское, Пороженское, Южно-Хинганское, (Россия), Чиатурское (Грузия); Индия, Бразилия, ЮАР
4. Метаморфогенные железосланцевой, амфиболитовой и гранулитовой фаций, связанные с силикатными метаморфическими породами (в настоящее время на Mn не обрабатываются)	Родонит, браунит, гаусманит	Родохрозит	Силикатно-карбонатные породы: гондиты: спессартин, кальцит, амфиболы, апатит; кодуриды: калиевый полевой шпат, гранат, апатит	–	Зернистая; сплошная, вкрапленная	Индия, Бразилия, Калахари (ЮАР), Улхумское (Саяны, Россия)
5. Глубоководные железомарганцевые конкреции дна океана (ЖМК)	Псиломелан, вернадит	Гидрогётит, тодорокит, бернессит	Опал, рутит, анатаз, барит, монтмориллонит, карбонаты, филлипсит	Fe, Ni, Co, Cu, Mo, V, TR, Zn и др.	Конкреции	Атлантический, Индийский, Тихий океан (зона Клариян Клиппертон)

5.3. Хром (Cr)

Главные рудные минералы:

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

Т а б л и ц а 3

Состав руд хрома месторождений различных генетических типов

Генетический тип месторождения	Главные рудные (промышленные) минералы Cr	Второстепенные рудные и попутные рудные минералы	Главные нерудные и другие характерные непромышленные минералы, сопутствующие вмещающие породы	Основные (выделено) и попутные ценные компоненты	Характерные структуры и текстуры руд	Примеры месторождений России и Мира (страны, где есть месторождения)
1. Магматические в массивах дифференцированных ультраосновных пород	Хромшпинелиды (хромиты)	Платиноиды (полликсен, иридийная платина)	Оливин, пироксены, серпентин, магнезит, тальк	Pt, Ir	Зернистая, сидеронитовая, массивная, вкрапленная, нодулярная, полосчатая	Россия: Сарановское, Кемпирсайская группа месторождений, Центральное (Урал), Солчезерское, Аганозерское (Кольский п-ов, Рарелия); ЮАР, США
2. Россыпные (элювиальные, делювиальные, прибрежно-морские)	Хромшпинелиды (хромиты)	–	Минералы россыпей	–	Рыхлые, песчаные, валунчатые	Сарановское, Кемпирсайская группа месторождений (Урал, Россия), Африка (Великая дайка), Куба, Япония

5.4. Ванадий (V)

Главные рудные минералы:

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

Второстепенные рудные минералы:

оксиды: кульсонит – $\text{FeV}^{3+}_2\text{O}_4$; сульфиды: патронит – $\text{V}^{4+}[\text{S}_2]_2$;
ванадаты: деклуазит – $(\text{Zn}, \text{Cu})\text{Pb}[\text{V}^{5+}\text{O}_4](\text{OH})$; силикаты: роскоэлит – $\text{KV}^{3+}_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_2$

Т а б л и ц а 4

Состав руд ванадия месторождений различных генетических типов

Генетический тип месторождения	Главные рудные (промышленные) минералы V	Второстепенные рудные и попутные рудные минералы	Главные нерудные и другие характерные непромышленные минералы, сопутствующие вмещающие породы	Основные (выделено) и 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, Кулинское, Гусевогорское (Урал), Лысаковское (Саяны), Кручининское (Забайкалье); США, ЮАР (Бушвелд), Норвегия, Швеция, Австрия
2. Вулканогенные гидротермальные в связи с траппами	Магномагнетит, магнетит, гематит	Халькопирит, сфалерит, галенит	Диопсид, гранат, эпидот, апатит, хлорит, кальцит, флогопит, амфиболы	Fe-V; Cu, Zn, Pb	Прожилковая, брекчиевидная, вкрапленная, массивная	Коршуновское (Ангаро-Илимский рудный район)
3. Месторождения выветривания:						
а) зоны окисления полиметаллических месторождений;	а) Ванадинит, деклуазит;	а) Англезит, церуссит, малахит, азурит, смитсонит;	а) Глинистые минералы, кварц;	а) Cu-Pb; V, Zn;	Порошковая, землистая, зернистая, плотная	а) Африка, Австралия, Ю. Америка;
б) зоны окисления инфильтрационных месторождений U-V руд	б) карнотит, неокисленный роскоэлит	б) другие урановые слюдки, неокисленный уранинит	б) песчаники	б) U-V; Cu		б) США

Продолжение табл. 4

Генетический тип месторождения	Главные рудные (промышленные) минералы V	Второстепенные рудные и попутные рудные минералы	Главные нерудные и другие характерные непромышленные минералы, сопутствующие вмещающие породы	Основные (выделено) и попутные ценные компоненты	Характерные структуры и текстуры руд	Примеры месторождений России и Мира (страны, где есть месторождения)
4. Осадочные: а) пластовые залежи фосфоритов, осадочных железных руд, бокситов, углей, углеродистокремнистых сланцев; б) в асфальтах 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) Порошковая, землистая, плотная; б) плотные массы	а) Россия, Казахстан, США; б) Ю. Америка (Перу)
5. Россыпные: прибрежно-морские россыпи	Ванадийсодержащий титаномагнетит	–	Минералы россыпей	Fe-Ti-V	Рыхлая	Новая Зеландия, Индия, Россия
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
7. Метаморфогенные в амфиболитах	Ванадиевый магнетит	Ильменит	Амфиболы, плагиоклазы	Fe-V; Ti	Вкрапленная, сланцеватая	Финляндия, Норвегия, США

5.5. Свинец (Pb)

Главные рудные минералы:

сульфид: галенит – PbS;
карбонат: церуссит – Pb[CO₃].

Второстепенные рудные минералы:

сульфосол: буланжерит – Pb₅Sb₄S₁₁, бурнонит – PbCuSbS₃;
теллурид: алтаит – PbTe; селенид: клаусталит – PbSe;
кислородные соли: плюмбоарозит – Pb_{0,5}Fe₃(OH)₆[SO₄]₂, англезит – Pb[SO₄], пироморфит – Pb₅[PO₄]₃Cl, ванадинит – Pb₅[VO₄]₃Cl, миметезит – Pb₅[AsO₄]₃Cl

Цинк (Zn)

Главные рудные минералы:

сульфид: сфалерит – ZnS;
карбонат: смитсонит – Zn[CO₃], монгеймит – (Zn,Fe)[CO₃],

Второстепенные рудные минералы:

сульфид: вюртцит – ZnS;
карбонат: гидроцинкит – Zn₅(OH)₆[CO₃]₂;
силикаты: каламин – Zn₄(OH)₂[Si₂O₇]·H₂O, виллемит – Zn₂[SiO₄]

Состав руд свинца и цинка месторождений различных генетических типов

Генетический тип месторождения	Главные рудные (промышленные) минералы Pb, Zn	Второстепенные рудные и попутные рудные минералы	Главные нерудные и другие характерные непромышленные минералы, сопутствующие вмещающие породы	Основные (выделено) и попутные ценные компоненты	Характерные структуры и текстуры руд	Примеры месторождений
1. Гидротермальные (жильные) свинцово-цинковые Pb-Zn	Галенит, сфалерит	Халькопирит, пирит, блеклые руды, барит	Кварц, карбонаты	Ag, Au, Cu, Cd, Se, Te	Полнокристаллические разнородные; вкрапленные, брекчиевые, прожилково-вкрапленные	Садонское, Згидское (Северный Кавказ, Россия), Германия, Канада

Генетический тип месторождения	Главные рудные (промышленные) минералы Pb, Zn	Второстепенные рудные и попутные рудные минералы	Главные нерудные и другие характерные промышленные минералы, сопутствующие вмещающие породы	Основные (выделено) и попутные ценные компоненты	Характерные структуры и текстуры руд	Примеры месторождений России и Мира (страны, где есть месторождения)
2. Вулканогенно-осадочные (колчеданные) в вулканогенно-осадочных, терригенно-карбонатных толщах (колчеданно-полиметаллические, полиметаллические, барит-полиметаллические) Cu-Pb-Zn	Сфалерит, галенит, халькопирит	Пирит, блеклые руды, алтаит-клаусталит, борнит, халькозин, вюрцит, барит	Кварц, серицит, хлорит, карбонаты	Cd, Au, Ag, Ga, Ge, In, Se, Te, Tl, Bi, Sb, As	Полнокристаллические разномасштабные до скрытозернистых; сплошные, полосчатые, вкрапленные, прожилково-вкрапленные	Тишинское, Малеевское, Золотоштинское (Казахстан), Корбалихинское, (Рудный Алтай, Россия), Озерное (Сибирь, Россия); Япония, Канада, Испания, Швеция
3. Вулканогенные колчеданно-полиметаллические в терригенных (часто в углеродистых) толщах, испытавших метаморфизм Cu-Pb-Zn	Сфалерит, галенит	Халькопирит, сульфосоли, пирротин, пирит	Кварц, слюды, карбонаты, графит, амфиболы	Au, Ag, Cu, Cd, As, Tl	Полнокристаллические; слоистые, массивные, гнездово-, прожилково-вкрапленные	Холоднинское, Горевское (Сибирь, Россия), Канада, Австралия (Брокен-Хилл)
4. Стратиформные свинцово-цинковые в карбонатных толщах Pb-Zn	Сфалерит, галенит	Халькопирит, сульфосоли, пирит	Кальцит, доломит, барит, кварц, флюорит	Te, Ge, Cd, Ag	Вкрапленные, прожилково-вкрапленные, сплошные	Сардана (Россия), Миргалмсай, 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	Зернистые; массивные, пятнистые, полосчатые, вкрапленные	Николаевское, Верхнее (Приморье, Россия), Кансай (Таджикистан), Казахстан, Южная Америка
6. Зоны окисления сульфидных месторождений всех генетических типов Pb-Cu, Pb-Cu-(Zn)	Церуссит, малахит, азурит	Смитсонит, англезит, каламин, виллемит, куприт, гидроцинкит, сам. медь, пломбоярозит, деклуазит, ванадинит, пироморфит, миметезит, халькозин	Глинистые минералы, гётит, гидротит, ярозит, барит, кварц	Ag, Au, V	Порошковатые, землестые, зернистые; сплошные, натечные, друзовые, порошковатые	Кадаинское (Забайкалье), Степное, Рубцовское, Захаровское (Рудный Алтай, Россия), Риддерское, Зыряновское, Турланское (Казахстан), США

5.6. Медь (Cu)

Главные рудные минералы:

сульфиды: халькопирит – CuFeS_2 , халькозин – Cu_2S , борнит – Cu_5FeS_4 , кубанит – CuFe_2S_3 ;
самородные: медь – Cu

Второстепенные рудные минералы:

сульфиды: ковеллин – CuS; сульфосоли: блеклые руды – $\text{Cu}_{12}(\text{As}, \text{Sb})_4\text{S}_{13}$, энаргит – Cu_3AsS_4 ;
оксиды: куприт – Cu_2O , тенорит – CuO;
кислородные соли: малахит – $\text{Cu}_2(\text{OH})_2[\text{CO}_3]$, азурит – $\text{Cu}_3(\text{OH})_2[\text{CO}_3]_2$, брошантит – $\text{Cu}_4(\text{OH})_6[\text{SO}_4]$, хризоколла – $\text{Cu}_4(\text{OH})_4[\text{Si}_4\text{O}_{10}] \cdot n\text{H}_2\text{O}$, атакамит – $\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$

Т а б л и ц а 6

Состав руд меди месторождений различных генетических типов

Генетический тип месторождения	Главные рудные (промышленные) минералы Cu	Второстепенные рудные и попутные рудные минералы	Главные нерудные и другие характерные непромышленные минералы, сопутствующие вмещающие породы	Основные (выделено) и попутные ценные компоненты	Характерные структуры и текстуры руд	Примеры месторождений России и Мира (страны, где есть месторождения)
1. Магматический медно-никелевый в расщепленных интрузивах формирования базит-гипербазитового ряда	Халькопирит, кубанит, пентландит	Борнит, халькозин, ковеллин, платиноиды, пирротин, магнетит, ильменит	Пироксены, основные плагиоклазы, оливин	Co, Pt, Ag, Au, Se, Te	Полнокристаллические; гнездово-вкрапленные, брекчиевые, массивные	Норильская, Печенгская группа (Россия), Канада
2. Карбонатный в комплексах ультраосновных щелочных пород	Борнит, халькопирит	Магнетит, бадделит (ZrO_2), кубанит	Кальцит, анкерит, оливин, флогопит, апатит	Zr, U, Th, Au, Ag, P	Полнокристаллические; вкрапленные	Кольский полуостров (Россия), Палаора (ЮАР)
3. Гидротермальный высокотемпературный, меднопорфировый в порфировых интрузивах гранитного состава	Халькопирит, борнит	Молибденит, блеклые руды, энаргит, халькозин, магнетит, сфалерит, галенит, пирит	Кварц, полевые шпаты, мусковит	Mo, Re, Au, Ag, Se, Te	Полнокристаллические; прожилково-вкрапленные, штокер-ковые	Песчанка (Чукотка, Россия), Коунрад (Казахстан), Каджаран (Армения), Кальмакыр (Узбекистан), Чили, Мексика, США, Канада, Монголия, Китай

Генетический тип месторождения	Главные рудные (промышленные) минералы Cu	Второстепенные рудные и попутные рудные минералы	Главные нерудные и другие характерные непромышленные минералы, сопутствующие вмещающие породы	Основные (выделено) и попутные ценные компоненты	Характерные структуры и текстуры руд	Примеры месторождений России и Мира (страны, где есть месторождения)
4. Гидротермальные низкотемпературные в связи с основными породами Cu	Самородная медь	Куприт, малахит	Кальцит, цеолиты, пренит, хлорит, эпидот	–	Полнокристаллические; вкрапленные	США (район Верхнего Озера)
5. Скарновый (известково-скарновый) Fe-Cu	Халькопирит борнит	Пирит, магнетит, пирротин, молибденит, сфалерит, халькозин	Пироксены, гранаты, эпидот, кальцит, скаполит	Au, Co, Zn, Pb, Ag, Co, Mo, Se, Te	Полнокристаллические; вкрапленные, прожилково-вкрапленные	Турьинская группа (Урал, Россия), Юлия (Сибирь, Россия), Саякское (Казахстан), США
6. Вулканогенно-осадочные (колчеданные) в вулканогенных и вулканогенно-осадочных базальтоидных формациях (колчеданные, полиметаллические, колчеданно-полиметаллические барит-полиметаллические) Cu, Cu-Zn, Cu-Pb-Zn	Халькопирит, сфалерит, галенит	Пирит, борнит, блеклые руды, халькозин	Кварц, кальцит, сидерит, хлорит, серицит, барит	Au, Ag, Zn, Pb, S, Te, Cd, In, Co	Полнокристаллические разнозернистые до скротозернистых; массивные, полосчатые, вкрапленные	Гайское, Сибайское, Учалинское, Блявинское (Урал, Россия), Урупское (Кавказ), Канада, Япония, Финляндия, Испания, Австралия
7. Стратиформные медистых песчаников и сланцев Cu, Cu-Mo, Cu-U	Халькозин, борнит, халькопирит, энаргит, иногда сам. медь	Пирит, сфалерит, галенит, магнетит, молибденит, кобальтин	Карбонатно-терригенные отложения	Re, Se, Te, Bi, Ni, Co, Ag, Au, Zn, Pb	Полнокристаллические; прожилково-вкрапленные, вкрапленные, цементационные	Удоканское (Россия), Джезказган (Казахстан), Германия, Африка, Австралия
8. Экзогенные месторождения (зоны окисления и вторичного сульфидного обогащения месторождений всех генетических типов) Cu-Pb-(Zn), Cu-Pb-V	Малахит, азурит, самородная медь, куприт, халькопирит, халькозин	Брошантит, хризоколла, ковеллин, тенорит, цеолит, англезит, атакамит, смитсонит, ламин, ванадинит	Гётит, гидрогётит, кварц, барит, ярозит, глинистые минералы	Ag, Au, V, Zn	Кристаллические, натечные, порошковые; вкрапленные, прожилково-вкрапленные, сплошные	Рубцовское, Захаровское, Степное (Рудный Алтай, Россия), Удокан (Россия), Александринское, Западно-Озерное (Урал, Россия), Австралия (Брокен-Хилл)

Продолжение табл. 6

Генетический тип месторождения	Главные рудные (промышленные) минералы Cu	Второстепенные рудные и попутные рудные минералы	Главные нерудные и другие характерные непромышленные минералы, сопутствующие вмещающие породы	Основные (выделено) и попутные ценные компоненты	Характерные структуры и текстуры руд	Примеры месторождений России и Мира (страны, где есть месторождения)
9. Сульфидные руды мирового океана: металлоносные осадки и массивные сульфиды – «чёрные курильщички» Cu-Zn	Халькопирит, кубанит, сфалерит, вюрцит	Галенит, халькозин, борнит, блеклые руды, молибденит, халькантит, атакамит, пирит, марказит, пирротин, гидроксиды Fe	Кремнезем	Zn, Ag, Au, Pb, Mo, Ni	Сплошные, брекчиевые, вкрапленные	Зоны Восточно-Тихоокеанского поднятия, Срединно-Атлантического хребта
10. Глубоководные железомарганцевые конкреции дна океана (ЖМК) (многокомпонентные)	Пиломелан, вернадит	Гидрогётит, тодорокит, бернессит	Опал, рутил, анатаз, барит, монтмориллонит, карбонаты, филлипсит	Fe, Ni, Co, Cu, Mo, V, TR, Zn и др.	Конкреции	Тихий океан (зона Клариян Килипертон)

5.7. Никель (Ni), Кобальт (Co)

Главные рудные

минералы:

сульфиды: пентландит – $\text{Ni}_4\text{Fe}_4(\text{Co}, \text{Ni}, \text{Fe}, \text{Ag})\text{S}_8$;

сульфоарсениды: герсдорфит – $\text{Ni}[\text{AsS}]$, кобальтин – $\text{Co}[\text{AsS}]$;

арсениды: сафлорит – $\text{Co}[\text{As}_2]^{2-}$, раммельсбергит – $\text{Ni}[\text{As}_2]^{2-}$, шмальтин – $\text{Co}^{3+}_4[\text{As}_4]^{4-}_3$, хлоантит – $\text{Ni}^{3+}_4[\text{As}_4]^{4-}_3$, скуттерудит – $(\text{Co}, \text{Ni})^{3+}_4[\text{As}_4]^{4-}_3$;

силикаты: гарниерит – $\text{Ni}_4[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, ревдинскит – $(\text{Ni}, \text{Mg})_6[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$, никелевый нонтронит – $(\text{Fe}, \text{Al}, \text{Ni})_2[(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}](\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, никелевые хлориты – $(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Ni}, \text{Al})_6[(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$.

Второстепенные рудные

минералы:

сульфиды: миллерит – NiS , кобальтовый и никелевый пирит – $(\text{Fe}, \text{Ni}, \text{Co})[\text{S}_2]$; полидимит – $\text{Ni}^{2+}\text{Ni}^{3+}_2\text{S}_4$, линнеит – $\text{Co}^{2+}\text{Co}^{3+}_2\text{S}_4$;

арсениды: никелин – NiAs ;

Гипергенные минералы –

индикаторы оруденения:

эритрин – $\text{Co}_3[\text{AsO}_4]_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, аннабергит – $\text{Ni}_3[\text{AsO}_4]_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$

Т а б л и ц а 7

Состав руд никеля и кобальта месторождений различных генетических типов

Генетический тип месторождения	Главные рудные (промышленные) минералы Ni, Co	Второстепенные рудные и попутные рудные минералы	Главные нерудные и другие характерные непромышленные минералы, сопутствующие вмещающие породы	Основные (выделено) и попутные ценные компоненты	Характерные структуры и текстуры руд	Примеры месторождений России и Мира (страны, где есть месторождения)
1. Магматические медно-никелевые в расщелинных интрузивах формаций базит-типерабазитового ряда Сп-Ni	Пентландит, халькопирит, кубанит, пирротин	Герсдорфит, кобальтин, миллерит, полидимит, магнетит, борнит, халькозин, ильменит, платиноиды	Пироксены, основные плагиоклазы, оливин	Co, Pt, Ag, Au, Se, Te, Ti, Sn и др.	Полнокристаллические; гнездово-вкрапленные, брекчиевые, массивные	Норильская, Печенгская группа (Россия), Канада
2. Гидротермальные среднетемпературные арсенидные и сульфидарсенидные (пятиэлементная формация) Co-Ni-Ag-Bi-U-(As)	Шмальтин, хлоантит, никелин, скуттерудит, кобальтин, герсдорфит	Сафлорит, раммельсбергит, сам. серебро, аргентит, электрум, висмутин, киноварь, антимонит, уранинит	Кальцит, доломит, кварц, гематит, хлорит, барит	Ag, Bi, U, Au, Sb, Hg	Полнокристаллические; почковидные, дендриты; вкрапленные, прожилковые, полосчатые, брекчиевидные, концентрически-зональные	Ховуаксы, Северо-Восток (Россия), Канада, Марокко

Генетический тип месторождения	Главные рудные (промышленные) минералы Ni, Co	Второстепенные рудные и попутные рудные минералы	Главные нерудные и другие характерные непромышленные минералы, сопутствующие вмещающие породы	Основные (выделено) и попутные ценные компоненты	Характерные структуры и текстуры руд	Примеры месторождений России и Мира (страны, где есть месторождения)
3. Скарновые железорудные Fe-(Co-Cu)	Магнетит	Со-пирит, халькопирит, кобальтин, Ni-пирит	Гранаты кальциевого ряда, пироксены, эпидот, кальцит, кварц	Сu, Со	Зернистые; сплошные, вкрапленные	Соколовское, Сарбайское (Казахстан), Дашкесанское (Азербайджан), Абаканское (Хакасия)
4. Латеритное выветривание по основному, ультраосновным породам (никеленосные силикатные коры выветривания) Ni-(Fe)	Гарниерит, нонтропит, асболоман (Со-псиломелан)	Никелевые хлориты, гидроксиды железа и марганца	Серпентин, магнезит, халцедон	Fe	Порошковые, землистые; прожилковая, пористая, сланцеватая	Кимперсайское, Аккермановское (Урал), США, Куба, Бразилия, Австралия, Индонезия
5. Глубоководные железо-марганцевые конкреции дна океана (ЖМК) (многокомпонентные)	Псиломелан, гётит, вернадит	Гидрогётит, тодорокит, бернессит	Опал, рутил, анатаз, барит, монмориллонит, карбонаты, филлипсит	Fe, Mn, Ni, Со, Cu, Мо, V, TR, Zn и др.	Конкреции	Тихий океан (зона Кларифон Клиппертон)

5.8. Сурьма (Sb)

Главные рудные минералы:

сульфид: антимонит – Sb_2S_3 ;

оксиды: валентинит – Sb_2O_3 , сенармонит – Sb_2O_3 , сервантит – $Sb^{3+}Sb^{5+}O_4$, кермесит – Sb_2S_2O .

Второстепенные рудные минералы:

сульфосол: ливингстонит – $HgSb_4S_7$, бертьерит – $FeSb_2S_4$, гудмундит – $FeSbS$, тетраэдрит – $Cu_{12}Sb_4S_{13}$,

буланжерит – $Pb_5Sb_4S_{11}$, джемсонит – $Pb_4FeSb_6S_{14}$;

гидроксид: *стибиокоцит* – $(Ca,Sb)Sb_2O_6(O,OH)$

оксихлорид: надорит – $PbSbO_2Cl$

Т а б л и ц а 8

Состав руд сурьмы месторождений различных генетических типов

Генетический тип месторождения	Главные рудные (промышленные) минералы Sb	Второстепенные рудные и попутные рудные минералы	Главные нерудные и другие характерные неметаллические минералы, сопутствующие вмещающие породы	Основные (выделено) и попутные ценные компоненты	Характерные структуры и текстуры руд	Примеры месторождений России и Мира (страны, где есть месторождения)
1. Плутоногенные гидротермальные: а) кварц-антимонитовый Sb-(Au); б) комплексный (сложного минерального и элементного состава) Sb-Au-W, Sb-W-Hg, Sb-Ag-Pb-Zn, Sb-Sn	а) Антимонит; б) антимонит	а) Бертьерит, гудмундит, пирит, арсенопирит, сам. сурьма, золото; окисленные руды: кермесит, валентинит; б) бертьерит, гудмундит, арсенопирит, пирит, ферберит, шеелит, халькопирит, галенит, сфалерит, киноварь, сам. сурьма, аргентит, касситерит	а) Кварц, хлорит, серицит, сидерит; б) кварц, карбонаты	а) Au, <Ag; б) руды комплексные	Полнокристаллические разнородные; жильные, прожилковые, вкрапленные, прожилково-вкрапленные; в окисленных рудах порошковые, рыхлые; пятнистые, неоднородные, кавернозные	а) Сарылах (Якутия, Россия), Раздольнинское, Удереинское (Красноярский край, Россия); Австралия, Боливия, Мексика; б) Бурун-Шивья (Забайкалье, Россия), Сары-Булак (Таджикистан), КНР, США
2. Вулканогенные гидротермальные: Sb-As, Sb-Ag, Sb-Sn	Антимонит; в окисленных рудах надорит, сервантит	Ливингстонит, блеклые руды, галенит, сфалерит; в окисленных рудах стибиконит	Кварц (халцедон), серицит, карбонаты; в окисленных рудах гётит, гидрорётит	Руды комплексные (As, Ag, Sn)	Полнокристаллические разнородные; прожилковые, вкрапленные, сплошные; в окисленных рудах порошковые, рыхлые, неоднородные	Надор (Алжир), Турция, США, Салокачи (Дальний Восток, Россия)

Продолжение табл. 8

Генетический тип месторождения	Главные рудные (промышленные) минералы Sb	Второстепенные рудные и попутные рудные минералы	Главные нерудные и другие характерные недромышленные минералы, сопутствующие вмещающие породы	Основные (выделено) и попутные ценные компоненты	Характерные структуры и текстуры руд	Примеры месторождений России и Мира (страны, где есть месторождения)
3. Стратиформные в терригенно-карбонатных отложениях, испытавших окремнение (джаспероидная формация) Sb, Sb-Hg-(As)	Антимонит, киноварь	Пирит, арсениопирит, сульфосоли Pb-Sb, сфалерит, халькопирит, галенит, реальгар, аурипигмент; в окисленных рудах кермесит, вальпентинит, сенармонит	Окварцованные известняки (джаспероиды), кварц, флюорит, кальцит, серицит, барит, арагонит, диккит	As	Крупнокристаллические, радиально-лучистые, мелкозернистые, метаколлоидные; плотные, вкрапленные, брекчиевые, прожилковые, друзовые	Кадамджай, Хайдаркан (Киргизия), КНР, Италия, Мексика

5.9. Ртуть (Hg)

Главные рудные минералы:

сульфид: киноварь – HgS

Второстепенные рудные минералы:

сульфид: метациннабарит – HgS, линингстонит – HgSb₄S₇;

сульфосоле: шватцит – (Hg,Cu)₁₂Sb₄S₁₃;

самородная ртуть – Hg;

оксихлорид, хлорид: кордероит – Hg₃S₂Cl₂, каломель – Hg₂Cl₂

Т а б л и ц а 9

Состав руд ртути месторождений различных генетических типов

Генетический тип месторождения	Главные рудные (промышленные) минералы Hg	Второстепенные рудные и попутные рудные минералы	Главные нерудные и другие характерные непромышленные минералы, сопутствующие вмещающие породы	Основные (выделено) и попутные ценные компоненты	Характерные структуры и текстуры руд	Примеры месторождений России и Мира (страны, где есть месторождения)
1. Плутоногенные гидротермальные: а) кварц-хлорит-серцит-киноварный Hg-As, Hg-W-As, Hg-Sn, Hg-Au-Ag, Hg-Cu, Hg-Pb-Zn б) магнезиально-карбонатно-киноварный (лиственитовый) Hg	а) Киноварь, шватцит; б) киноварь	а) Антимонит, ферберит, шеелит, арсенопирит, галенит, сфалерит, халькопирит, касситерит, аргентит, золото; б) пирит, арсенопирит, антимонит	а) Кварц, карбонаты, хлорит, серцит, флюорит, барит; б) доломит, анкерит, кварц, магнезит, диоксит, кальцит, фуксит, хромит, серпентин, тальк	а) Руды комплексные б) –	а) Зернистые; прожилковые, вкрапленные; б) зернистые; прожилковые, вкрапленные	а) Ильдикан (Забайкалье, Россия), КНР, Турция, Тунис б) Чаган-Узун (Г. Алтай, Россия), Нью-Альмаден (США)
2. Вулканогенные гидротермальные (опалит-киноварная) Hg, Sb-Hg	Киноварь, метациннабарит, самородная ртуть	Каломель, кордероит, реалгар, аурипигмент, антимонит, пирит, галенит, сфалерит, халькопирит, аргентит, пираргирит	Опал, халцедон, самсера, адуляр, флюорит, хлорит, алунит, каолинит, диоксит, гипс, барит, цеолиты	As, Ag, Au	Зернистые, коллоидные, массивные, вкрапленные, прожилковые, брекчиевидные, крестоватые, друзовые	Пламенное, Чемпура (Северо-Восток, Россия), Монте-Амиата (Италия), Турция, Япония, Алжир, Кордеро (США)

Продолжение табл. 9

Генетический тип месторождения	Главные рудные (промышленные) минералы Hg	Второстепенные рудные и попутные рудные минералы	Главные нерудные и другие характерные непромышленные минералы, сопутствующие вмещающие породы	Основные (выделено) и попутные ценные компоненты	Характерные структуры и текстуры руд	Примеры месторождений России и Мира (страны, где есть месторождения)
3. Стратиформные в карбонатных и терригенных отложениях, испытавших окремнение (джаспероидная формация) а) кварц-диккиит-киноварная Hg; б) кварц-антимонит-флюорит-киноварная Hg-Sb-(As)	а) Киноварь; б) киноварь, антимонит	а) Антимонит, арсениопирит, пирит, сам. ртуть, метациннабарит; б) пирит, арсениопирит, левингстонит, реальгар, аурипигмент, галенит, сфалерит, халькопирит, блеклые руды	а) Кварц, кальцит, диккиит, серицит, барит, цеолиты; б) окварцованные карбонатные породы (джаспероиды), кварц, флюорит, кальцит, серицит, диккиит, барит	а) – б) As	Зернистые, метаколлидные, цементационные; прожилковые, вкрапленные, массивные, брекчиевые, друзовые	а) Никитовка (Украина), Альмаден (Испания); б) Хайдаркан (Киргизия)

5.10. Титан (Ti)

Главные рудные минералы:

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

Второстепенные и потенциально рудные минералы:

оксиды: перовскит – CaTiO_3 , лопарит – $(\text{Ca}, \text{Na}, \text{Ce})(\text{Ti}, \text{Nb})\text{O}_3$, ульвошинель (ульвит) – $\text{Fe}^{2+}_2\text{Ti}^{4+}\text{O}_4$;
силикаты: сфен (титанит) – $\text{CaTiO}[\text{SiO}_4]$

Т а б л и ц а 10

Состав руд титана месторождений различных генетических типов

Генетический тип месторождения	Главные рудные (промышленные) минералы Ti	Второстепенные рудные и попутные рудные минералы	Главные нерудные и другие характерные непромышленные минералы, сопутствующие вмещающие породы	Основные (выделено) и 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 формации	Магнетит, титаномagnetит, ильменит	Ульвошинель, кульсонит, платиноиды	Пироксены, оливин, плагиоклаз, амфиболы, серпентин, эпидот, апатит	Fe, V, Pt, Os, Sc	Зернистая; вкрапленная, пятнистая	Качканарское, Медведское (Урал, Россия), Лысанское, Кручининское, Куранахское Чинейское, (Сибирь, Россия)
2. Магматические в связи с комплексами щелочных пород	а) Сфен; б) перовскит, лопарит	Ильменит	Апатит, нефелин, полевые шпаты, эгирин, флогопит	TR, Nb, Sc , апатит	Сплошная зернистая	Хибины (Кольский полуостров, Россия)
3. Метаморфические в древних кристаллических сланцах, гнейсах, амфиболитах, эклогитах	Рутил	–	Кварц, полевые шпаты, амфиболы, гранат	–	Вкрапленная	Кузнечихинское, Шубинское (Урал, Россия)
4. Вулканогенно-осадочные	Ильменит	–	Вулканогенно-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	Вольнский массив (Украина), Кундыбаевское (Казахстан)

Генетический тип месторождения	Главные рудные (промышленные) минералы Г ₁	Второстепенные рудные и попутные рудные минералы	Главные нерудные и другие характерные непромышленные минералы, сопутствующие вмещающие породы	Основные (выделено) и попутные ценные компоненты	Характерные структуры и текстуры руд	Примеры месторождений России и Мира (страны, где есть месторождения)
б. Россыпные: а) <i>циркон-ильменитовые</i> прибрежно-морские комплексы; б) <i>ильменитовые</i> аллювиальные; в) <i>нефте-титановые</i> древние метаморфизованные; г) редкоземельно-редкометалльные элювиально-делювиальные за счёт щелочных пород	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 нефленосный песчаник г) нефелин, эгирин, апатит	а) Zr, TR, Sc, V Та, 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)

5.11. 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: алунит – $KAl_3(OH)_6[SO_4]_2$.

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: давсонит – $NaAl(OH)_2[CO_3]$; сульфаты: алюминит – $Al_2(OH)_4[SO_4] \cdot 7H_2O$

Т а б л и ц а 11

Состав руд алюминия месторождений различных генетических типов

Генетический тип месторождения	Главные рудные (промышленные) минералы Al	Второстепенные рудные и попутные рудные минералы	Главные нерудные и другие характерные промышленные минералы, сопутствующие вмещающие породы	Основные (выделено) и попутные ценные компоненты	Характерные структуры и текстуры руд	Примеры месторождений России и Мира (страны, где есть месторождения)
1. Бокситовые месторождения кор выветривания (в том числе ископаемые) по породам основного, среднего и кислого состава в условиях тропиков и субтропиков	Моногидратные бокситы: бёмит; тригидратные бокситы: гиббсит	Диаспор, рутил, гематит, гидрогематит, гётит, гидрогётит	Каолинит	Ga, V, Ti, Sc, Fe	Землистые, полосчатые, сланцеватые, псевдобобовые	Висловское (европейская часть 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	Гётит; а) Гётит; б) гиббсит, гётит, гематит	а) Каолинит, карбонаты, углефицированный материал; б) карбонаты, глинистые минералы	Fe	а) Каменистые, рыхлые, глинистые; обломочные, оолитобобовые, брекчиевые, сплошные; б) оолитовая, обломочная; слонстая	а) Россия: Тиманская, Тихвинская группа (европейская часть), Татарский район (Енисейский край); б) Северо-Уральский бокситовый район (Россия), Венгрия, Франция, Южная Америка

Генетический тип месторождения	Главные рудные (промышленные) минералы А1	Второстепенные рудные и попутные рудные минералы	Главные нерудные и другие характерные непромышленные минералы, сопутствующие вмещающие породы	Основные (выделено) и попутные ценные компоненты	Характерные структуры и текстуры руд	Примеры месторождений России и Мира (страны, где есть месторождения)
3. Магматическое <i>в связи со щелочными породами:</i> а) уртиты, ийолиты, тералиты; б) сынныриты	а) Нефелин; б) нефелин	а) Лопарит, титаномагнетит; б) лейцит	а) Пироксены, апатит, полевые шпаты, сфен; б) калиевый полевой шпат, пироксены	а) Ga , Rb, Cs, Y, Sr, Nb, Ti б) K, Ga , Rb, Cs, Y, Sr, Ti	Зернистые; массивные, пятнистые	Кузнецкий Алатау, Кольский полуостров, Северное Прибайкалье, Забайкалье (Россия)
4. Гидротермальные а) в связи с процессами алунизации алюмосиликатных пород в районах ископаемого и молодого вулканизма; б) низкотемпературные близповерхностные	а) Алунит б) давсонит	а) Диаспор; б) киноварь, галенит	а) Кварц, глинистые минералы, барит; б) карбонаты, флюорит, кварц	а) Ва, Р, V, Ga; б) Hg, F	а) Зернистые, землистые; вкрапленные, сплошные; б) зернистые, вкрапленные	а) Загликское (Азербайджан, Кавказ), Казахстан, Приморье (Россия); б) Кузбасс (Россия), Италия, Канада, США
5. Метаморфогенные: высокоглинозёмистые сланцы амфиболитовой фации	Дистен, силлиманит, андалузит	Ставролит	Кварц, слюды	–	Зернистые; вкрапленные, сланцеватые	Кольский полуостров, Урал, Иркутская область, Красноярский край (Россия)
6. Экзогенные: а) коры выветривания глинистого профиля по кислотным и щелочным породам; б) продукты воздействия сернокислых растворов на терригенно-карбонатные породы	а) Каолинит; б) алуминит	–	а) Кварц, галлуазит, нонтронит; б) карбонаты, глинистые минералы	–	а) Порошковатые сплошные массы; б) нагётные, сплошные массы	а) Франция, Южная Америка; б) Восточная Сибирь (Россия), Германия, Франция

Литература

1. Авдонин В.В., Бойцов В.Е., Григорьев В.М. и др. Месторождения металлических полезных ископаемых. 2-е изд., испр. и доп. М.: Академический Проект, Трикста, 2005. 720 с.
2. Барабанов В.Ф. Генетическая минералогия. Л.: Недра, 1977. 327 с.
3. Батти Х., Принг А. Минералогия для студентов. М.: Мир, 2001. 429 с.
4. Бетехтин А. Г. Курс минералогии: учеб. пособие. М.: КДУ, 2008. 735 с.
5. Быбочкин А.М., Быховский Л.З., Воробьев Ю.Ю. и др. Комплексная геолого-экономическая оценка месторождений (основы методики). М.: Недра, 1990. 325 с.
6. Булах А.Г., Золотарев А.А., Кривовичев В.Г. Структура, изоморфизм, формулы, классификация минералов. СПб.: Изд-во С.-Петербур. ун-та, 2014. 132 с.
7. Годовиков А.А. Минералогия. М.: Недра, 1983. 647 с.
8. Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 году». М.: Министерство природных ресурсов и экологии РФ и Федеральное агентство по недропользованию (РОСНЕДРА), 2020. 568 с.
9. Зырянова Л.А., Пеков И.В., Толочко К.В., Литвинов Н.Д. Состав и строение зоны окисления Рубцовского колчеданно-полиметаллического месторождения (Рудный Алтай). Минералогия, геохимия и полезные ископаемые Азии. Томск: Томский ЦНТИ – филиал ФГБУ «ЗЭА» Минэнерго России, 2012. Вып. 2. С. 90–103.
10. Изоитко В.М. Технологическая минералогия и обогащение руд. СПб.: Недра, 1997. 264 с.
11. Исаенко М.П. Определитель структур и текстур руд. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1983. 61 с.
12. Коннова Н.И. Рудная и технологическая минералогия: учеб. пособие. Красноярск, 2019. 176 с.
13. Кононов О.В., Бакшеев И.А. Курс технологической минералогии: учеб. пособие. М.: Изд-во МГУ, 2004. 203 с.
14. Перельман А.И. Геохимия: учеб. пособие для геолог. спец. ун-тов. М.: Высш. школа, 1979. 423 с.
15. Смирнов В.И. Геология полезных ископаемых: учеб. для вузов. М.: Недра, 1989. 326 с.
16. Смирнов В.И., Гинсбург А.И., Григорьев В.М., Яковлев Г.Ф. Курс рудных месторождений: учеб. для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1986. 360 с.
17. Смирнов С.С. Зона окисления сульфидных месторождений. 3-е изд. Л.: Изд-во Академии Наук СССР, 1955. 331 с.
18. Шпайхер Е.Д., Кривошеин В.Р. Вещественный состав и технологические свойства полезных ископаемых: учеб. пособие. Новокузнецк, 2008. 271 с.
19. Яковлев П.Д. Промышленные типы рудных месторождений. М.: Недра, 1986. 358 с.
20. Яхонтова Л.К., Зверева В.П. Основы минералогии гипергенеза: учеб. пособие. Владивосток: Дальнаука, 2000. 336 с.

Предметный указатель рудных минералов

А

Азурит...22, 28, 34, 35, 36, 59, 63, 66, **67**, 68
Алтаит...27, **65**, 66
Алунит...28, 46, 51, 54, 56, 74, **78**, 79
Алюминит ...**51**, 55, 78, 79
Алюмохромит ...19, **62**
Анатаз...48, 49, 61, 69, 71, **76**, 77
Англезит...27, 28, 35, 63, **65**, 66, 68
Андалузит ...51, 54, **78**, 79
Аннабергит...**40**, 41, 43, 70
Антимонит...43, 44, 46, 70, **72**, 73, 74, 75
Асболан ...17, 40, 41, 71
Атакамит...35, **67**, 68, 69

Б

Бёмит... 51, 64, **78**
Бернессит ...15, **60**, 61, 69, 71
Бертьерит...43, **72**
Биверит...28
Борнит...26, 31, 33–35, 37, 66, **67–70**
Браунит...15–18, 58, **60**, 61
Брошантит...34, **67**, 68
Буланжерит...43, **65**, 66, **72**
Бурнонит...**65**, 66

В

Валентинит...45, **72**, 73
Ванадиевый магнетит...**63**, 64
Ванадинит...22, **63**, **65**, 66, 68
Вернадит...15, 16, 59, **60**, 61, 69, 71
Виллемит...29, **65**, 66
Вульфенит...**28**
Вюртцит...26, **65**, 66, 69

Г

Галенит...25, 26, 33–35, 37, 44, 46, 58, 63, **65–69**, 72–75, 79
Гарниерит...**40**, 41, **70**, 71
Гаусманит...15–18, 58, **60**, 61
Гематит...8–13, 22, 26, 34, 40, **57–60**, 63, 70, 78
Герсдорфит...40, **70**
Гётит...8, 9, 12, 13, 29, 35, 41, **57**, 58, 59, 66, 68, 71, 72, 78
Гиббсит (гидраргиллит)...51, 64, **78**
Гидрогематит ...13, 58, 59, 78

Гидрогётит...8, 9, 12, 13, 29, 35, 41, **57–59**, 61, 66, 68, 69, 71, 72, 78
Гидроцинкит...**65**, 66

–Гудмундит...43, **72**

Д

Давсонит ...51, 55, **78**, 79
Деклуазит...22, **63**, 66
Джемсонит...43, **72**
Диаспор...51, **78**, 79
Дистен (кианит) ...51, 54, 77, **78**, 79

И

Ильменит...9, 10, 21, 22, 48, 49, 50, 58, 63, 64, 67, 70, **76**, 77

К

Каламин...29, **65**, 66, 68
Каломель...45, **74**
Каолинит...33, 46, 51, 55, 74, 76, 77, **78**, 79
Карнотит...23, **63**
Кеммерит...19
Кермезит...45, **72**, 73
Киноварь...44–46, 70, 72–74, 75, 79
Клаусталит...27, **65**, 66
Кобальтин ...34, 40, 41, 57, 68, **70**, 71
Кобальтовый и никелевый пирит...35, **40**, 42
Ковеллин...31, 35, **67**, 68
Кордероит...**74**
Кочубеит...19
Кубанит...19, 31, 32, 39, **67**, 69, 70
Куприт...35, 36, 59, 66, **67**, 68

Л

Лейкоксен...48–50, **76**, 77
Лейцит...54, **78**, 79
Ливингстонит...43, **72**, 74
Линнеит...**40**, 70
Лопарит...48–50, **76**, 77, 79

М

Магнетит...8–12, 19, 21, 22, 24, 32, 34, 37, **57**, 58, 60, 63, 67, 68, 70, 71, 76
Магномагнетит...21, 22, 58, **63**
Магнохромит...19, 21, **62**
Малахит...22, 28, 34–36, 59, 63, 66, **67**, 68

Манганит...15, 16, **60**, 61
Манганокальцит... **60**
Манганосидерит (олигонит)...58, **60**
Метациннабарит...45, 46, **74**, 75
Миллерит...40, **70**
Миметезит...**65**, 66
Монгеймит ...28, 29, **65**

Н

Надорит...44, **72**
Нефелин...51–55, 76–**78**, 79
Никелевые хлориты...**70**, 71
Никелевый нонтронит...**70**
Никелин...**40**, 70

О

Олигонит ...15, 17, 28, **60**
Осаризаваит...28, 34

П

Патронит...22, 23, **63**, 64
Пентландит ...19, 32, 39, 40, 67, **70**
Перовскит...48–50, 58, **76**, 77
Пирролюзит...15–17, 59, **60**, 61
Пироморфит...**65**, 66
Плюмбоярозит...**65**, 66
Полидимит...**40**, 70
Псиломелан...15–17, 40, 41, 58–**60**, 61, 69, 71

Р

Раммельсбергит...40, **70**
Ревдинскит...**70**
Родонит...15, 16, 18, **60**, 61
Родохрозит...15, 17, 58, **60**, 61
Рутил...21, 48, 49, 61, 69, 71, **76**, 77, 78

С

Самородная медь...31, 34, 35, **68**
Самородная ртуть...45, 46, **74**
Сафлорит...40, **70**
Сенармонтит...45, **72**, 73
Сервантит...45, **72**
Сидерит...8–12, **57**–60, 64, 68, 72
Сидероплезит...8, 9, 12, **57**, 58, 60
Силлиманит...51, 54, 55, **78**, 79
Скуттерудит...40, **70**
Смитсонит...22, 28, 29, 35, 63, **65**, 66, 68
Стибиоконит...**72**
Субферрихромит ... 19, **62**

Сфалерит...25, 26, 28, 33–35, 37, 44, 46, 57, 58, 63, **65**–69, 72–75
Сфен (титанит) ...21, 48, 49, 50, **76**, 77, 79

Т

Тенорит...35, 36, **67**, 68
Тетраэдрит...43, **72**
Титаномагнетит...10, 21, 22, 24, 48, 49, 58, **63**, 64, 76, 79
Тодорокит ...15, **60**, 61, 69, 71
Тунгомелан...17
Тюрингит...8, **57**

У

Уваровит...19, 20, **62**
Ульвошпинель (ульвит)...21, 58, 63, **76**

Ф

Фуксит...19, 46, 74

Х

Халькозин...26, 28, 31, 33–37, 66, **67**–70
Халькопирит...19, 25–27, 31–35, 37, 39, 46, 57, 58, 63, 65–**67**, 68–75
Хлоантит...40, **70**
Хризоколла...35, 38, **67**, 68
Хромдиопсид...19, **62**
Хромистые хлориты... **62**
Хромит...19–21, **62**, 74, 77
Хромпикотит...19, **62**
Хромшпинелиды...19–21, 22, 59, **62**

Ц

Церуссит...22, 27, 28, 35, 36, 63, **65**, 66, 68

Ш

Шамозит...8, **57**, 64
Шватцит...45, **74**
Шмальтин...40, **70**

Э

Энаргит...31, **67**, 68
Эритрин ...**41**, 43, 59, 70

Я

Якобсит...15, 21, **60**

Полужирным указаны страницы, где приведены формулы минералов.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ МИНЕРАЛОГИИ РУД	5
2. МИНЕРАЛОГИЯ РУД ЧЕРНЫХ МЕТАЛЛОВ	8
2.1. Железо (Fe)	8
2.2. Марганец (Mn)	15
2.3. Хром (Cr)	19
2.4. Ванадий (V)	21
3. МИНЕРАЛОГИЯ РУД ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ	25
3.1. Свинец (Pb), цинк (Zn)	25
3.2. Медь (Cu)	31
3.3. Никель (Ni), кобальт (Co)	38
3.4. Сурьма (Sb)	43
3.5. Ртуть (Hg)	45
4. МИНЕРАЛОГИЯ РУД ЛЁГКИХ МЕТАЛЛОВ	47
4.1. Титан (Ti)	47
4.2. Алюминий (Al)	49
5. ТАБЛИЦЫ СОСТАВА РУД МЕСТОРОЖДЕНИЙ РАЗЛИЧНЫХ ГЕНЕТИЧЕСКИХ ТИПОВ	56
5.1. Железо (Fe)	56
5.2. Марганец (Mn)	59
5.3. Хром (Cr)	61
5.4. Ванадий (V)	62
5.5. Свинец (Pb), цинк (Zn)	64
5.6. Медь (Cu)	66
5.7. Никель (Ni), кобальт (Co)	69
5.8. Сурьма (Sb)	71
5.9. Ртуть (Hg)	73
5.10. Титан (Ti)	75
5.11. Алюминий (Al)	77
Литература	79
Предметный указатель рудных минералов	80

Учебное издание

**ЗЫРЯНОВА Луиза Алексеевна
ПЕШКОВ Алексей Александрович
БЕСТЕМЬЯНОВА Ксения Викторовна**

**МИНЕРАЛОГИЯ
РУД ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И ЛЁГКИХ МЕТАЛЛОВ**

Учебное пособие

Издание подготовлено в авторской редакции

В оформлении обложки использована фотография окисленных свинцово-медные руды Рубцовского колчеданно-полиметаллического месторождения Рудного Алтая. Забой шахты (фото Л.А. Зыряновой)

Подписано в печать 26.09.2022 г. Формат 60×84¹/₈.
Печ. л. 10,5. Усл. печ. л. 9,7. Гарнитура Times.
Тираж 30 экз. Заказ № 5100.

Отпечатано на полиграфическом оборудовании
Издательства Томского государственного университета
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.
Телефоны: 8(382-2)–52-98-49; 8(382-2)–52-96-75
Сайт: <http://publish.tsu.ru> E-mail: rio.tsu@mail.ru